

## ЗАДАЧА 1. Розрахунок кола постійного струму

Для заданої схеми електричного кола, схема якого представлена на рис.1.1-1.100, за даними, наведеними у таблиці 1 потрібно:

1. Скласти схему рівнянь для визначення струмів за законами Кірхгофа.
2. Знайти всі струми, користуючись методом контурних струмів.
3. Перевірити правильність рішення, застосувавши метод вузлового напруги.
4. Скласти баланс потужностей.
5. Побудувати в масштабі потенційну діаграму для зовнішнього контуру.

### 1.1 Загальні відомості

#### Закон Ома

Струм  $I$  в електричному колі і напруга  $U_{AB}$  пов'язані між собою законом Ома:

$$I = \frac{E}{r_0 + r} \quad (1.1)$$

Джерело характеризується електрорушійною силою (ЕРС)  $E$  і внутрішнім опором  $r_0$ , приймач - опором  $r$ .

З рівняння (1.1) можна отримати:

$$U_{AB} = I \cdot r = E - I \cdot r_0, \quad (1.2)$$

де  $U_{AB}$  – падіння напруги в зовнішньому колі;  
 $I \cdot r_0$  - падіння напруги всередині джерела.

Рівняння (1.2) називають рівнянням електричної рівноваги реального джерела. Зазвичай  $r_0$  невелике ( $r_0 < 1$  Ом), і їм можна знехтувати. Тоді рівняння електричної рівноваги ідеального джерела буде мати вигляд:

$$U_{AB} = E \quad (1.3)$$

Помноживши праву і ліву частини виразу (1.2) на струм  $I$ , можна одержати рівняння балансу потужності кола:

$$I^2 \cdot r = E \cdot I - I^2 \cdot r_0, \quad (1.4)$$

де  $E \cdot I$  – потужність, що розвивається джерелом;  
 $I^2 \cdot r$  – потужність, споживана навантаженням;  
 $I^2 \cdot r_0$  – потужність втрат всередині джерела.

Тоді:

$$P_1 = P_2 + P_3, \quad (1.5)$$

Звідки коефіцієнт корисної дії електричного кола:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} < 1 \quad (1.6)$$

При розрахунках кола постійного струму часто зустрічаються гілки з однією або декількома ЕРС, котрі мають різні напрямки з одним або декількома опорами.

Якщо  $E_1 > E_2$ , то струм  $I$  в гілці буде протікати від точки з великим потенціалом  $\phi_A$  до точки з меншим потенціалом  $\phi_B$ , тому  $U_{AB} = \phi_A - \phi_B$  буде збігатися за напрямком із струмом  $I$ .

Сила струму гілки буде визначатися виразом закону Ома:

$$I = \frac{U_{AB} + \sum E}{\sum r_{AB}}, \quad (1.7)$$

де  $U_{AB}$  – напруга між вузлами  $A$  і  $B$ ; напрямок цієї напруги вибирається так, щоб воно збігалось з обраним напрямком струму;

$\sum r_{AB}$  – арифметична сума опорів;

$\sum E$  – алгебраїчна сума ЕРС гілки. Вхідні в суму ЕРС приймаються зі знаком «+», якщо їх напрямок співпадає з напрямком струму, в іншому випадку ЕРС приймається зі знаком «-».

Якщо гілка містить тільки одну ЕРС та опір, наприклад,  $E_1$ ,  $r_1$ , то вираз (1.7) набуває вигляду:

$$I = (U_{AB} + E_1) \cdot q_1, \quad (1.8)$$

де  $q_1 = 1 / r_1$  - провідність гілки, Сім.

При заданих  $E_1$  і  $q_1$  значення струму  $I$  можна легко визначити, якщо відома вузлова напруга  $U_{AB}$ , величина якого визначається з (1.2,1.3).

$$U = \frac{\sum_{k=1}^n E_k \cdot q_k}{\sum_{k=1}^n q_k}, \quad (1.9)$$

де  $E_k$  – ЕРС  $k$ -ї гілки;

$q_k$  – провідність  $k$ -ї гілки.

Для розгалуженого кола, який містить два вузли, правильно вибрати напрямління  $U_{AB}$  не завжди можливо. Тому умовно задають напрямком  $U_{AB}$ , вважаючи його позитивним, і обчислюють за виразом (9). При цьому добуток  $E_k \cdot q_k$  береться зі знаком «+», якщо ЕРС гілки спрямовані зустрічно  $U_{AB}$ , і зі знаком «-» для ЕРС, зроблений на підставі  $U_{AB}$ . Якщо обчислене значення  $U_{AB}$  вийде від'ємним, раніше ухвалене напрямком  $U_{AB}$  змінюють на зворотнє.

## Закони Кірхгофа

Перший закон Кірхгофа говорить: алгебраїчна сума струмів, що сходяться у вузлі, дорівнює 0.

При цьому струми, що приходять до вузла, беруться зі знаком «+», що йдуть від вузла - зі знаком «-».

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0 \quad (1.10)$$

Другий закон Кірхгофа свідчить: у всякому замкнутому контурі алгебраїчна сума ЕРС джерел дорівнює алгебраїчній сумі падінь напруги уздовж цього ж контура.

$$\sum_{k=1}^n E_k = \sum_{p=1}^m I_p \cdot r_p, \quad (1.11)$$

де  $n$  - число кола;

$E_k$  - ЕРС  $k$ -й гілки;

$m$  - число незалежних контурів (зазвичай  $n \neq m$ );

$I_p$  - контурний струм;

$r_p$  - контурне опір.

## 1.2 Методи розрахунку складного кола постійного струму

### 1) Застосування законів Кірхгофа

Число рівнянь, які можна скласти на підставі законів Кірхгофа, дорівнює кількості невідомих струмів, що дорівнює числу гілок схеми. Якщо позначити число вузлів у схемі  $q$ , а число гілок  $p$ , то по 1-му закону Кірхгофа складають  $q-1$  рівнянь, а відсутню кількість рівнянь  $p-(q-1)$  становлять по 2-му закону Кірхгофа.

Примітка: При застосуванні 2-го закону Кірхгофа задаються умовно-позитивним напрямком обходу контуру (зазвичай за годинниковою стрілкою) і зіставляють з ним напрямки струмів гілок, узятих довільно, і напрями ЕРС.

### 2) Метод контурних струмів

Метод контурних струмів заснований на застосуванні 2-го закону Кірхгофа і дозволяє знизити порядок системи лінійних рівнянь, в чому і полягає його перевага. Для кола, яке містить  $n$  незалежних контурів, отримують систему рівнянь

$$\begin{aligned} I_1 \cdot r_{11} + I_2 \cdot r_{12} + \dots + I_n \cdot r_{1n} &= E_{11} \\ I_1 \cdot r_{21} + I_2 \cdot r_{22} + \dots + I_n \cdot r_{2n} &= E_{22} \\ \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots & \\ \dots \quad \dots & \\ I_1 \cdot r_{n1} + I_2 \cdot r_{n2} + \dots + I_n \cdot r_{nn} &= E_{nn} \end{aligned} \tag{1.12}$$

де  $I_n$  – невідомий струм  $n$ -го контуру;

$r_{nn}$  – опір контуру, рівний сумі опорів всіх гілок струм  $n$ -го контуру;

$r_{kn}$  – суміжний опір двох сусідніх контурів; приймається додатнім ( $r_{kn} > 0$ ), якщо напрямки контурних струмів збігаються, в іншому випадку  $r_{kn}$  приймається від'ємним ( $r_{kn} < 0$ );

$E_{nn}$  – алгебраїчна сума ЕРС джерел з урахуванням їх напрямків по відношенню до напрямку обходу контуру.

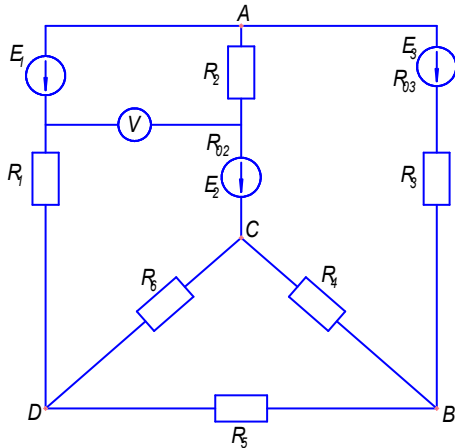
Примітка: напрямки контурного струму приймають зазвичай збіжним з напрямком обходу контуру, напрямки струмів гілок задаються довільно.

### 3) Метод вузлового напруги

Для складного електричного кола, що має два вузли, спочатку визначають вузлову напругу  $U_{AB}$  (1.9), а потім при заданих ЕРС джерел і провідностей гілок визначають струми гілок у відповідності з (1.8).

## Приклад:

Задана схема електричного кола (рис. 1):



Параметри кола:

$$R_1 = 3 \text{ Ом} ; R_2 = 4 \text{ Ом} ; R_3 = 2 \text{ Ом} ;$$

$$R_4 = 1 \text{ Ом} ; R_5 = 5 \text{ Ом} ; R_6 = 1 \text{ Ом} .$$

ЕРС джерел:

$$E_1 = 30 \text{ В} ; E_2 = 9 \text{ В} ; E_3 = 24 \text{ В} .$$

Внутрішні опори джерел:

$$R_{02} = 0,8 \text{ Ом} ; R_{03} = 0,8 \text{ Ом} .$$

Рис.1 - Вихідна розрахункова схема

### 1. Розрахунок кола за законами Кірхгофа

Складемо систему визначення струмів за У заданого кола (рис. 2)  $n = 4 (A, \hat{A}, \hat{N}, D)$ , число гілок число невідомих струмів - 6:  $I_1; I_2; I_3; I_4; I_5; I_6$ . Отже, законами Кірхгофа 6 лікількістю невідомих

Спочатку довільно струмів у гілках і на- контурів за годиннико- Покажемо ці напрями

За I-м законом

складаємо число рівнянь. Відсутню кількість рівнянь зівставимо за II-м законом.

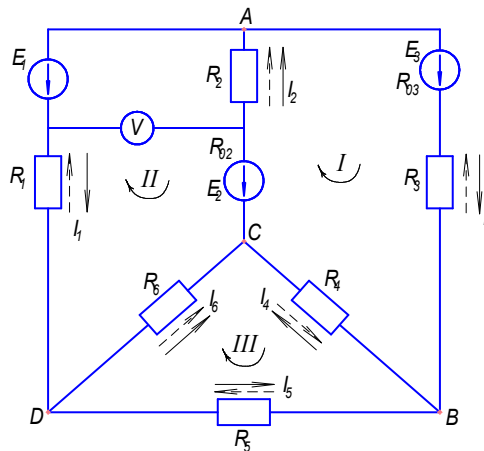


Рис.2 - Розрахункова схема (метод законів Кірхгофа)

рівнянь для законами Кірхгофа. число вузлів  $m = 6$ , таким чином, дорівнює числу гілок необхідно скласти за нійних рівнянь за струмів. задаємося напрямком правлінням обходу вою стрілкою. на схемі.

Кірхгофа у вузлі

вузол А:  $I_1 + I_2 + I_3 = 0$

вузол С:  $-I_2 - I_4 + I_6 = 0$

вузол D:  $-I_1 + I_5 - I_6 = 0$

контур I:  $I_2 \cdot (R_{02} + R_2) - I_3 \cdot (R_{03} + R_3) - I_4 \cdot R_4 = -E_2 + E_3$

контур II:  $I_1 \cdot R_1 - I_2 \cdot (R_{02} + R_2) - I_6 \cdot R_6 = -E_1 + E_2$

контур III:  $I_4 \cdot R_4 + I_5 \cdot R_5 + I_6 \cdot R_6 = 0$

При складанні рівнянь за I-м законом Кірхгофа струм, спрямований до вузла, узят зі знаком «+», від вузла - зі знаком «-».

При складанні рівнянь за II-му закону Кірхгофа зі знаком «+» приймають ЕРС і падіння напруги, якщо напрямки ЕРС і струму в гілці збігаються з напрямком обходу контуру.

Підставивши вихідні дані у рівняння, отримаємо систему з 6 рівнянь:

$$\begin{cases} I_1 + I_2 + I_3 = 0 \\ -I_2 - I_4 + I_6 = 0 \\ -I_1 + I_5 - I_6 = 0 \\ 4,8I_2 - 2,8I_3 - I_4 = 15 \\ 3I_1 - 4,8I_2 - I_6 = -21 \\ I_4 + 5I_5 + I_6 = 0 \end{cases}$$

Для розв'язання рівнянь складемо два матриці  $A = (6 \times 6)$  та  $B = (1 \times 6)$ . Матриця  $A$  складається з коефіцієнтів при невідомих токах. Матриця  $B$  складається з вільних членів.

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 4,8 & -2,8 & -1 & 0 & 0 \\ 3 & -4,8 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 5 & 1 \end{pmatrix} \quad \hat{A} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 15 \\ -21 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Потім за формулою вирішуємо:

$$\tilde{N} = \hat{A}^{-1} \cdot \hat{A}$$

де матриця  $\hat{A}^{-1}$  - матриця зворотна матриці  $A$ ;

матриця  $\tilde{N}$  - матриця, що складається з невідомих струмів.

$$\tilde{N} = \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{pmatrix} \quad \begin{array}{l} \text{Якщо в результаті рішення системи рівнянь отримано позитивне} \\ \text{значення струму, то це свідчить про те, що обрана та дійсне на-правління} \\ \text{струму збігаються. При негативному значенні струму необхідно на схемі} \\ \text{змінити його обраний напрямок на протилежне.} \\ \text{У результаті рішення отримаємо значення струмів:} \end{array}$$

$$I_1 = -2,121 \text{ A}$$

$$I_4 = -0,761 \text{ A}$$

$$I_2 = 2,655 \text{ A}$$

$$I_5 = -0,227 \text{ A}$$

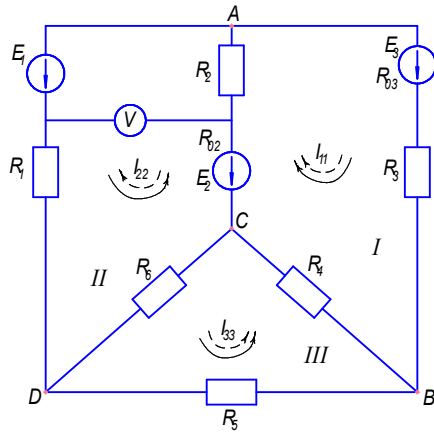
$$I_3 = -0,534 \text{ A}$$

$$I_6 = 1,894 \text{ A}$$

Напрямок струмів  $I_1; I_3; I_4; I_5$  міняємо на протилежне.

## 2. Розрахунок кола за методом контурних струмів

Виділимо три замкнутих контури в заданому колі (рис. 1). На рис. 3 вони позначаються цифрами I, II, III.



Вважаємо, що в кожному контурі діють свої контурні струми:  $I_{11}; I_{22}; I_{33}$ , тобто струми, що протікають по всіх гілках свого контуру. Задамося довільно напрямком контурних струмів. Для їх визначення складаємо для кожного контуру рівняння за II-м законом Кірхгофа:

Рис. 3 - Розрахункова схема (метод контурних струмів)

$$\text{контур I: } I_{11} \cdot (R_{03} + R_3 + R_{02} + R_2 + R_4) - I_{22} \cdot (R_{02} + R_2) + I_{33} \cdot R_4 = -E_2 + E_3$$

$$\text{контур II: } -I_{11} \cdot (R_{02} + R_2) + I_{22} \cdot (R_{02} + R_2 + R_6 + R_1) + I_{33} \cdot R_6 = -E_1 + E$$

$$\text{контур III: } I_{11} \cdot R_4 + I_{22} \cdot R_6 + I_{33} \cdot (R_6 + R_4 + R_5) = 0$$

Підставимо вихідні дані:

$$\begin{cases} 8,6I_{11} - 4,8I_{22} + I_3 = 15 \\ -4,8I_{11} + 8,8I_{22} + I_{33} = -21 \\ I_{11} + I_{22} + 7I_{33} = 0 \end{cases}$$

Для розв'язання рівнянь складемо два матриці  $A = (3 \times 3)$  і  $B = (1 \times 3)$ . Матриця  $A$  складається з коефіцієнтів при невідомих токах. Матриця  $B$  складається з вільних членів.

$$A = \begin{pmatrix} 8,6 & -4,8 & 1 \\ -4,8 & 8,8 & 1 \\ 1 & 1 & 7 \end{pmatrix} \quad \hat{A} = \begin{pmatrix} 15 \\ -21 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Потім за формулою вирішуємо:

$$\tilde{N} = \hat{A}^{-1} \cdot \hat{A}$$

де матриця  $\hat{A}^{-1}$  - матриця зворотна матриці  $A$ ;

матриця  $\tilde{N}$  - матриця, що складається з невідомих струмів.

$$\tilde{N} = \begin{pmatrix} I_{11} \\ I_{22} \\ I_{33} \end{pmatrix} \quad \begin{array}{l} \text{У результаті рішення отримаємо зна-} \\ \text{чення струмів:} \\ I_{11} = 0,534 \text{ А} \\ I_{22} = -2,121 \text{ А} \\ I_{33} = 0,227 \text{ А} \end{array}$$

Напрямок струму  $I_{22}$  міняємо на протилежне. Визначимо струми гілок.

Токи зовнішніх гілок заданої схеми є контурні струми, так як у гілках може протікати тільки один струм. Таким чином:

$$I_3 = I_{11} = 0,534 \text{ А}$$

$$I_1 = I_{22} = -2,121 \text{ А}$$

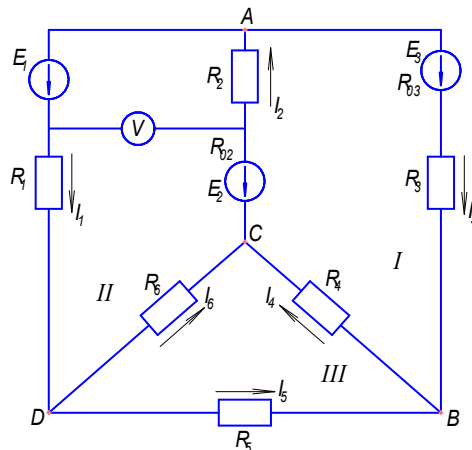
$$I_5 = I_{33} = 0,227 \text{ А}$$

Токи суміжні гілок - це двох контурних струмів, Якщо контурні струми сторону, то їх додають і сторону. Якщо контурні різні сторони, то від бі- менший та направляють у

$$I_2 = I_{11} + I_{22} = 0,534 + 2,121 = 2,655 \text{ А}$$

$$I_4 = I_{11} + I_{33} = 0,534 + 0,227 = 0,761 \text{ А}$$

$$I_6 = I_{22} - I_{33} = 2,121 - 0,227 = 1,894 \text{ А}$$



різниця або сума про-тека по гілках. спрямовані в одну направляють в ту ж струми спрямовані в льшого віднімають бік більшого.



Зазначимо дійсний напруг (рис. 4):

струмів гілок

3. Розрахунок кола за методом

Рис.4 - Розрахункова схема (дійсний напруг струмів)

вузлового напруги

Застосування вузлової наявність в розрахунковій схемі тільки двох вузлів. Для цього у вихідній схемі (рис. 1) трикутник опорів CBD замінимо еквівалентної зіркою (рис. 5). Після перетворень розрахункова схема буде мати вигляд (рис. 6).

напруги передбачає ретворень розрахункова схема буде мати вигляд (рис. 6).

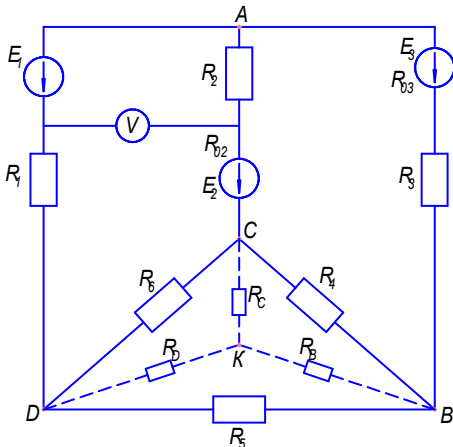


Рис.5 - Заміна трикутника опорів еквівалентної зіркою

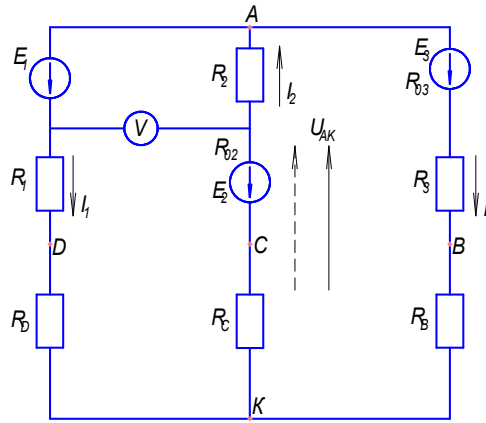


Рис.6 - розрахункова схема (метод двох вузлів)

Опори променів зірки  $R_C; R_B; R_D$  визначаються за виразами:

$$R_C = \frac{R_6 \cdot R_4}{R_4 + R_5 + R_6} = \frac{1 \cdot 1}{1 + 5 + 1} = \frac{1}{7} = 0,143 \hat{i}$$

$$R_B = \frac{R_4 \cdot R_5}{R_4 + R_5 + R_6} = \frac{1 \cdot 5}{1 + 5 + 1} = \frac{5}{7} = 0,714 \hat{i}$$

$$R_D = \frac{R_6 \cdot R_5}{R_4 + R_5 + R_6} = \frac{1 \cdot 5}{1 + 5 + 1} = \frac{5}{7} = 0,714 \hat{i}$$

У перетвореної схемі (рис. 6) між вузлами А і К прикладена вузлова напруга  $U_{AK}$ . Задася довільно його напрямком, наприклад від К до А, і визначимо його величину.

$$U_{AK} = \frac{\sum_{k=1}^n E_k \cdot q_k}{\sum_{k=1}^n q_k} = \frac{E_1 \cdot q_1 + E_2 \cdot q_2 + E_3 \cdot q_3}{q_1 + q_2 + q_3}$$

де -  $E_1 \cdot q_1; E_2 \cdot q_2; E_3 \cdot q_3$  взято зі знаком «+», так як  $E_1; E_2; E_3$  спрямовані зустрічно  $U_{AK}$ .

Спочатку визначимо провідність гілок:

$$q_1 = \frac{1}{R_1 + R_D} = \frac{1}{3 + 0,714} = 0,269$$

$$q_2 = \frac{1}{R_2 + R_{02} + R_C} = \frac{1}{4 + 0,8 + 0,143} = 0,202$$

$$q_3 = \frac{1}{R_{03} + R_3 + R_B} = \frac{1}{0,8 + 2 + 0,714} = 0,285$$

Визначаємо:

$$U_{AK} = \frac{E_1 \cdot q_1 + E_2 \cdot q_2 + E_3 \cdot q_3}{q_1 + q_2 + q_3} = \frac{30 \cdot 0,269 + 9 \cdot 0,202 + 24 \cdot 0,285}{0,269 + 0,202 + 0,285} = 22,127 \text{ В}$$

Знак "+" при значенні вузлової напруги вказує на те, що його дійсна напруга направлена в тій же бік, тобто від вузла до вузла К до А.

Визначимо струми гілок.

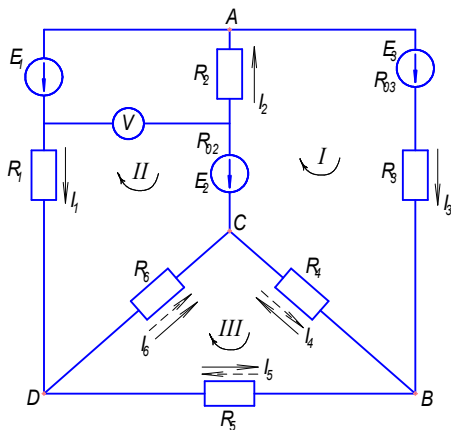
$$I_1 = (E_1 - U_{AK}) \cdot q_1 = (30 - 22,127) \cdot 0,269 = 2,118 \text{ А}$$

$$I_2 = (E_2 - U_{AK}) \cdot q_2 = (9 - 22,127) \cdot 0,202 = -2,652 \text{ А}$$

$$I_3 = (E_3 - U_{AK}) \cdot q_3 = (24 - 22,127) \cdot 0,285 = 0,534 \text{ А}$$

Струм  $I_2$  вийшов зі знаком «-», тому його напрямок треба направити в ту ж сторону що і  $U_{AK}$ .

Знайдені тільки 3 струму заданої схеми:  $I_1 = 2,118 \text{ А}$ ;  $I_2 = -2,652 \text{ А}$ ;  $I_3 = 0,534 \text{ А}$ . Треба знайти струми трикутника CBD, для чого повертаємося до вихідної схеми (рис. 1).



Для визначення струмів  $I_4; I_5; I_6$  трикутника задамося довільно їх напрямком (рис. 7).

Напрямок обходу контуру приймаємо яке збігається з ходом годинникової стрілки.

Для контурів I та II з відомими струмами  $I_1; I_2; I_3$ , застосуємо II закон Кірхгофа.

Рис.7 - Вихідна розрахункова схема

$$\text{контур I: } I_2 \cdot (R_{02} + R_2) + I_3 \cdot (R_{03} + R_3) - I_4 \cdot R_4 = -E_2 + E_3 ;$$

$$\begin{aligned} \text{звідки: } I_4 &= \frac{I_2 \cdot (R_{02} + R_2) + I_3 \cdot (R_{03} + R_3) + E_2 - E_3}{R_4} = \\ &= \frac{2,652 \cdot (0,8 + 4) + 0,534 \cdot (0,8 + 2) + 9 - 24}{1} = -0,775 \text{ А} \end{aligned}$$

Знак «-» струму вказує на те, що дійсний напрямок струму протилежно прийнятому.

$$\text{контур II: } -I_1 \cdot R_1 - I_2 \cdot (R_{02} + R_2) - I_6 \cdot R_6 = -E_1 + E_2 ;$$

$$\begin{aligned} \text{звідки: } I_6 &= \frac{-I_1 \cdot R_1 - I_2 \cdot (R_{02} + R_2) + E_1 - E_2}{R_6} = \\ &= \frac{-2,118 \cdot 3 - 2,652 \cdot (0,8 + 4) + 30 - 9}{R_6} = 1,916 \text{ A} \end{aligned}$$

Так як значення  $I_6$  позитивно, то напрямок  $I_6$  збігається з прийнятим.

Струм  $I_5$  знайдемо за I-м законом Кірхгофа. Для вузла D маємо:

$$I_1 + I_5 - I_6 = 0$$

$$\text{звідки: } I_5 = I_6 - I_1 = 1,916 - 2,118 = -0,202 \text{ A}$$

Знак «-» струму  $I_5$  вказує на те, що дійсний напрямок струму  $I_5$  протилежно прийнятому.

Зіставляючи значення струмів, отримані за методом вузлової напруги з розрахунками за методом контурних струмів, приходимо до висновку, що розрахунок проведений вірно.

Метод	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$I_4$	$I_5$	$I_6$
Кірхгофа	2,121	2,655	0,534	0,761	0,227	1,894
конт. струмів	2,121	2,655	0,534	0,761	0,227	1,894
двох вузлів	2,118	2,652	0,534	0,775	0,202	1,916

#### 4. Баланс потужності ланцюга

Баланс потужності ланцюга визначається за виразом:

$$\sum P_{\text{ен}} = \sum P_{\text{від}}$$

Перш ніж скласти баланс потужності, порівняємо напрям ЕРС і струмів гілок. Неважко бачити, що напрями  $E_1$  і  $I_1$ ,  $E_3$  і  $I_3$  збігаються, отже, джерела  $E_1$  та  $E_3$  працюють в генераторному режимі.

$$\sum P_{\text{ен}} = E_1 \cdot I_1 + E_3 \cdot I_3 - E_2 \cdot I_2 = 30 \cdot 2,121 + 24 \cdot 0,534 - 9 \cdot 2,655 = 52,551 \text{ A} \cdot \text{В}$$

Визначаємо сумарну потужність споживачів:

$$\begin{aligned} \sum P_{\text{від}} &= I_1^2 \cdot R_1 + I_2^2 \cdot (R_{02} + R_2) + I_3^2 \cdot (R_3 + R_{03}) + I_4^2 \cdot R_4 + I_5^2 \cdot R_5 + I_6^2 \cdot R_6 = \\ &= 2,121^2 \cdot 3 + 2,655^2 \cdot (0,8 + 4) + 0,534^2 \cdot (2 + 0,8) + 0,761^2 \cdot 1 + 0,227^2 \cdot 5 + 1,894^2 \cdot 1 = \\ &= 52,554 \text{ A} \cdot \text{В} \end{aligned}$$

Отримаємо  $\sum P_{\text{ен}} \approx \sum P_{\text{від}}$ , отже, величини напрямків струмів у гілках визначені правильно. Похибка при вимірах дорівнює:

$$\Delta = \frac{P_{\text{від}} - P_{\text{ен}}}{P_{\text{від}}} \cdot 100\% = \frac{52,554 - 52,551}{52,554} \cdot 100\% = 0,006\% < 5\%$$

#### 5. Побудова потенційної діаграми



варіан-	рису-												
тв	нка												
0	1.1	22	24	10	0,2	-	1,2	2	1	8	4	10	6
1	1.2	55	18	4	0,8	-	0,8	8	4	3	2	4	4
2	1.3	36	10	25	-	0,4	0,5	4	8	3	1	2	7
3	1.4	16	5	32	-	0,6	0,8	9	3	2	4	1	5
4	1.5	14	25	28	0,9	1,2	-	5	2	8	2	2	6
5	1.1	20	22	9	0,1	-	1,1	1	2	6	3	8	4
6	1.6	5	16	30	0,4	-	0,7	6	4	3	2	5	3
7	1.7	10	6	24	0,8	0,3	-	3,5	5	6	6	3	1
8	1.8	6	20	4	-	0,8	1,2	4	6	4	4	3	3
9	1.9	21	4	10	-	0,2	0,6	5	7	2	8	1	1

Продовження таблиці 1

Номер													
варіан-	рису-	E <sub>1</sub> , В	E <sub>2</sub> , В	E <sub>3</sub> , В	R <sub>01</sub> , Ом	R <sub>02</sub> , Ом	R <sub>03</sub> , Ом	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
тв	нка												
10	1.10	4	9	18	0,8	-	0,7	2,7	10	4	8	10	2
11	1.11	4	24	6	0,9	-	0,5	9	8	1	6	10	4
12	1.12	16	8	9	0,2	0,6	-	2,5	6	6	5	10	5
13	1.13	48	12	6	0,8	1,4	-	4,2	4	2	12	6	2
14	1.14	12	36	12	-	0,4	1,2	3,5	5	1	5	6	9
15	1.15	12	6	40	1,2	0,6	-	2	3	8	5	7	8
16	1.16	8	6	36	1,3	-	1,2	3	2	1	6	8	6
17	1.17	72	12	4	0,7	1,5	-	6	1	10	4	12	4
18	1.18	12	48	6	-	0,4	0,4	2,5	1	4	15	2	2
19	1.19	12	30	9	0,5	-	0,5	3,5	2	3	3	1	3
20	1.20	9	6	27	-	1,0	0,8	4,5	2	8	13	4	3
21	1.21	15	63	6	1,0	-	1,2	5	3	1	2	12	3
22	1.22	54	17	3	1,2	0,9	-	8	3	1	4	2	2
23	1.23	30	9	24	-	0,8	0,8	3	4	2	1	5	1
24	1.24	3	66	9	-	0,7	1,2	1	4	2	2	7	3
25	1.25	12	33	25	1,0	0,4	-	1	5	1	1	6	4
26	1.26	30	16	10	0,6	0,8	-	2	5	3	1	8	5
27	1.27	10	32	10	0,6	-	0,1	1,5	6	1	7	1	5
28	1.28	5	10	36	0,3	-	0,8	1,2	6	3	2	2	2
29	1.29	40	25	8	-	0,2	0,2	3	3	2	4	3	2
30	1.30	8	40	10	0,8	1,0	-	5	3	3	3	2	1
31	1.31	22	24	10	0,2	-	1,2	2	1	8	4	10	6
32	1.32	55	18	4	0,8	-	0,8	8	4	3	2	4	4
33	1.33	36	10	25	-	0,4	0,5	4	8	3	1	2	7
34	1.34	16	5	32	-	0,6	0,8	9	3	2	4	1	5
35	1.35	14	25	28	0,9	1,2	-	5	2	8	2	2	6

36	1.36	5	16	30	0,4	-	0,7	6	4	3	2	5	3
37	1.37	10	6	24	0,8	0,3	-	3,5	5	6	6	3	1
38	1.38	6	20	4	-	0,8	1,2	4	6	4	4	3	3
39	1.39	21	4	10	-	0,2	0,6	5	7	2	8	1	1
40	1.40	4	9	18	0,8	-	0,7	2,7	10	4	8	10	2
41	1.41	4	24	6	0,9	-	0,5	9	8	1	6	10	4

Продовження таблиці 1

Номер		E <sub>1, В</sub>	E <sub>2, В</sub>	E <sub>3, В</sub>	R <sub>01, Ом</sub>	R <sub>02, Ом</sub>	R <sub>03, Ом</sub>	R <sub>1, Ом</sub>	R <sub>2, Ом</sub>	R <sub>3, Ом</sub>	R <sub>4, Ом</sub>	R <sub>5, Ом</sub>	R <sub>6, Ом</sub>
варіан-	рисунок												
42	1.42	16	8	9	0,2	0,6	-	2,5	6	6	5	10	5
43	1.43	48	12	6	0,8	1,4	-	4,2	4	2	12	6	2
44	1.44	12	36	12	-	0,4	1,2	3,5	5	1	5	6	9
45	1.45	12	6	40	1,2	0,6	-	2	3	8	5	7	8
46	1.46	8	6	36	1,3	-	1,2	3	2	1	6	8	6
47	1.47	72	12	4	0,7	1,5	-	6	1	10	4	12	4
48	1.48	12	48	6	-	0,4	0,4	2,5	1	4	15	2	2
49	1.49	12	30	9	0,5	-	0,5	3,5	2	3	3	1	3
50	1.50	9	6	27	-	1,0	0,8	4,5	2	8	13	4	3
51	1.51	12	14	20	0,4	-	0,7	5	3	2	4	2	4
52	1.52	64	37	13	1,2	0,8	-	10	4	2	4	3	3
53	1.53	46	19	35	-	0,8	0,8	4	5	3	3	7	2
54	1.54	13	45	29	-	0,7	1,2	2	6	3	2	5	3
55	1.55	22	40	35	1,2	0,6	-	2	6	2	2	8	5
56	1.56	41	26	20	0,7	0,9	-	3	6	4	2	13	5
57	1.57	20	42	20	0,6	-	1,2	2	7	2	8	2	6
58	1.58	15	20	46	0,4	-	0,8	4	6	2	3	3	4
59	1.59	50	35	18	-	0,4	0,4	4	4	2	5	2	3
60	1.60	18	50	20	0,8	1,3	-	6	4	4	4	3	4
61	1.61	25	50	12	0,5	-	0,6	2	8	3	5	10	5
62	1.62	15	28	34	0,3	-	0,5	4	6	8	12	14	14
63	1.63	30	17	22	-	0,7	0,8	5	8	4	5	5	10
64	1.64	26	15	42	-	1,2	0,8	10	4	3	5	2	3
65	1.65	24	35	38	1,0	1,4	-	6	3	9	10	3	7
66	1.66	15	26	40	0,5	-	0,8	7	5	4	3	6	11
67	1.67	20	16	34	0,8	0,3	-	5	6	8	8	5	8
68	1.68	16	30	14	-	0,7	1,1	5	7	5	6	5	5
69	1.69	31	14	20	-	0,4	0,8	6	8	3	9	3	3
70	1.70	14	20	28	0,7	-	0,9	10	6	8	8	12	5
71	1.71	16	34	18	0,5	-	0,7	9	6	3	4	10	6
72	1.72	26	18	19	0,6	0,4	-	3	7	7	6	8	6
73	1.73	58	22	16	1,4	0,8	-	5	5	4	12	6	4

Продовження таблиці 1

Номер		Е <sub>1</sub> , В	Е <sub>2</sub> , В	Е <sub>3</sub> , В	R <sub>01</sub> , Ом	R <sub>02</sub> , Ом	R <sub>03</sub> , Ом	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
варіан-	рисунок												
74	1.74	22	46	22	-	0,6	1,3	4	66	2	6	4	10
75	1.75	22	16	50	1,2	0,4	-	3	4	9	3	8	9
76	1.76	18	16	36	0,7	-	0,6	4	3	8	4	9	7
77	1.77	62	22	14	1,5	0,7	-	8	2	10	2	12	6
78	1.78	22	48	16	-	1,2	0,6	3	2	5	15	2	3
79	1.79	22	40	19	0,5	-	0,5	4	3	4	4	2	4
80	1.80	19	16	37	-	1,1	0,6	7	3	9	11	5	4
81	1.81	44	27	13	1,3	0,9	-	8	2	4	2	6	2
82	1.82	6	14	8	0,3	-	0,5	5	3	2	14	8	8
83	1.83	25	36	50	1,2	-	0,9	8	6	5	8	7	5
84	1.84	8	20	12	0,3	-	0,4	3	2	3	5	2	3
85	1.85	32	45	62	0,8	-	1,3	9	5	8	5	3	12
86	1.86	35	46	60	1,3	-	1,1	6	5	8	6	6	8
87	1.87	16	24	30	0,4	-	0,8	3	6	7	4	6	10
88	1.88	35	40	56	0,3	-	0,9	3	8	5	4	12	4
89	1.89	60	45	28	-	0,6	0,6	5	6	4	7	9	4
90	1.90	11	15	25	-	0,4	0,6	4	6	3	6	2	4
91	1.91	23	36	18	0,8	-	1,2	3	9	4	5	9	6
92	1.92	42	60	39	1,1	-	1,3	4	5	5	6	3	6
93	1.93	25	30	46	0,3	-	0,8	2	8	5	6	7	7
94	1.94	7	31	17	-	0,9	0,6	4	5	2	5	4	7
95	1.95	29	26	47	-	0,9	1,3	5	4	10	15	6	4
96	1.96	74	47	33	1,4	1,2	-	12	7	5	4	8	8
97	1.97	30	52	30	0,6	-	1,4	7	10	6	9	6	5
98	1.98	24	44	36	0,9	-	1,2	12	10	4	4	4	2
99	1.99	4	15	18	0,2	0,6	-	3	2	6	3	3	4
100	1.100	28	26	46	1,2	-	1,3	6	4	2	8	9	3

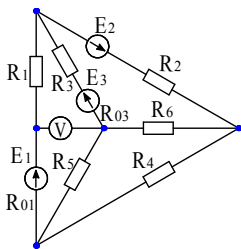


Рис. 1.1

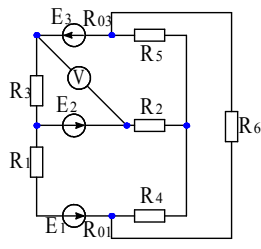


Рис. 1.2

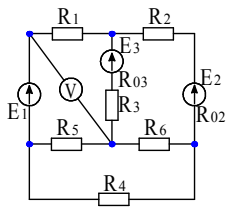


Рис. 1.3

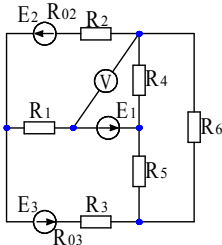


Рис. 1.4

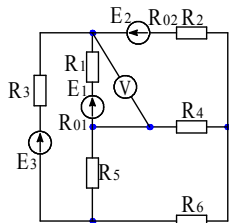


Рис. 1.5

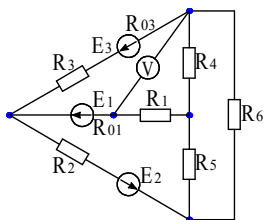


Рис. 1.6

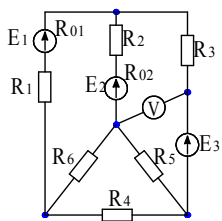


Рис. 1.7

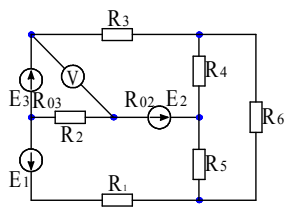


Рис. 1.8



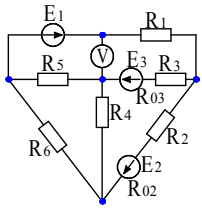


Рис. 1.9

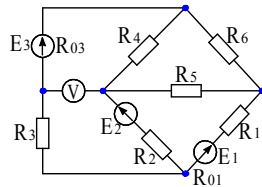


Рис. 1.10

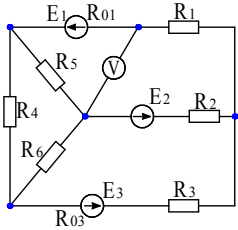


Рис. 1.11

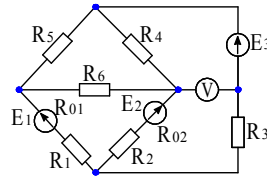


Рис. 1.12

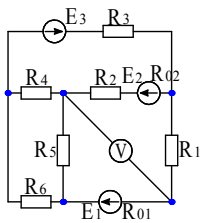


Рис. 1.13

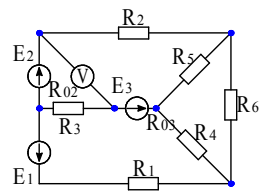


Рис. 1.14

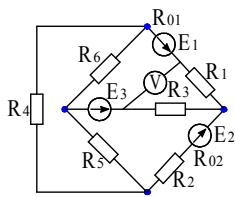


Рис. 1.15

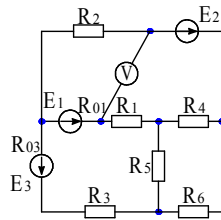


Рис. 1.16

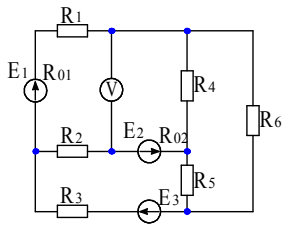


Рис. 1.17

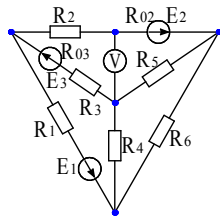


Рис. 1.18

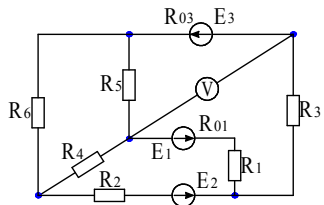


Рис. 1.19

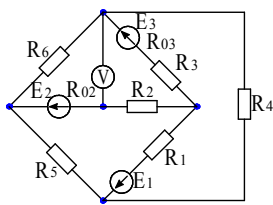


Рис. 1.20

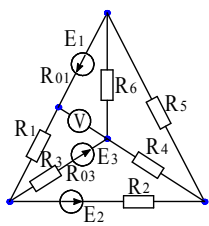


Рис. 1.21

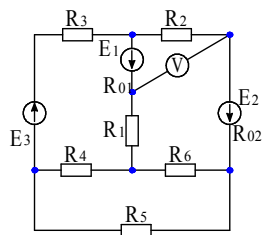


Рис. 1.22

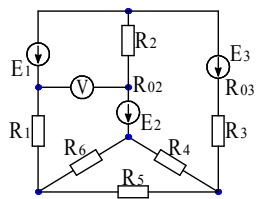


Рис. 1.23

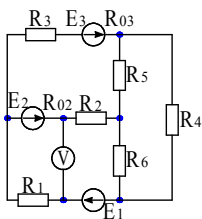


Рис. 1.24

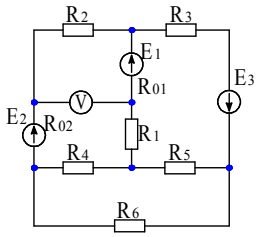


Рис. 1.25

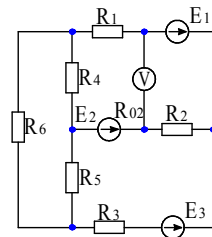


Рис. 1.26

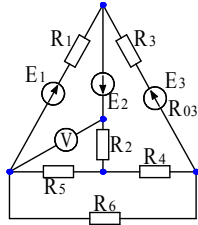


Рис. 1.27

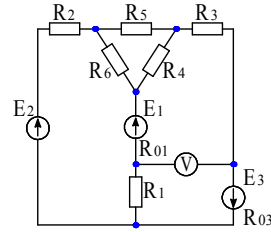


Рис. 1.28

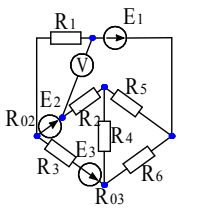


Рис. 1.29

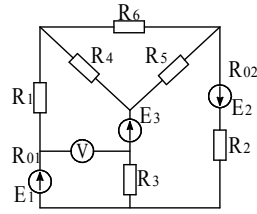


Рис. 1.30

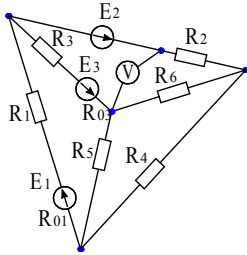


Рис. 1.31

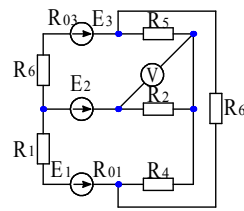


Рис. 1.32

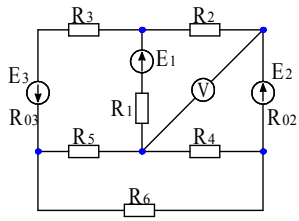


Рис. 1.33

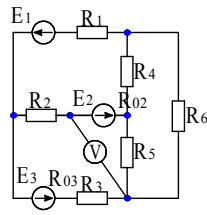


Рис. 1.34

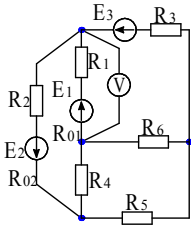


Рис. 1.35

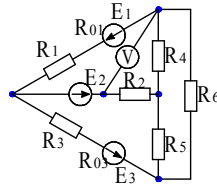


Рис. 1.36

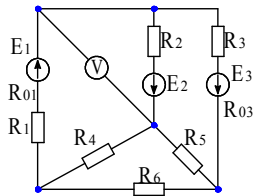


Рис. 1.37

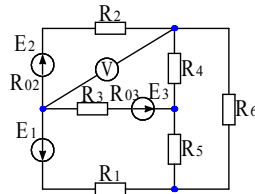


Рис. 1.38

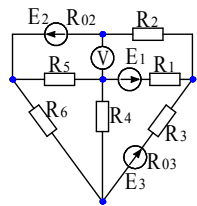


Рис. 1.39

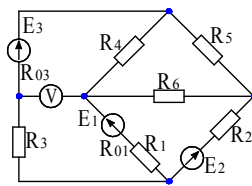


Рис. 1.40

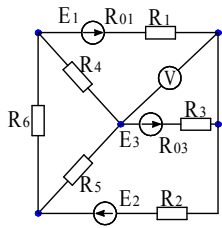


Рис. 1.41

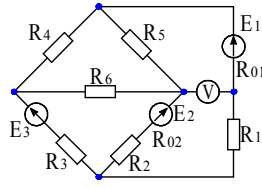


Рис. 1.42

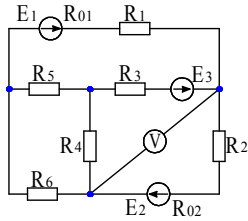


Рис. 1.43

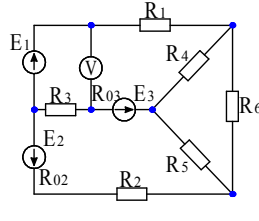


Рис. 1.44

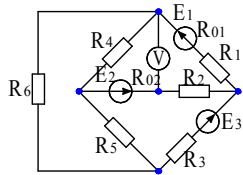


Рис. 1.45

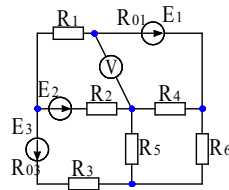


Рис. 1.46

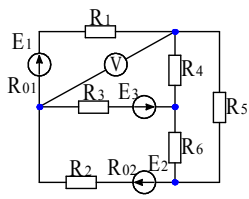


Рис. 1.47

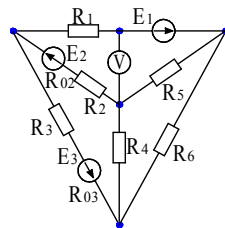


Рис. 1.48

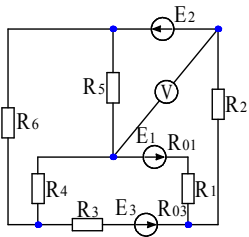


Рис. 1.49

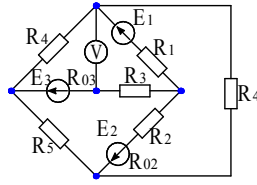


Рис. 1.50

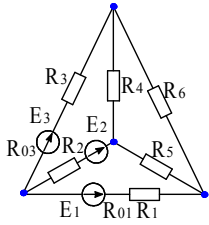


Рис. 1.51

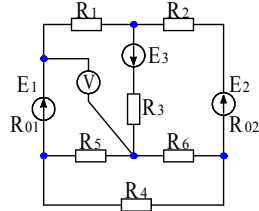


Рис. 1.52

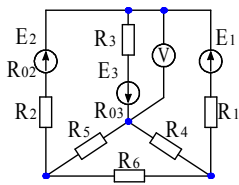


Рис. 1.53

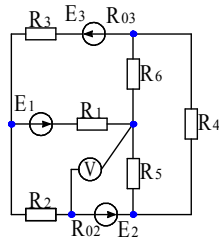


Рис. 1.54

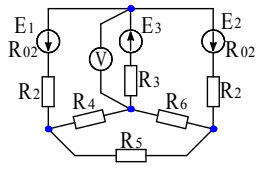


Рис. 1.55

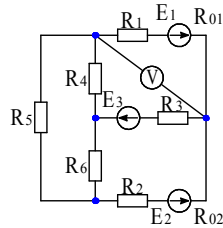


Рис. 1.56

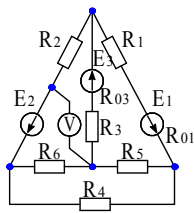


Рис. 1.57

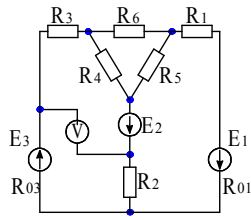


Рис. 1.58

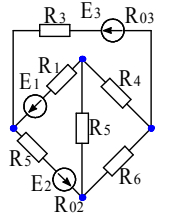


Рис. 1.59

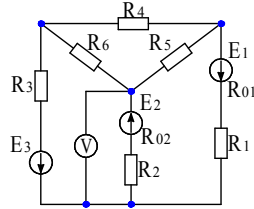


Рис. 1.60

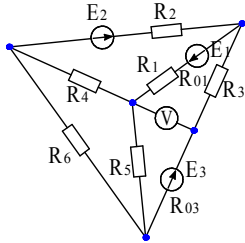


Рис. 1.61

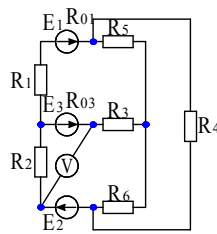


Рис. 1.62

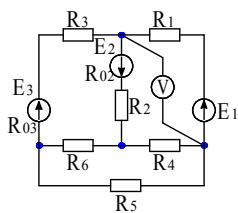


Рис. 1.63

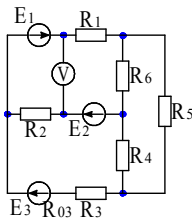


Рис. 1.64

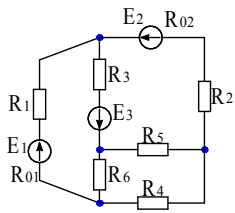


Рис. 1.65

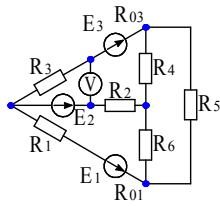


Рис. 1.66

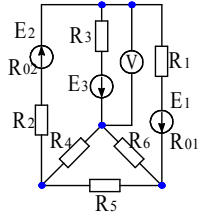


Рис. 1.67

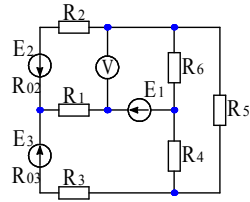


Рис. 1.68

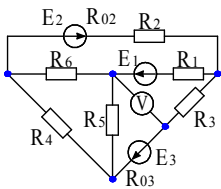


Рис. 1.69

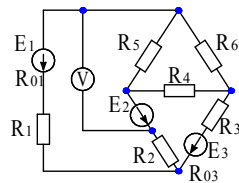


Рис. 1.70

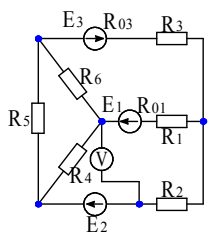


Рис. 1.71

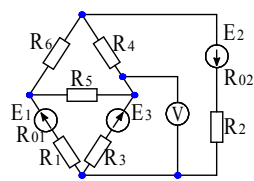


Рис. 1.72



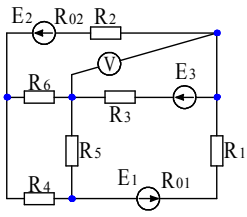


Рис. 1.73

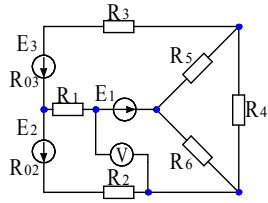


Рис. 1.74

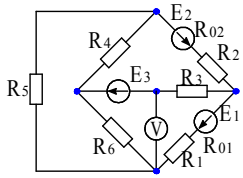


Рис. 1.75

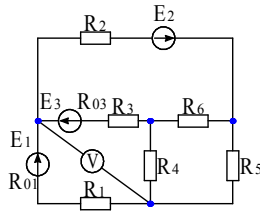


Рис. 1.76

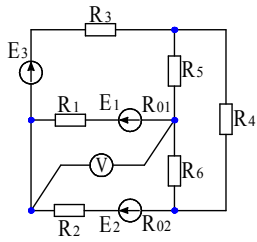


Рис. 1.77

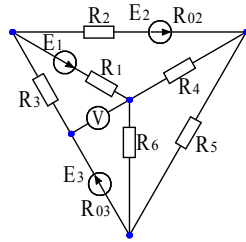


Рис. 1.78

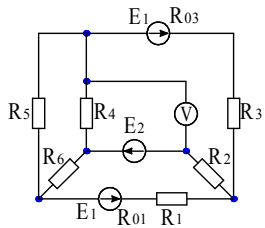


Рис. 1.79

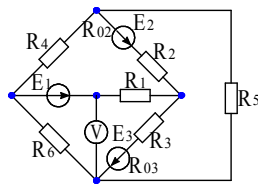


Рис. 1.80

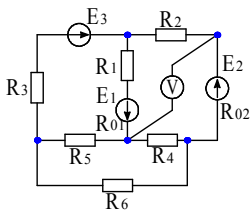


Рис. 1.81

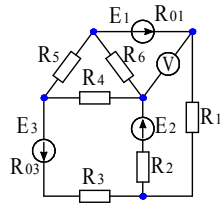


Рис. 1.82

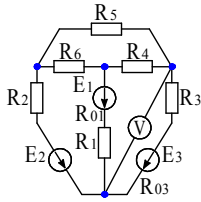


Рис. 1.83

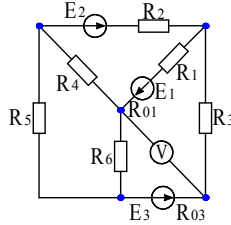


Рис. 1.84

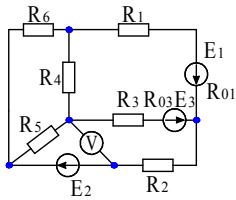


Рис. 1.85

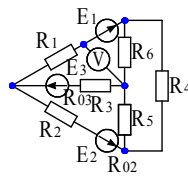


Рис. 1.86

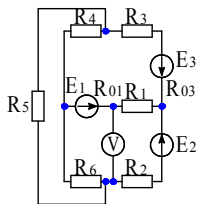


Рис. 1.87

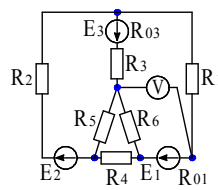


Рис. 1.88

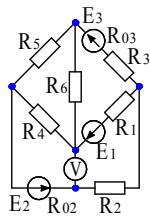


Рис. 1.89

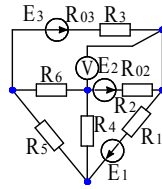


Рис. 1.90

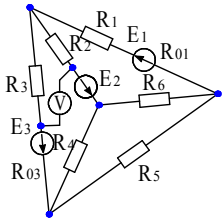


Рис. 1.91

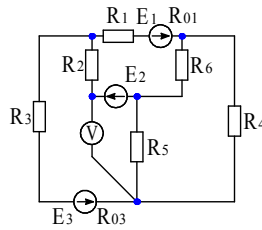


Рис. 1.92

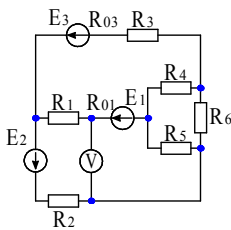


Рис. 1.93

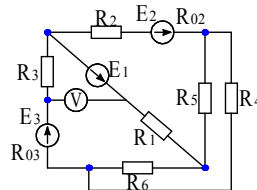


Рис. 1.94

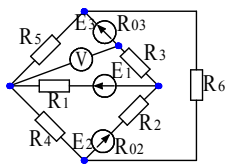


Рис. 1.95

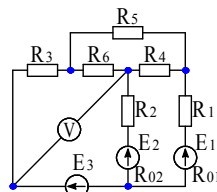


Рис. 1.96

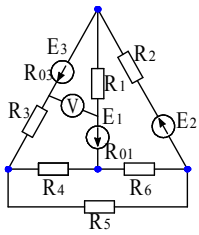


Рис. 1.97

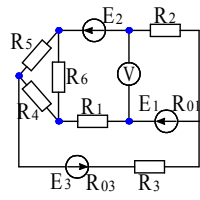


Рис. 1.98

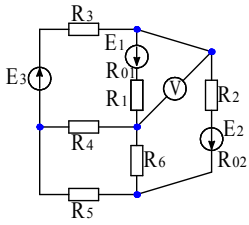


Рис. 1.99

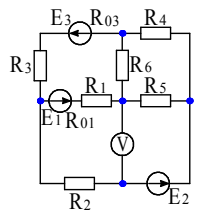


Рис. 1.100

## ЗАДАЧА 2. Розрахунок електричного кола змінного струму

Для заданої схеми електричного кола потрібно визначити:

1. Струми в гілках кола.
2. Напруги на окремих ділянках кола.
3. Потужності: повну, активну, реактивну всього ланцюга і скласти баланс.
4. Побудувати в масштабі на комплексній площині векторну діаграму напруг і струмів.

### 2.1 Короткі відомості з теорії електричного кола змінного струму

Електричним колом змінного струму називається коло, що містить елементи R, L, C і включена на джерело (зазвичай синусоїдальної) напруги U.

#### 1) Резистивне коло

Діючі в колі струми і напруги звичайно виражають у комплексній формі:

$$\dot{U} = U \cdot e^{j\varphi U}; \quad \dot{I} = I \cdot e^{j\varphi I}; \quad (2.1)$$

де U, I – відповідно модулі напруги, струму;  
 $\varphi_U = \varphi_I = \varphi$  – кути початкових фаз напруги, струму.

Закон Ома в комплексній формі може бути представлений у вигляді виразу:

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{Z} = \frac{\dot{U}}{R} \quad (2.2)$$

Резистивне коло споживає лише активну потужність P:

$$\tilde{S} = \dot{U} \cdot \dot{I}^* = U e^{j\varphi_U} \cdot I e^{-j\varphi_I} = U \cdot I = P \quad (2.3)$$

де  $P = U \cdot I$  – активна потужність, Вт;  
 $\tilde{S}$  – повна потужність, ВА.

#### 2) Коло з індуктивністю

Для кола з індуктивним опором  $X_L = 2\pi \cdot f \cdot L$

$$\dot{I} = I \cdot e^{j\psi I} \quad (2.4)$$

$$\dot{U} = U e^{j(\psi I + \pi/2)} = j U \cdot e^{j\psi U}$$

де  $\psi_I$  – кут початкової фази струму;  
 $\psi_U = \psi_I + \pi/2$  – кут початкової фази напруги.

Струм у колі визначається виразом:

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{j \cdot X_L} \quad (2.5)$$

Коло з індуктивністю обмінюється з джерелом реактивно-індуктивною потужністю  $Q_L$ :

$$\tilde{S} = \dot{U} \cdot \dot{I}^* = U \cdot e^{j(\varphi_I + \pi/2)} \cdot I \cdot e^{-j\varphi_I} = U \cdot I \cdot e^{-j\varphi_I} = jU \cdot I = jQ_L \quad (2.6)$$

де  $Q_L = U \cdot I = X_L \cdot I^2$  - реактивна індуктивна потужність, вар

### 3) Коло з ємкістю

Для кола з ємкістю справедливі вирази:

$$\dot{I} = I \cdot e^{j\varphi_I}; \quad \dot{U} = U \cdot e^{j(\varphi_U - \pi/2)} = -jU \cdot e^{j\varphi_U} \quad (2.7)$$

де  $\varphi_U = \varphi_I - \pi/2$  - кут початкової фази напруги.

$$\text{Струм у колі} \quad \dot{I} = \frac{\dot{U}}{-j X_C} \quad (2.8)$$

Вираз (8) - закон Ома у комплексній формі для кола з ємкістю, де  $-j X_C = -j \frac{1}{\omega C}$  - ємкісний опір в комплексній формі. Коло з ємкістю обмінюється з джерелом тільки реактивно-ємкісною потужністю  $Q_C$ .

$$\tilde{S} = \dot{U} \cdot \dot{I}^* = U \cdot e^{j(\varphi_U - \pi/2)} \cdot I \cdot e^{-j\varphi_U} = U \cdot I \cdot e^{-j\pi/2} = -jU \cdot I = -jQ_C \quad (2.9)$$

де  $Q_C = X_C \cdot I^2$  - реактивна ємкісна потужність, вар.

Відзначимо, що методи розрахунку кола змінного струму засновані на застосуванні законів Ома і Кірхгофа в комплексній формі.

## 2.2 Символічний метод розрахунку кола змінного струму

Закон Ома у символічній формі:

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{Z} = \frac{\dot{U}}{Z e^{j\varphi}} = \frac{\dot{U}}{Z} e^{-j\varphi} = I [\cos(-\varphi) + j \sin(-\varphi)] = I_a - j I_z, \quad (2.10)$$

де  $I_a$  – дійсна частина комплексу струму  $I$ ;  
 $I_z$  – фіктивна частина комплексу струму  $I$ .

Відомо, що  $I = \sqrt{I_a^2 + I_z^2}$

Закони Кірхгофа у символічній формі

$$\text{1-й закон Кірхгофа:} \quad \sum_{k=1}^n I = 0, \quad (2.11)$$

$$\text{2-й закон Кірхгофа:} \quad \sum_{k=1}^n E_k = \sum_{p=1}^m I_p \cdot Z_p, \quad (n \neq m) \quad (2.12)$$

Потужність кола у символічній формі

$$\tilde{S} = \dot{U} \cdot \dot{I}^* = U \cdot I \cos \varphi + j U \cdot I \sin \varphi = P + jQ = S e^{j\varphi} \quad (2.13)$$

де  $S = U \cdot I$  – повна потужність кола, ВА;  
 $P = S \cdot \cos \varphi$  – активна потужність кола, Вт;  
 $Q = S \cdot \sin \varphi$  – реактивна потужність кола, вар.

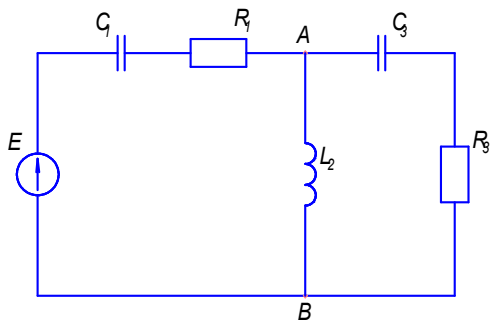
Баланс потужності кола у символічній формі

$$\sum_{k=1}^n \dot{E}_k \cdot \dot{I}_k = \sum_{k=1}^n [I_k^2 \cdot r_k + j I_k^2 (x_L - x_C)] \quad (2.14)$$

Примітка: при роботі з комплексами електричних величин (струмів, напруг, опорів) необхідно часто переходити від алгебраїчної форми до показової і навпаки. Для безпомилкового визначення знаків дійсної та уявної частин, а також знака і величини аргументу комплексного числа рекомендується чітко визначити положення вектора на комплексній площині.

## Приклад:

Задана схема електричного кола (рис. 1):



Дано:

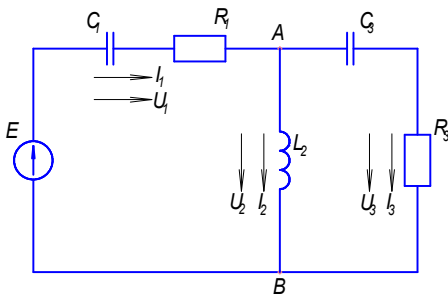
$$\dot{A} = 120 \text{ A}; \quad f = 50 \text{ Aö}$$

$$R_1 = 15 \text{ Aí}; \quad R_3 = 20 \text{ Aí}; \quad \dot{N}_1 = 637 \text{ iAö}; \quad \dot{N}_3 = 200 \text{ iAö};$$

$$L_2 = 31,8 \text{ iAí}.$$

Рис.1 – Вихідна розрахункова схема

### 1. Знаходження струмів в гілках кола



Проаналізуємо геометрію електричного кола і встановимо, що вона є змішаним з'єднанням опорів, включених на одне джерело живлення. Задамося довільно напрямом струмів в гілках і падінням напруга на окремих ділянках (рис. 2)

Рис.2 – Розрахункова схема

Визначимо величину (модулі) невідомих реактивних опорів:

$$X_{C_1} = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C_1} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 637 \cdot 10^{-6}} = 5 \text{ Aí}$$

$$X_{L_2} = 2\pi \cdot f \cdot L_2 = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 31,8 \cdot 10^{-3} = 9,99 \text{ Aí}$$

$$X_{C_3} = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C_3} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 200 \cdot 10^{-6}} = 15,92 \text{ Aí}$$

Шляхом еквівалентних перетворень приведемо задане розгалужене коло (рис.2) до нерозгалуженого з еквівалентним опором і визначимо струми гілок. Змалюємо кожну гілку окремо (рис.3).

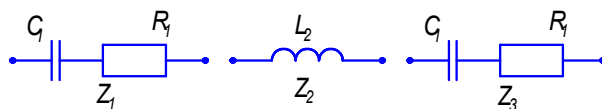


Рис.3 - Схеми гілок

Визначимо повний комплексний опір кожної гілки окремо, представивши їх як в алгебраїчній, так і в показовій формі. Повне комплексне обчислюється за формулою:

$$Z_i = R_i \pm jX_i = z_i \cdot e^{\pm j\phi_i}$$



$$Z_1 = R_1 - jX_{N_1} = z_1 \cdot e^{-j\varphi_1} = 15 - j5 = 15,81 \cdot e^{-j18,42^\circ}$$

$$z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_{C_1}^2} = \sqrt{15^2 + 5^2} = 15,81$$

$$\angle\varphi_1 = \arccos \frac{R_1}{z_1} = \arccos \frac{15}{15,81} = 18,42^\circ$$

$$Z_2 = 0 + jX_{L_2} = z_2 \cdot e^{+j\varphi_2} = j9,99 = 9,99 \cdot e^{+j90^\circ}$$

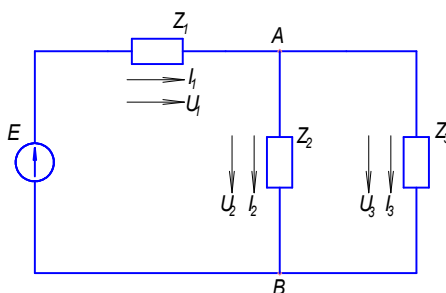
$$Z_3 = R_3 - jX_{C_3} = z_3 \cdot e^{-j\varphi_3} = 20 - j15,92 = 25,56 \cdot e^{-j38,51^\circ}$$

$$z_3 = \sqrt{R_3^2 + X_{C_3}^2} = \sqrt{20^2 + 15,92^2} = 25,56$$

$$\angle\varphi_3 = \arccos \frac{R_3}{z_3} = \arccos \frac{20}{25,56} = 38,51^\circ$$

Зобразимо спрощену заданого електричного

Перетворимо роз- АВ в нерозгалужену,  $Z_3$  еквівалентним, лую:



схему I, еквівалентну кола (рис.4).

галужену ділянку кола замінивши опори  $Z_2$  й скориставшись форму-

$$Z_{mn} = \frac{Z_m \cdot Z_n}{Z_m + Z_n}$$

У чисельник формули підставимо значення опорів в показовій формі, а в знаменник - у алгебраїчній формі, отримаємо:

$$Z_{23} = \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3} = \frac{9,99 \cdot \dot{a}^{+j90^\circ} \cdot 25,56 \cdot e^{-j38,51^\circ}}{j9,99 + 20 - j15,92} = \frac{255,34 \cdot \dot{a}^{+j51,49^\circ}}{20 - j5,93}$$

Перетворимо знаменник у показову форму:

$$z_{23} = \sqrt{20^2 + 5,93^2} = 20,86 \quad \angle\varphi_{23} = \arccos \frac{20}{20,86} = 16,51^\circ$$

Величина опору дорівнює:

$$Z_{23} = \frac{255,34 \cdot \dot{a}^{+j51,49^\circ}}{20,86 \cdot \dot{a}^{-j16,51^\circ}} = 12,24 \cdot \dot{a}^{+j68^\circ}$$

Перетворимо її з показовою в алгебраїчну форму:

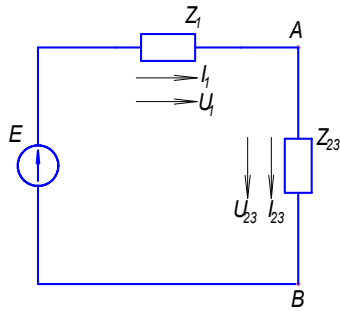
$$R_{23} = Z_{23} \cdot \cos \varphi_{23} = 12,24 \cdot \cos 68^\circ = 4,59 \quad X_{L_{23}} = Z_{23} \cdot \sin \varphi_{23} = 12,24 \cdot \sin 68^\circ = 11,35$$

Величина еквівалентного опору дорівнює:

$$Z_{23} = 12,24 \cdot \dot{a}^{+j68^\circ} = 4,59 + j11,35$$

Рис.4 - Схема I еквівалентного кола

Спрощена схема II буде мати наступний вигляд:



Замінімо послідовне з'єднання опорів еквівалентним. Визначимо загальний опір кола за формулою:

$$Z_{\text{іаі}} = Z_1 + Z_{23} = 15 - j5 + 4,59 + j11,35 = 19,59 + j6,35$$

Рис.5 - Схема II еквівалентного кола

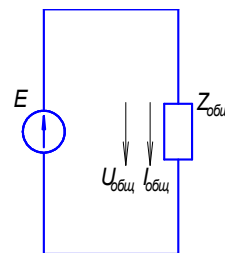
Перетворимо величину опору з алгебраїчної форми в показову:

$$z_{\text{іаі}} = \sqrt{19,59^2 + 6,35^2} = 20,59 \quad \angle \varphi_{\text{іаі}} = \arccos \frac{19,59}{20,59} = 17,93^\circ$$

Величина дорівнює:

$$Z_{\text{іаі}} = 19,59 + j6,35 = 20,59 \cdot \hat{a}^{+j17,93^\circ}$$

загального



еквівалентного

опору

Остаточно схема III має вигляд (рис.6)

Зі схеми III визначаємо повний струм всього кола в комплексній формі:

Рис.6 - Схема III еквівалентного кола

$$\dot{I}_{\text{іаі}} = \frac{\dot{E}}{Z_{\text{іаі}}} = \frac{120 \cdot \hat{a}^{\pm j0^\circ}}{20,59 \cdot \hat{a}^{+j17,93^\circ}} = 5,83 \cdot \hat{a}^{-j17,93^\circ}$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{\text{іаі}} = 5,83 \cdot \hat{a}^{-j17,93^\circ}$$

Визначаємо падіння напруги на ділянках  $Z_1$  і  $Z_{23}$  (AB) у комплексній формі:

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 \cdot Z_1 = 5,83 \cdot \hat{a}^{-j17,93^\circ} \cdot 15,81 \cdot \hat{a}^{-j18,42^\circ} = 92,17 \cdot \hat{a}^{-j36,35^\circ}$$

$$\dot{U}_{23} = \dot{I}_1 \cdot Z_{23} = 5,83 \cdot \hat{a}^{-j17,93^\circ} \cdot 12,24 \cdot \hat{a}^{-j68^\circ} = 71,36 \cdot \hat{a}^{+j50,07^\circ}$$

Визначаємо струми  $i_2$  і  $i_3$ :

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_{23}}{Z_2} = \frac{71,36 \cdot e^{+j50,07^\circ}}{9,99 \cdot e^{+j90^\circ}} = 7,14 \cdot e^{-j39,93^\circ} \quad \dot{I}_3 = \frac{\dot{U}_{23}}{Z_3} = \frac{71,36 \cdot e^{+j50,07^\circ}}{25,56 \cdot e^{-j38,51^\circ}} = 2,79 \cdot e^{+j88,58^\circ}$$

Перевіримо правильність отриманих результатів, використовуючи I закон Кірхгофа:

$$\dot{I}_{\text{іаі}} = \dot{I}_1 = \dot{I}_2 + \dot{I}_3 = 7,14 \cdot e^{-j39,93^\circ} + 2,79 \cdot e^{+j88,58^\circ} = 7,14 \cdot \cos 39,93^\circ - j7,14 \cdot \sin 39,93^\circ + 2,79 \cdot \cos 88,58^\circ + j2,79 \cdot \sin 88,58^\circ = 5,54 - j1,794 = 5,82 \cdot e^{-j17,85^\circ}$$

2. Знаходження напружень на окремих ділянках кола

Падіння напруги на окремих ділянках були знайдені в п. 1 і складають:

$$\dot{U}_1 = 92,17 \cdot \hat{a}^{-j36,35^\circ}$$

$$\dot{U}_{23} = \dot{U}_2 = \dot{U}_3 = 71,36 \cdot \hat{a}^{+j50,07^\circ}$$

Перевірку правильності розрахунку виконаємо на підставі II закону Кірхгофа:

$$\begin{aligned} \dot{E} = \dot{U}_1 + \dot{U}_{23} &= 92,17 \cdot \hat{a}^{-j36,35^\circ} + 71,36 \cdot \hat{a}^{+j50,07^\circ} = 92,17 \cdot \cos 36,35^\circ - j92,17 \cdot \sin 36,35^\circ + \\ &+ 71,36 \cdot \cos 50,07^\circ + j71,36 \cdot \sin 50,07^\circ = 120,04 + j0 = 120,04 \cdot e^{\pm j0^\circ} \end{aligned}$$

### 3. Баланс потужностей

Визначимо повну, активну та реактивну потужності для всього кола в цілому і для кожної ділянки окремо.

Для всього кола:

$$\dot{E} = 120 \cdot \hat{a}^{\pm j0^\circ} \quad \dot{I}_{i\dot{a}\dot{u}} = 5,83 \cdot \hat{a}^{-j17,93^\circ}$$

Пов'язаний комплексний вектор струму:  $I_{i\dot{a}\dot{u}}^* = 5,83 \cdot \hat{a}^{+j17,93^\circ}$

$$\tilde{S} = \dot{E} \cdot I_{i\dot{a}\dot{u}}^* = 120 \cdot e^{\pm j0^\circ} \cdot 5,83 \cdot \hat{a}^{+j17,93^\circ} = 699,6 \cdot \hat{a}^{+j17,93^\circ}$$

$$S_o = 699,6 [\text{ВА}] \quad \angle \varphi_o = 17,93^\circ$$

Величину активної та реактивної потужності знаходимо з трикутника потужностей:

$$P_o = S_o \cdot \cos \varphi_o = 699,6 \cdot \cos 17,93^\circ = 665,62 [\text{Вт}]$$

$$Q_o = S_o \cdot \sin \varphi_o = 699,6 \cdot \sin 17,93^\circ = 215,38 [\text{ВАр}]$$

Для кожної окремої гілки:

$$1) \tilde{S}_1 = \dot{U}_1 \cdot I_1^* = 92,17 \cdot e^{-j36,35^\circ} \cdot 5,83 \cdot \hat{a}^{+j17,93^\circ} = 537,35 \cdot \hat{a}^{-j18,42^\circ}$$

$$P_1 = S_1 \cdot \cos \varphi_1 = 537,35 \cdot \cos(-18,42^\circ) = 509,82 [\text{Вт}]$$

$$Q_1 = S_1 \cdot \sin \varphi_1 = 537,35 \cdot \sin(-18,42^\circ) = 169,79 [\text{ВАр}]$$

$$2) \tilde{S}_2 = \dot{U}_2 \cdot I_2^* = 71,36 \cdot e^{+j50,07^\circ} \cdot 7,14 \cdot \hat{a}^{+j39,93^\circ} = 509,51 \cdot \hat{a}^{+j90^\circ}$$

$$P_2 = S_2 \cdot \cos \varphi_2 = 509,51 \cdot \cos 90^\circ = 0 [\text{Вт}]$$

$$Q_2 = S_2 \cdot \sin \varphi_2 = 509,51 \cdot \sin 90^\circ = 509,51 [\text{ВАр}]$$

$$3) \tilde{S}_3 = \dot{U}_3 \cdot I_3^* = 71,36 \cdot e^{+j50,07^\circ} \cdot 2,79 \cdot \hat{a}^{-j88,58^\circ} = 199,09 \cdot \hat{a}^{-j38,51^\circ}$$

$$P_3 = S_3 \cdot \cos \varphi_3 = 199,09 \cdot \cos(-38,51^\circ) = 155,79 [\text{Вт}]$$

$$Q_3 = S_3 \cdot \sin \varphi_3 = 199,09 \cdot \sin(-38,51^\circ) = 123,96 [\text{ВАр}]$$

Складемо баланс активних потужностей:

$$P_o = P_1 + P_2 + P_3 = 509,82 + 0 + 155,79 = 665,61$$

$$P_o = 665,62$$

Визначимо похибку балансу активних потужностей:

$$\Delta P \% = \left| \frac{665,62 - 665,61}{665,62} \right| \cdot 100\% = 0,002\%$$

Похибка нижче допустимої, значить розрахунок виконано правильно.

Складемо баланс реактивних потужностей:

$$jQ_0 = \pm jQ - jQ_{C1} + jQ_{L2} - jQ_{C3} = \pm j0 + j169,79 + j509,51 + j123,96 = j215,76$$

$$jQ_0 = 215,38$$

Визначимо похибку

балансу реактивних потужностей:

$$\Delta Q\% = \left| \frac{215,38 - 215,76}{215,38} \right| \cdot 100\% = 0,18\%$$

Похибка нижче допустимої, значить розрахунок виконано правильно.

#### 4. Побудова векторної діаграми напруг і струмів

Побудуємо на комплексній площині векторну діаграму струмів і напруг. Для чого задамося масштабними коефіцієнтами діаграм:

$$\mu_I = 1,0 \frac{A}{\text{mm}}$$

$$\mu_U = 10 \frac{B}{\text{mm}}$$

Складемо рівняння струмів і напруг для вузла А:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2 + \dot{I}_3 \quad \dot{E} = \dot{U}_1 + \dot{U}_{23}$$

На рис. 7 представлена векторна діаграма струмів і напруг. Точкою «.» зазначено початок відліку кутів, знаком «→» - напрям позитивного від-рахунку кутів.

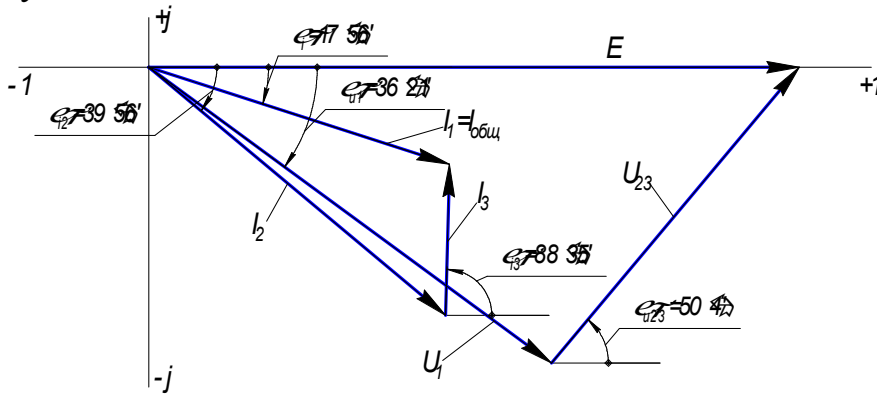


Рис.7 - Векторна діаграма струмів і напруг для розрахункової кола

Після освоєння основних теоретичних положень однофазних кол змінного струму, символічного методу їх розрахунку студент може приступити до виконання завдання 2.

Таблиця 2

Номер		E, В	f, Гц	C <sub>1</sub> , мкФ	C <sub>2</sub> , мкФ	C <sub>3</sub> , мкФ	L <sub>1</sub> , мГн	L <sub>2</sub> , мГн	L <sub>3</sub> , мГн	R <sub>1</sub> , Ом	R <sub>2</sub> , Ом	R <sub>3</sub> , Ом
варіант	рисун-ка											
0	2.1	150	50	637	300	-	-	-	15,9	2	3	4

1	2.2	100	50	-	-	100	15,9	9	15,9	8	3	4
2	2.3	120	50	637	-	-	-	15,9	15,9	8	3	4
3	2.4	200	50	-	300	-	15,9	-	15,9	8	3	4
4	2.5	220	50	637	-	100	-	47,7	-	8	-	4
5	2.1	50	50	100	159	-	-	-	115	10	-	100

Продовження таблиці 2

Номер		Е, В	f, Гц	C <sub>1</sub> , мкФ	C <sub>2</sub> , мкФ	C <sub>3</sub> , мкФ	L <sub>1</sub> , мГн	L <sub>2</sub> , мГн	L <sub>3</sub> , мГн	R <sub>1</sub> , Ом	R <sub>2</sub> , Ом	R <sub>3</sub> , Ом
варіант	рисунок											
6	2.6	100	50	100	300	-	15,9	-	115	10	-	100
7	2.7	120	50	-	-	100	15,9	-	115	-	4	100
8	2.8	200	50	-	159	-	-	-	115	10	4	100
9	2.9	220	50	-	318	-	15,9	-	-	10	4	100
10	2.10	50	50	-	637	-	15,9	-	6,37	5	-	8
11	2.11	100	50	637	-	100	-	15,7	-	-	10	8
12	2.12	120	50	-	300	100	31,8	-	-	5	-	8
13	2.13	200	50	-	-	100	31,8	-	-	5	10	8
14	2.14	220	50	637	-	200	-	15,9	-	5	10	8
15	2.15	150	50	100	-	200	-	15,9	-	10	2	10
16	2.16	100	50	-	1600	200	31,8	-	-	-	8	10
17	2.17	120	50	100	-	200	-	15,9	-	10	8	10
18	2.18	200	50	637	-	200	-	31,8	-	-	8	10
19	2.19	220	50	-	1600	-	31,8	-	95	10	8	-
20	2.20	50	50	-	159	-	31,8	-	95	15	10	10
21	2.21	100	50	-	159	200	15,9	-	-	15	-	10
22	2.22	120	50	-	159	200	15,9	-	-	-	10	20
23	2.23	120	50	637	159	200	-	31,8	95	15	10	20
24	2.24	220	50	637	159	-	-	-	95	-	10	20
25	2.25	150	50	-	159	-	25	-	95	6	10	20
26	2.26	100	50	637	159	637	-	-	95	6	-	20
27	2.27	100	50	-	159	-	25	-	95	6	4	-
28	2.28	200	50	-	159	637	25	-	95	6	-	20
29	2.29	220	50	637	-	637	-	9	-	6	-	20
30	2.30	50	50	318	637	-	-	-	31,8	-	10	40
31	2.31	100	50	318	-	300	-	-	31,8	-	10	10
32	2.32	120	50	-	-	300	19,1	15,9	31,8	40	-	10
33	2.33	200	50	318	-	300	-	15,9	31,8	10	10	40
34	2.34	220	50	318	-	300	-	15,9	31,8	-	10	10
35	2.35	50	50	-	318	-	19,5	-	31,8	8	10	4
36	2.36	100	50	637	-	200	-	31,6	95	8	-	4

## Продовження таблиці 2

Номер		E, В	f, Гц	C <sub>1</sub> , мкФ	C <sub>2</sub> , мкФ	C <sub>3</sub> , мкФ	L <sub>1</sub> , мГн	L <sub>2</sub> , мГн	L <sub>3</sub> , мГн	R <sub>1</sub> , Ом	R <sub>2</sub> , Ом	R <sub>3</sub> , Ом
варіант	рисунок											
37	2.37	150	50	637	-	200	-	31,8	-	8	10	4
38	2.38	200	50	-	318	200	15,9	-	95	8	-	4
39	2.39	220	50	-	-	220	15,9	31,8	95	8	-	4
40	2.40	50	50	637	-	200	-	31,8	95	4	-	40
41	2.41	100	50	-	318	200	9,55	-	-	4	40	4
42	2.42	120	50	500	-	-	-	15,9	95	4	40	4
43	2.43	200	50	500	-	159	-	15,9	-	40	-	40
44	2.44	220	50	-	318	159	9,55	-	95	-	10	40
45	2.45	50	50	500	159	-	-	31,8	35	35	10	40
46	2.46	100	50	500	-	-	-	15,9	31,8	35	20	40
47	2.47	120	50	-	159	-	15,9	-	31,8	35	-	80
48	2.48	200	50	318	318	159	-	-	31,8	35	20	80
49	2.49	220	50	318	-	159	-	31,8	31,8	35	2020	80
50	2.50	50	50	-	318	-	15,9	-	31,8	5	10	80
51	2.51	50	50	200	-	318	15,9	31,8	-	5	10	-
52	2.52	100	50	-	-	396	-	25,4	-	2	6	16
53	2.53	120	50	-	795	-	-	-	19,2	20	3	8
54	2.54	200	50	-	318	-	12,7	50,8	-	3	12	2
55	2.55	220	50	-	265	-	-	-	15,9	5	16	4
56	2.56	100	50	396	-	-	-	19,2	25,4	-	8	10
57	2.57	150	50	-	113	1060	-	57	38	5	-	16
58	2.58	200	50	-	635	-	6,4	9,55	25,4	2	10	6
59	2.59	50	50	396	530	-	12,7	-	-	3	4	-
60	2.60	100	50	318	-	352	-	15,9	47,7	5	8	4
61	2.61	120	50	396	200	-	9,55	-	50,8	2	-	12
62	2.62	150	50	1500	-	106	-	50,8	-	3	12	20
63	2.63	200	50	-	795	630	15,9	-	12,7	-	3	8
64	2.64	100	50	1060	-	396	63,5	47,7	-	2	-	6
65	2.65	50	50	-	-	1060	12,7	19,2	-	3	8	2
66	2.66	120	50	159	-	318	76	44,5	15,9	12	3	-
67	2.67	150	50	795	212	1590	-	-	31,8	4	15	6

## Продовження таблиці 2

Номер		Е, В	f, Гц	C <sub>1</sub> , мкФ	C <sub>2</sub> , мкФ	C <sub>3</sub> , мкФ	L <sub>1</sub> , мГн	L <sub>2</sub> , мГн	L <sub>3</sub> , мГн	R <sub>1</sub> , Ом	R <sub>2</sub> , Ом	R <sub>3</sub> , Ом
варіант у	рисун- ка											
68	2.68	100	50	-	200	138	9,55	-	79,5	2	12	20
69	2.69	200	50	-	150	-	63,5	47,7	19,2	5	20	8
70	2.70	50	50	-	-	212	6,4	25,4	35	2	3	3
71	2.71	120	50	795	200	159	-	-	15,9	4	-	10
72	2.72	100	50	-	-	125	-	28,6	-	5	15	25
73	2.73	220	50	106	79,5	177	47,7	-	122	-	30	15
74	2.74	100	50	1590	-	635	-	38	50,8	3	10	12
75	2.75	150	50	530	-	1060	38	31,8	-	5	-	4
76	2.76	50	50	635	318	-	15,9	-	31,8	10	5	-
77	2.77	120	50	-	265	318	9,55	-	15,9	4	-	5
78	2.78	100	50	200	795	-	12,8	-	22,3	12	3	-
79	2.79	200	50	-	1590	265	31,8	63,5	-	15	2	16
80	2.80	120	50	-	1060	167	22,3	-	35	4	4	15
81	2.81	150	50	-	-	396	63,6	12,7	-	20	3	6
82	2.82	220	50	795	530	-	38	50,8	-	3	12	20
83	2.83	200	50	-	-	200	31,8	63,8	-	15	3	12
84	2.84	120	50	-	265	212	12,7	-	6,4	-	16	15
85	2.85	100	50	88	635	-	122	6,4	9,55	-	3	4
86	2.86	100	50	-	590	1060	25,4	22,3	-	5	2	2
87	2.87	150	50	530	455	-	22,3	-	25,4	8	7	5
88	2.88	220	50	200	-	244	-	19,2	31,8	12	4	4
89	2.89	100	50	-	318	167	17,7	-	76	1	2	10
90	2.90	150	50	396	-	-	-	31,8	25,4	4	4	6
91	2.91	200	50	117	226	1060	54	28,6	19,2	12	10	4
92	2.92	220	50	-	212	-	28,6	-	12,7	5	10	6
93	2.93	120	50	200	113	396	38	63,5	22	3	6	6
94	2.94	150	50	-	795	106	19,2	-	98,3	8	3	40
95	2.95	200	50	-	795	177	15,9	-	76	5	3	8
96	2.96	100	50	455	530	-	-	35	9,55	3	-	4
97	2.97	100	50	455	-	318	25,4	19,2	-	6	8	-
98	2.98	150	50	396	-	-	15,9	50,8	47,7	4	12	20
99	2.99	120	50	396	70,5	635	-	112	31,8	6	-	12
100	2.100	220	50	530	-	-	-	21,3	63,5	12	2	15



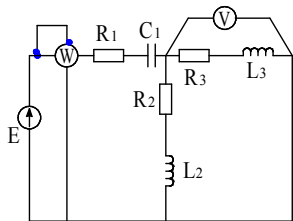


Рис. 2.1

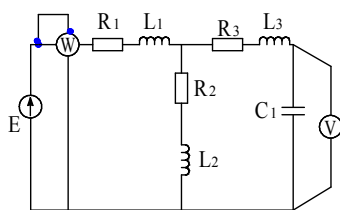


Рис. 2.2

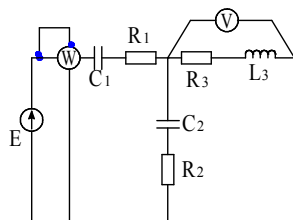


Рис. 2.3

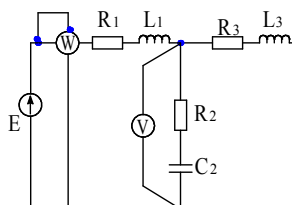


Рис. 2.4

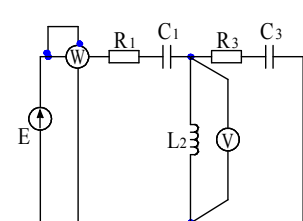


Рис. 2.5

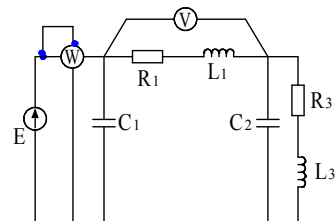


Рис. 2.6

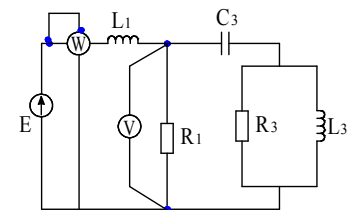


Рис. 2.7

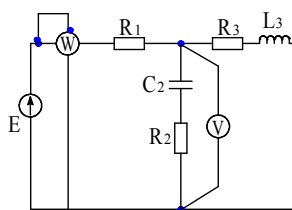


Рис. 2.8

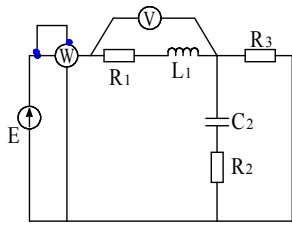


Рис. 2.9

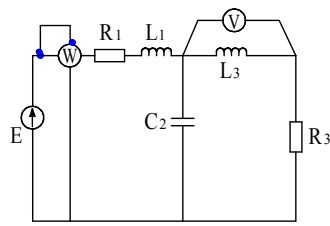


Рис. 2.10

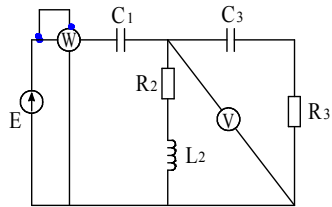


Рис. 2.11

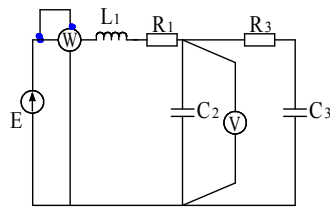


Рис. 2.12

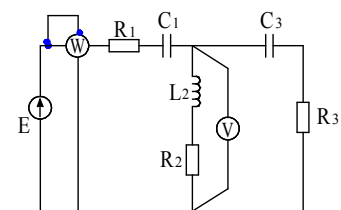


Рис. 2.13

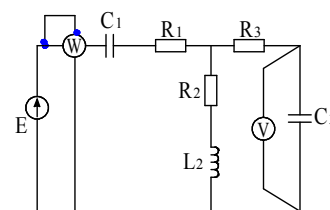


Рис. 2.14

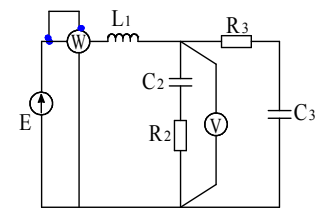


Рис. 2.15

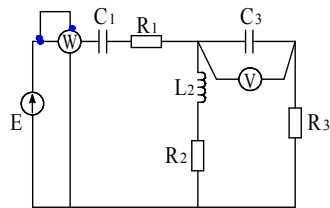


Рис. 2.16

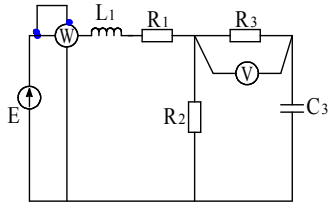


Рис. 2.17

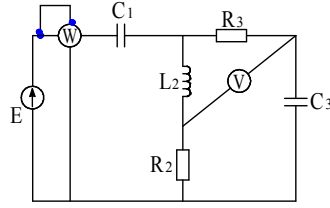


Рис. 2.18

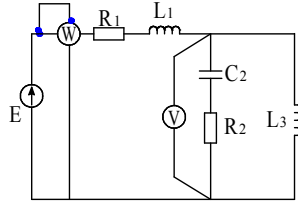


Рис. 2.19

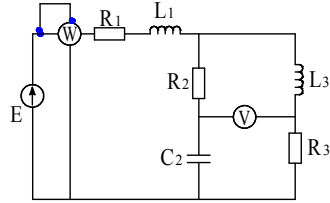


Рис. 2.20

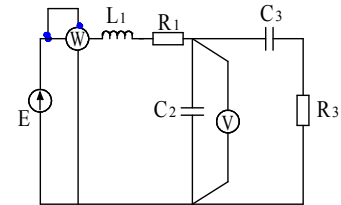


Рис. 2.21

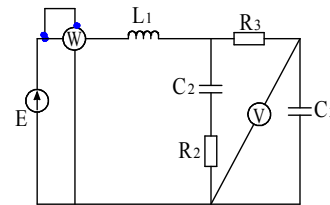


Рис. 2.22

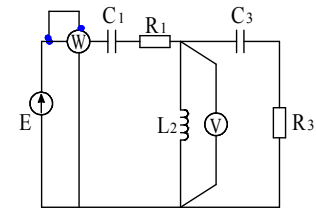


Рис. 2.23

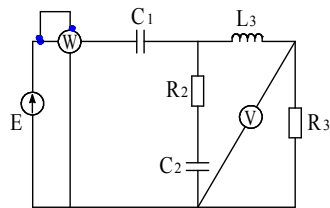


Рис. 2.24

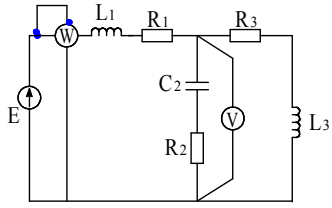


Рис. 2.25

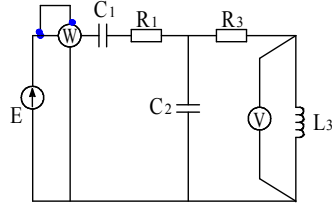


Рис. 2.26

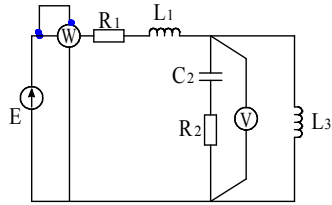


Рис. 2.27

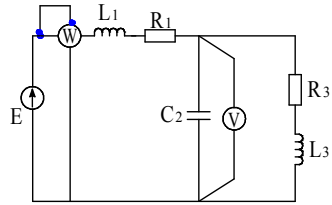


Рис. 2.28

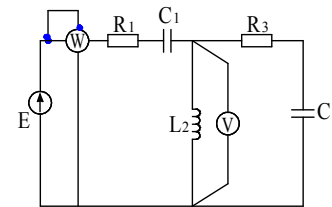


Рис. 2.29

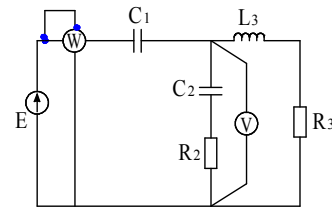


Рис. 2.30

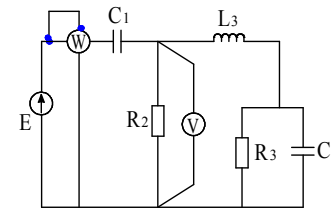


Рис. 2.31

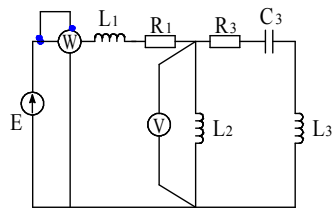


Рис. 2.32

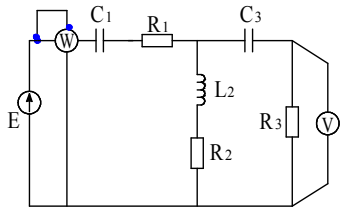


Рис. 2.33

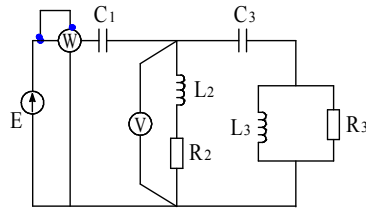


Рис. 2.34

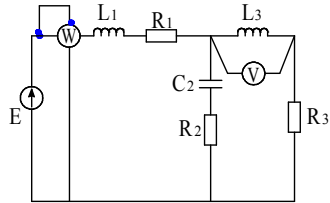


Рис. 2.35

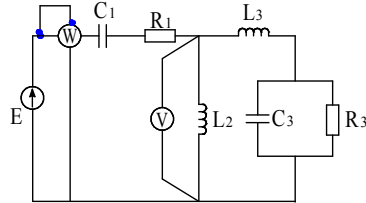


Рис. 2.36

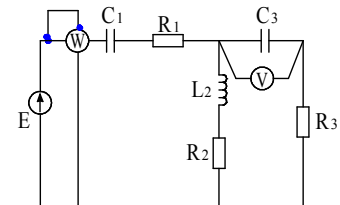


Рис. 2.37

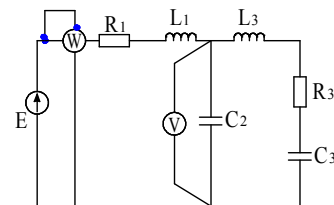


Рис. 2.38

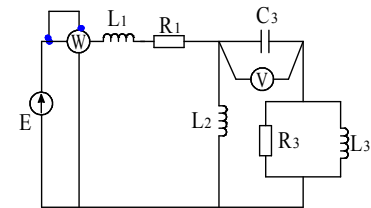


Рис. 2.39

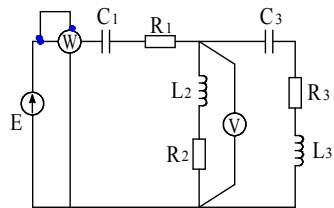


Рис. 2.40

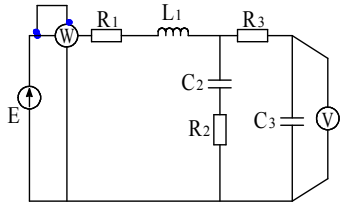


Рис. 2.41

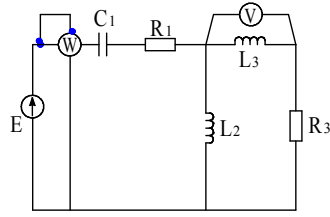


Рис. 2.42

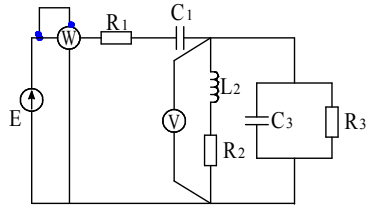


Рис. 2.43

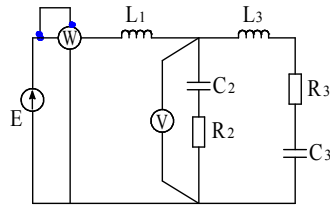


Рис. 2.44

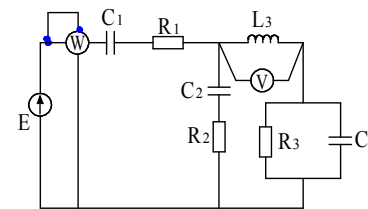


Рис. 2.45

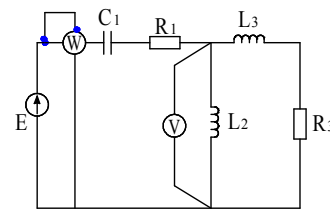


Рис. 2.46

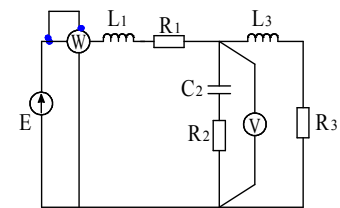


Рис. 2.47

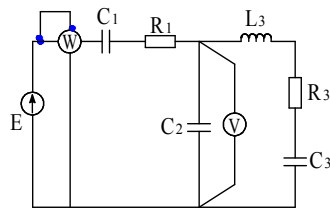


Рис. 2.48

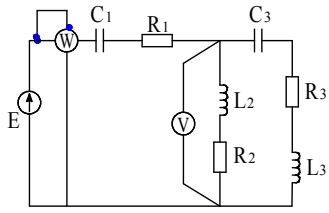


Рис. 2.49

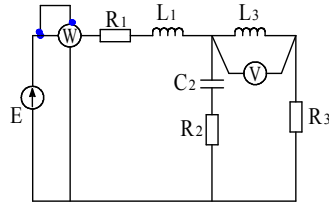


Рис. 2.50

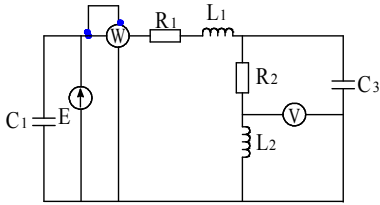


Рис. 2.51

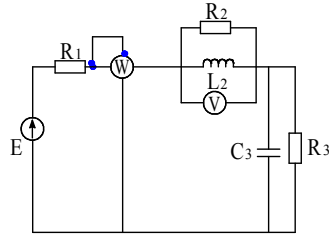


Рис. 2.52

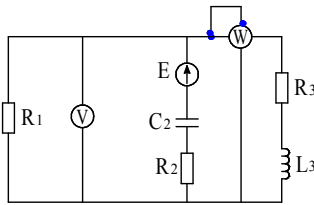


Рис. 2.53

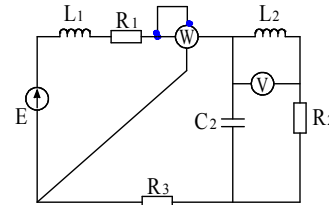


Рис. 2.54

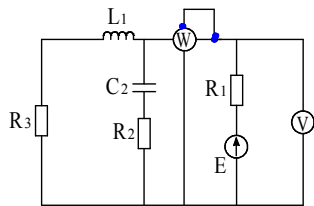


Рис. 2.55

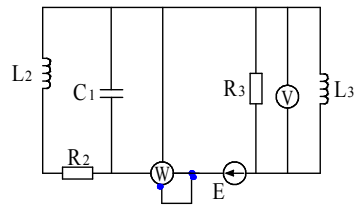


Рис. 2.56

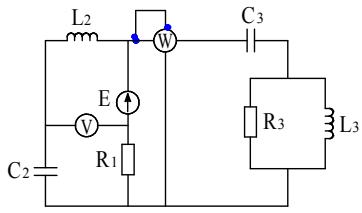


Рис. 2.57

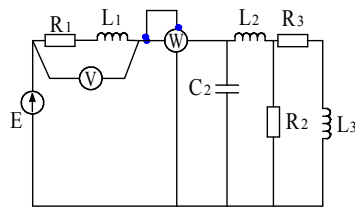


Рис. 2.58

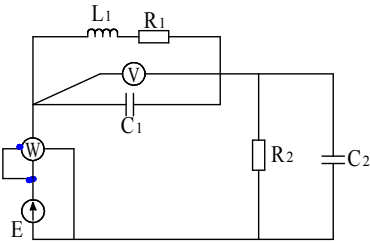


Рис. 2.59

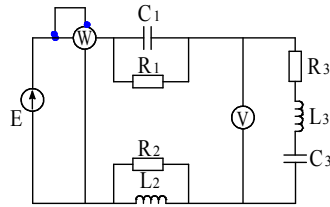


Рис. 2.60

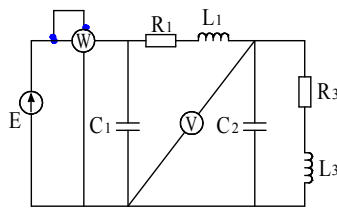


Рис. 2.61

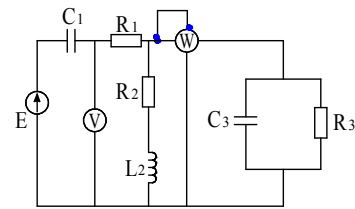


Рис. 2.62

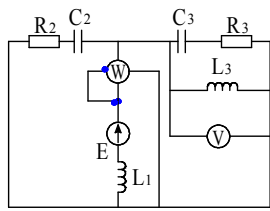


Рис. 2.63

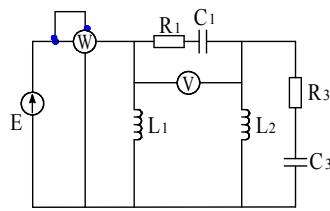


Рис. 2.64



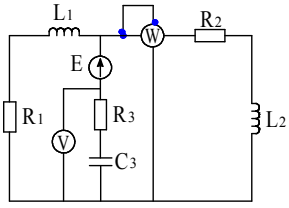


Рис. 2.65

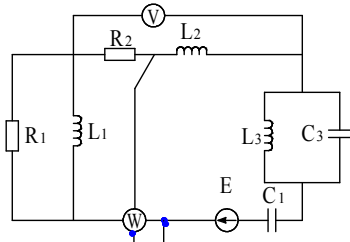


Рис. 2.66

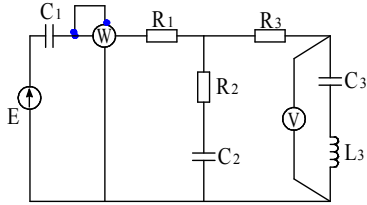


Рис. 2.67

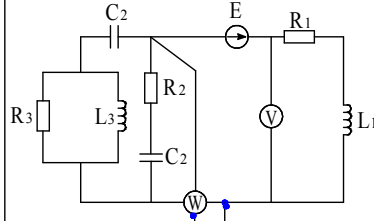


Рис. 2.68

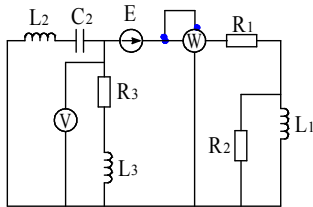


Рис. 2.69

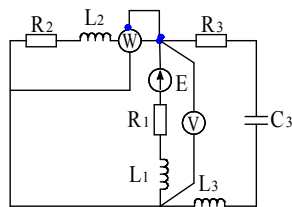


Рис. 2.70

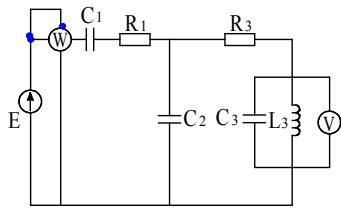


Рис. 2.71

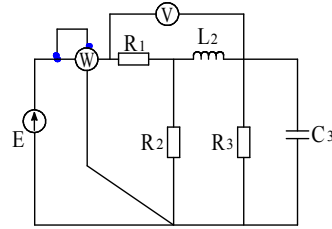


Рис. 2.72

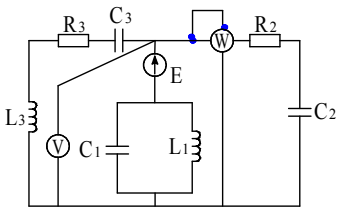


Рис. 2.73

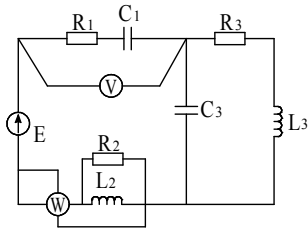


Рис. 2.74

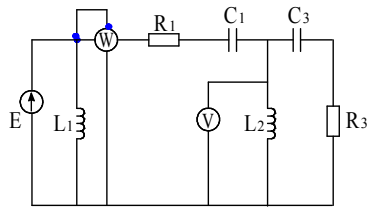


Рис. 2.75

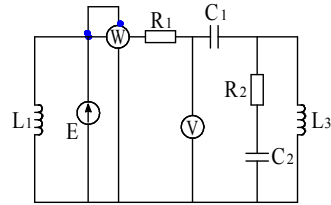


Рис. 2.76

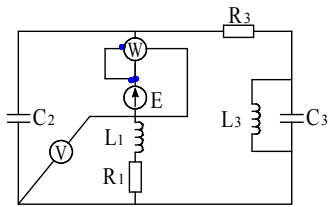


Рис. 2.77

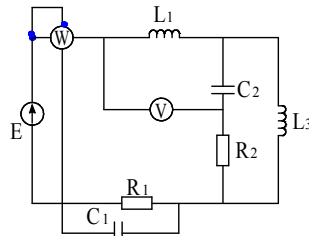


Рис. 2.78

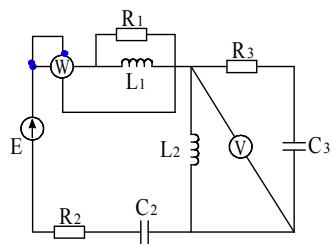


Рис. 2.79

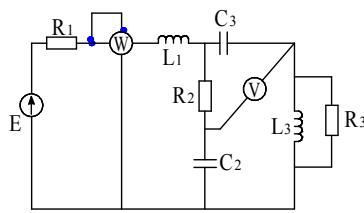


Рис. 2.80

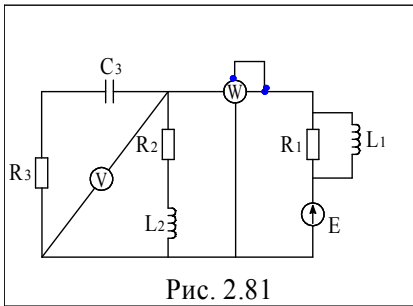


Рис. 2.81

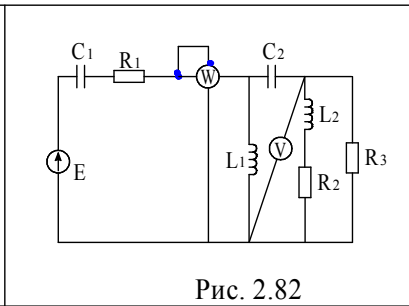


Рис. 2.82

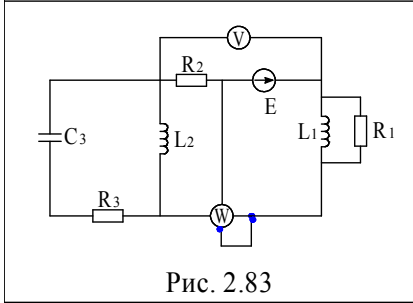


Рис. 2.83

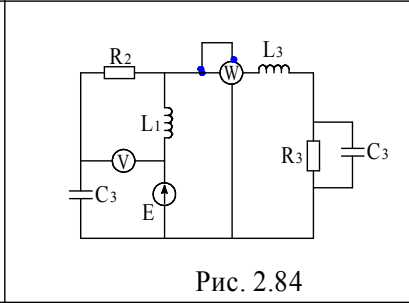


Рис. 2.84

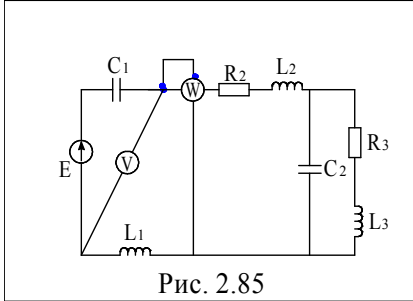


Рис. 2.85

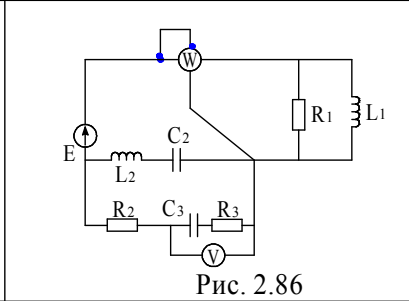


Рис. 2.86

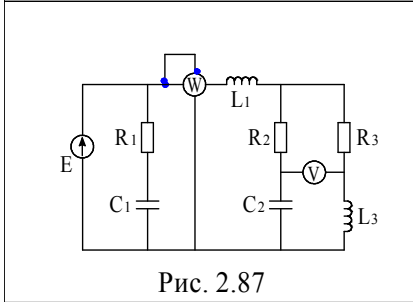


Рис. 2.87

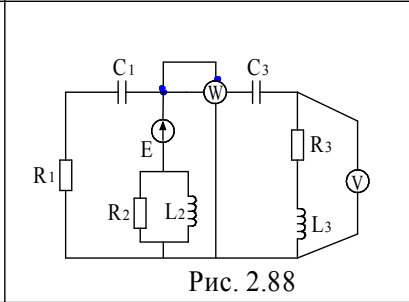


Рис. 2.88

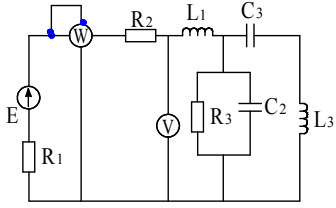


Рис. 2.89

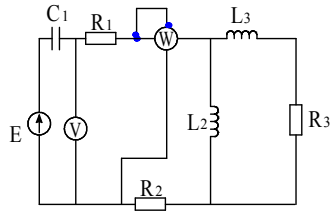


Рис. 2.90

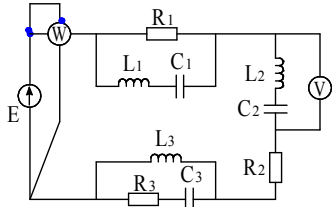


Рис. 2.91

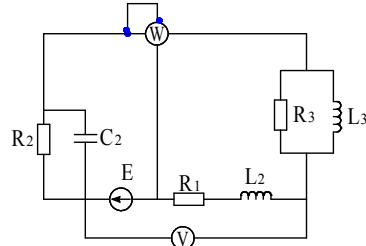


Рис. 2.92

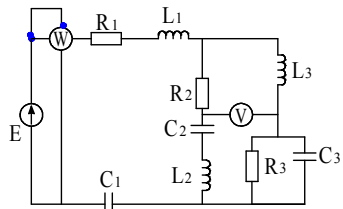


Рис. 2.93

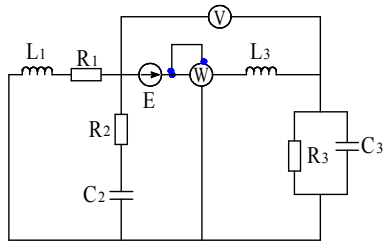


Рис. 2.94

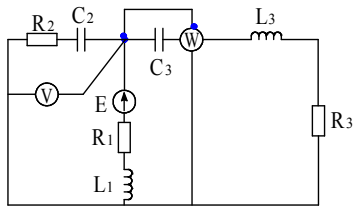


Рис. 2.95

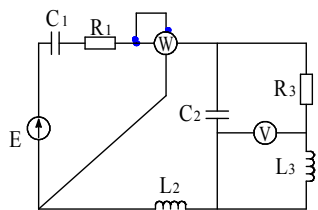


Рис. 2.96

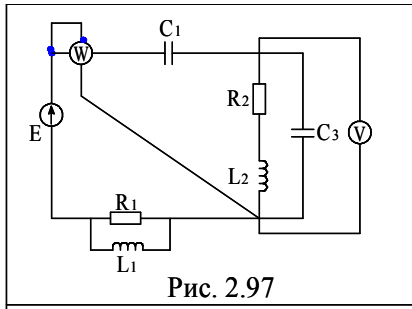


Рис. 2.97

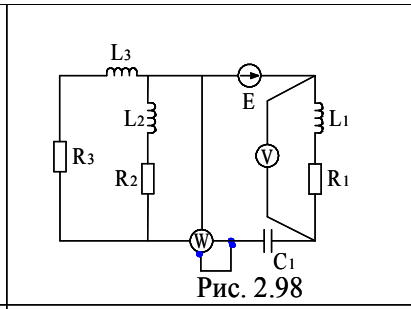


Рис. 2.98

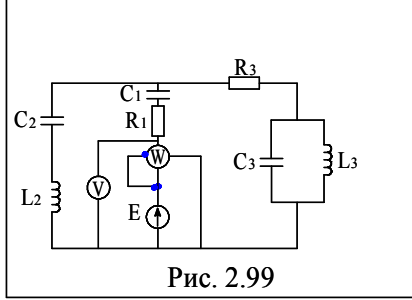


Рис. 2.99

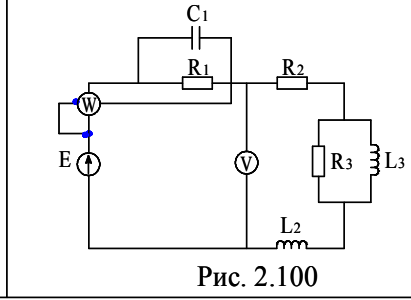


Рис. 2.100

### ЗАДАЧА 3

Задані технічні дані трифазного трансформатора, потрібно:

- 1) Накреслити електричну схему трансформатора
- 2) Визначити:
  - К - коефіцієнт трансформації
  - $I_{1н}, I_{2н}$  - номінальні струми обмоток
  - $\cos\varphi_0$  - коефіцієнт потужності трансформатора при холостому ході
  - $R_1, X_1$  - опір первинної обмотки
  - $R_2, X_2$  - опір гілки, що намагнічується схеми заміщення
  - $Z_0, R_0, X_0$  - опір гілки, що намагнічується схеми заміщення
  - $\delta$  - кут магнітних втрат
  - $\Delta U\%, \Delta U_B$  - зміна вторинної напруги для завантаження  $\beta=0,7; \cos\varphi_2=0,8$
  - $\eta$  - коефіцієнт корисної дії для того ж навантаження
- 3) Накреслити Т-подібну схему заміщення трансформатора
- 4) Побудувати:
  - а) Зовнішню характеристику  $U_2 = f(\beta)$  для навантаження  $\beta=0,7; \cos\varphi_2 = 0,8$
  - б) Векторну діаграму трансформатора для того ж навантаження

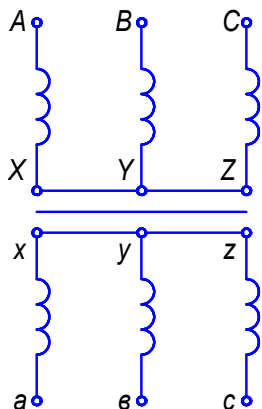
#### Приклад:

Задані технічні дані трифазного трансформатора:

- $S_i = 63 \text{ kVA}$  - номінальна потужність;
- $U_{1н} = 20000 \text{ V}$  - номінальна первинна напруга;
- $U_{20} = 230 \text{ V}$  - номінальна вторинна напруга холостого ходу;
- $U_\epsilon \% = 4,7\%$  - напруга короткого замикання;
- $D_\epsilon = 1470 \text{ W}$  - потужність втрат короткого замикання;
- $D_0 = 260 \text{ W}$  - потужність втрат холостого ходу;
- $I_0 \% = 2,8\%$  - струм холостого ходу;
- $Y/\Delta - 0$  - схема та група з'єднання обмоток трансформатора.

#### 1. Електрична схема трансформатора

Електрична схема трансформатора в режимі холостого ходу приведена на рис.1.



#### 2. Визначення параметрів трансформатора

Визначаємо коефіцієнт трансформації трансформатора виходячи з номінальних напруг:

$$\hat{E} = \frac{U_{1\delta i}}{U_{2\delta i}} = \frac{11547}{132,8} = 86,95$$

де  $U_{1\delta i}$  і  $U_{2\delta i}$  - номінальні фазні напруги обмоток в режимі холостого ходу.

Оскільки, схема первинної обмотки «Y», то:

Рис.1 - Електрична схема трифазного трансформатора

$$U_{1\delta i} = \frac{U_{1i}}{\sqrt{3}} = \frac{20000}{\sqrt{3}} = 11547 \text{ В}$$

Оскільки, схема вторинної обмотки «Y», то:

$$U_{2\delta i} = \frac{U_{20}}{\sqrt{3}} = \frac{230}{\sqrt{3}} = 132,8 \text{ В}$$

Визначаємо номінальні лінійні струми обмоток з формули:

$$S_i = \sqrt{3} \cdot U_{1i} \cdot I_{1i} = \sqrt{3} \cdot U_{2i} \cdot I_{2i}$$

звідки:

$$I_{1i} = \frac{S_i}{\sqrt{3} \cdot U_{1i}} = \frac{63000}{\sqrt{3} \cdot 20000} = 1,82 \text{ А}$$

$$I_{2i} = \frac{S_i}{\sqrt{3} \cdot U_{2i}} = \frac{63000}{\sqrt{3} \cdot 230} = 158,14 \text{ А}$$

Визначаємо номінальні фазні струми обмоток, так як первинна обмотка трансформатора з'єднана за схемою «Y», то

$$I_{1\delta i} = I_{1i} = 1,82 \text{ А}$$

Вторинна обмотка трансформатора з'єднана за схемою «Y», тому:

$$I_{2\delta i} = I_{2i} = 158,14 \text{ А}$$

Визначаємо коефіцієнт трансформації виходячи з номінальних струмів:

$$\hat{E} = \frac{I_{1\delta i}}{I_{2\delta i}} = \frac{158,14}{1,82} = 86,89$$

Величини коефіцієнти трансформації по напрузі і струму приблизно рівні значить розрахунок виконано правильно.

Визначаємо коефіцієнт потужності холостого ходу з формули:

$$D_0 = 3 \cdot U_{1\delta i} \cdot I_{0\delta} \cdot \cos \varphi_0$$

$I_0$  заданий у% від  $I_{1i}$ , знаходимо:

$$I_0 = \frac{2,8\% \cdot I_{1i}}{100} = \frac{2,8 \cdot 1,82}{100} = 0,05 \text{ A},$$

а так як  $I_0 = I_{0\delta}$ , тоді:

$$\cos \varphi_0 = \frac{D_0}{3 \cdot U_{1\delta i} \cdot I_0} = \frac{260}{3 \cdot 11547 \cdot 0,05} = 0,1501$$

Звідки:

$$\angle \varphi_0 = \arccos 0,1501 = 81,37^\circ$$

Кут магнітних втрат дорівнює:

$$\angle \delta = 90^\circ - \angle \varphi_0 = 90^\circ - 81,37^\circ = 8,63^\circ$$

Визначимо опори кола намагнічування за даними холостого ходу трансформатора:

- повний опір:

$$Z_0 = \frac{U_{1\delta i}}{I_0} = \frac{U_{1i}}{\sqrt{3} \cdot I_0} = \frac{20000}{\sqrt{3} \cdot 0,05} = 230940 \text{ } \hat{\Omega} = 230,94 \text{ k}\hat{\Omega}$$

- активний опір:

$$R_0 = \frac{D_0}{3 \cdot I_0^2} = \frac{260}{3 \cdot 0,05^2} = 34666,7 \text{ } \hat{\Omega} = 34,67 \text{ k}\hat{\Omega}$$

- індуктивний опір:

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} = \sqrt{230,94^2 - 34,67^2} = 228,32 \text{ k}\hat{\Omega}$$

Визначимо повний опір обмоток трансформатора при короткому замиканні:

$$Z_{\hat{e}} = \frac{U_{\hat{e}\delta}}{I_{1\delta i}} = \frac{U_{\hat{e}}}{\sqrt{3} \cdot I_{1i}} = \frac{940}{\sqrt{3} \cdot 1,82} = 298,19 \text{ } \hat{\Omega}$$

Оскільки,  $U_{\hat{e}}$  задано у% від  $U_{1i}$ , тоді:

$$U_{\hat{e}} = \frac{U_{\hat{e}}\% \cdot U_{1i}}{100} = \frac{4,7 \cdot 20000}{100} = 940 \text{ V}$$

Визначаємо активний опір короткого замикання:

$$R_{\hat{e}} = \frac{D_{\hat{e}}}{3 \cdot I_{1i}^2} = \frac{1470}{3 \cdot 1,82^2} = 147,93 \text{ } \hat{\Omega}$$

Визначаємо індуктивний опір короткого замикання:

$$X_{\hat{e}} = \sqrt{Z_{\hat{e}}^2 - R_{\hat{e}}^2} = \sqrt{298,19^2 - 147,93^2} = 258,91 \text{ } \hat{\Omega}$$



Визначимо опір первинної обмотки:

- активний опір:

$$R_1 = R'_2 = \frac{R_{\hat{e}}}{2} = \frac{147,93}{2} = 73,965 \hat{\Omega}$$

- індуктивний опір:

$$X_1 = X'_2 = \frac{X_{\hat{e}}}{2} = \frac{258,91}{2} = 129,455 \hat{\Omega}$$

Визначаємо опір вторинної обмотки:

- активний опір:

$$R_2 = \frac{R'_2}{K^2} = \frac{73,965}{86,95^2} = 0,0098 \hat{\Omega}$$

- індуктивний опір:

$$X_2 = \frac{X'_2}{K^2} = \frac{129,455}{86,95^2} = 0,0171 \hat{\Omega}$$

Зміна вторинної напруги в% визначаємо за формулою:

$$\Delta U = \beta \cdot (U_{\hat{a}\hat{e}} \cdot \cos \varphi_2 + U_{\hat{\delta}\hat{e}} \cdot \sin \varphi_2)$$

де  $\beta = 0,7$  – коефіцієнт завантаження трансформатора;

$\cos \varphi_2 = 0,8$  – коефіцієнт потужності навантаження,  $\sin \varphi_2 = 0,6$

- активна складова напруги короткого замикання, в % дорівнює:

$$U_{\hat{a}\hat{e}} = \frac{D_{\hat{e}} \cdot 100}{S_i} = \frac{1470 \cdot 100}{63000} = 2,33\%$$

- індуктивна складова напруги короткого замикання, в % дорівнює:

$$U_{\hat{\delta}\hat{e}} = \sqrt{(U_{\hat{e}} \%)^2 - (U_{\hat{a}\hat{e}} \%)^2} = \sqrt{4,7^2 - 2,33^2} = 4,08\%$$

Визначаємо зміну вторинної напруги в %:

$$\Delta U = 0,7 \cdot (2,33 \cdot 0,8 + 4,08 \cdot 0,6) = 3,02\%$$

Визначаємо зміну вторинної напруги у вольтах:

$$\Delta U = \frac{\Delta U \% \cdot U_{20}}{100} = \frac{3,02 \cdot 230}{100} = 6,95 \hat{V}$$

Визначаємо напругу на вторинній обмотці при заданому навантаженні:

$$U_2 = U_{20} - \Delta U = 230 - 6,95 = 223,05 \text{ В}$$

Визначаємо коефіцієнт корисної дії трансформатора при  $\beta = 0,7$  і  $\cos \varphi_2 = 0,8$

$$\eta = \frac{\beta \cdot S_i \cdot \cos \varphi_2}{\beta \cdot S_i \cdot \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 \cdot P_{\Sigma}} = \frac{0,7 \cdot 63000 \cdot 0,8}{0,7 \cdot 63000 \cdot 0,8 + 260 + 0,7^2 \cdot 1470} = 0,97$$

Рис.3 - Зовнішня характеристика трансформатора

### 3. Побудова Т-подібної схеми заміщення трансформатора

Зобразимо Т-подібну схему заміщення однієї фази трансформатора на рис. 2.

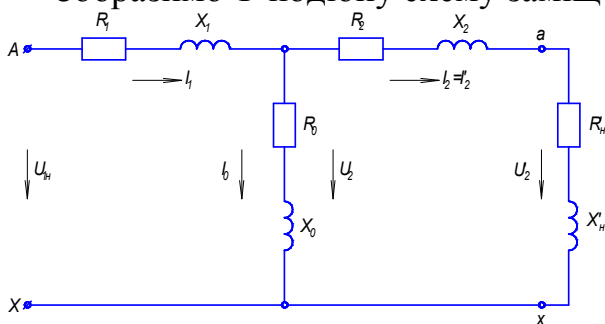


Рис.2 – Т-образна схема заміщення фази трансформатора

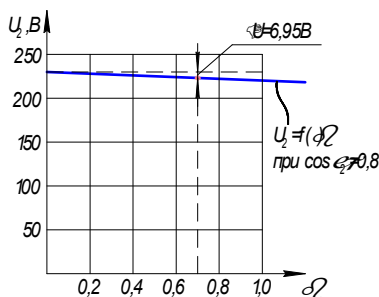
### 4. Знаходження напружень на окремих ділянках кола

Побудуємо зовнішню характеристику трансформатора  $U_2 = f(\beta)$  при  $\beta = 0,7$  і  $\cos \varphi_2 = 0,8$  (рис. 3).

Вихідні дані для побудови:

при  $\beta = 0$   $U_2 = U_{20} = 230 \text{ В}$

при  $\beta = 0,7$   $U_2 = 223,05 \text{ В}$



Приймаємо масштаб:

$$\mu_u = 50 \frac{\text{В}}{\text{мм}}$$

Побудуємо векторну діаграму фази навантаженого трансформатора.

Вихідні дані для побудови векторної діаграми:

$$U_{1\text{н}} = 11547 \text{ В}; \quad U_{20} = U_2 = 230 \text{ В}; \quad I_0 = 0,05 \text{ А}; \quad \angle \delta = 8,63^\circ; \quad \angle \varphi_0 = 81,37^\circ$$

Робочі струми обмоток:

$$I_1 = \beta \cdot I_{1\text{н}} = 0,7 \cdot 1,82 = 1,27 \text{ А}$$

$$I_2 = \beta \cdot I_{2\text{н}} = 0,7 \cdot 158,14 = 110,7 \text{ А}$$

тора

Напруга на вторинній обмотці при навантаженні трансформатора:

$$U_2 = 223,05 \text{ \AA}$$

Так як  $\cos \varphi_2 = 0,8$ , тоді  $\angle \varphi_2 = U_2 \wedge I_2 = 36,87^\circ$

Падіння напруги на опорах первинної обмотки:

$$R_1 \cdot I_1 = 73,965 \cdot 1,3 = 96,16 \text{ В}$$

$$X_1 \cdot I_1 = 129,455 \cdot 1,3 = 168,29 \text{ В}$$

Для побудови векторної діаграми розраховуємо наведені вторинні величини:

$$U'_2 = U_2 \cdot K = 223,05 \cdot 86,5 = 19394 \text{ \AA} - \text{приведена вторинна напруга при навантаженні};$$

$$I'_2 = \frac{I_2}{K} = \frac{110,7}{86,95} = 1,27 \text{ \AA} - \text{наведений вторинний струм};$$

$$R'_2 \cdot I'_2 = R_1 \cdot I_1 = 96,16 \text{ В}$$

$$X'_2 \cdot I'_2 = X_1 \cdot I_1 = 168,29 \text{ В}$$

- падіння напруги у вторинній обмотці наведеного трансформатора.

Приймаємо масштаби:

$$\mu_u = 50 \frac{\text{\AA}}{\text{mm}} \quad \mu_i = 0,05 \frac{\text{\AA}}{\text{mm}}$$

Отримана діаграма показана на рис. 4.

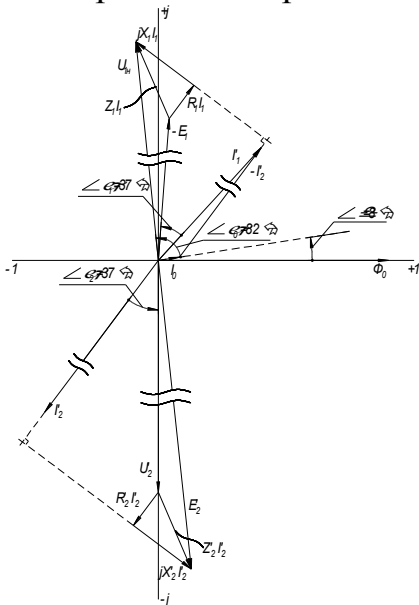
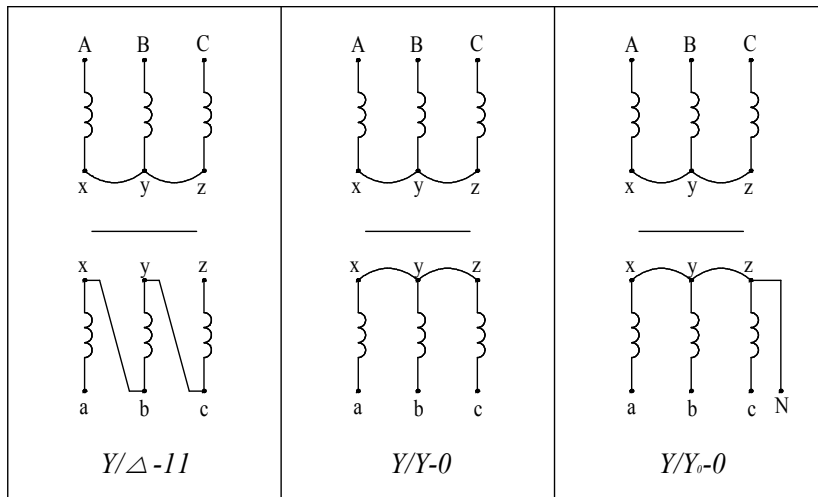


Рис.4 – Векторна діаграма фази навантаженого трансформатора

Після освоєння основних теоретичних положень трифазного трансформатора студент може приступити до виконання завдання 3



Таблиця 3

Варіант	Група з'єднань	Дані для розрахунку						
		$S_{\text{ном}}$ , кВА	$U_{1 \text{ ном}}$ , В	$U_{20}$ , В	$U_k$ , %	$P_k$ , Вт	$P_0$ , Вт	$L_0$ , %
0	$Y/Y_0 - 0$	10	6300	400	5,0	335	105	10,0
1	$Y/\Delta - 11$	20	6300	230	5,0	600	180	9,0
2	$Y/Y_0 - 0$	30	10000	400	5,0	850	300	9,0
3	$Y/Y_0 - 0$	50	10000	400	5,0	1325	440	8,0
4	$Y/Y_0 - 0$	75	10000	230	5,0	1875	590	7,5
5	$Y/Y_0 - 0$	100	10000	525	5,0	2400	730	7,5
6	$Y/\Delta - 11$	180	10000	525	5,0	4100	1200	7,0
7	$Y/Y_0 - 0$	240	10000	525	5,0	5100	1600	7,0
8	$Y/\Delta - 11$	320	35000	10500	6,5	6200	2300	7,5
9	$Y/Y_0 - 0$	420	10000	525	5,5	7000	2100	6,6
10	$Y/Y_0 - 0$	25	6000	230	4,5	600	125	3,0
11	$Y/Y_0 - 0$	25	10000	230	4,7	690	125	3,0
12	$Y/\Delta - 11$	25	6000	400	4,5	600	125	3,0
13	$Y/\Delta - 11$	25	10000	400	4,7	690	125	3,0
14	$Y/Y_0 - 0$	40	10000	230	4,5	880	180	3,0
15	$Y/Y_0 - 0$	40	6000	230	4,5	880	180	3,0
16	$Y/Y_0 - 0$	40	6000	400	4,7	1000	180	3,0
17	$Y/\Delta - 11$	40	10000	400	4,0	690	125	3,2
18	$Y/\Delta - 11$	63	6000	230	4,5	1280	260	2,8
19	$Y/\Delta - 11$	63	6000	400	4,5	1280	260	2,0
20	$Y/\Delta - 11$	63	10000	230	4,7	1470	260	2,8
21	$Y/Y_0 - 0$	63	10000	400	4,7	1470	260	2,8
22	$Y/Y_0 - 0$	63	2000	400	4,7	1470	260	2,8
23	$Y/Y - 0$	63	20000	230	4,7	1470	260	2,8
24	$Y/Y - 0$	63	2000	400	4,5	1280	230	2,8
25	$Y/\Delta - 11$	100	10000	230	4,7	2270	365	2,6
26	$Y/\Delta - 11$	100	10000	400	4,7	2270	365	2,6
27	$Y/\Delta - 11$	100	6000	230	4,5	1970	365	2,6
28	$Y/Y_0 - 0$	100	6000	400	4,5	1970	365	2,6

29	$Y/\Delta -11$	100	20000	230	4,7	2270	465	2,6
30	$Y/Y_0 - 0$	100	20000	400	4,7	2270	465	2,6
31	$Y/\Delta -11$	100	35000	230	4,7	2270	465	2,6
32	$Y/Y_0 - 0$	100	35000	400	4,7	2270	465	2,6
33	$Y/\Delta -11$	160	6000	230	4,5	2650	540	2,4

Продовження таблиці 3

Варіант	Група з'єднань	Дані для розрахунку						
		$S_{ном},$ кВА	$U_{1 ном},$ В	$U_{20},$ В	$U_k,$ %	$P_k,$ Вт	$P_0,$ Вт	$L_0,$ %
34	$Y/\Delta -11$	160	600	400	4,5	2650	540	2,4
35	$Y/Y_0 - 0$	160	10000	230	4,5	3100	540	2,4
36	$Y/Y_0 - 0$	160	10000	230	4,5	3100	540	2,4
37	$Y/\Delta -11$	160	6000	690	4,5	2650	540	2,4
38	$Y/\Delta -11$	250	6000	230	4,5	3700	780	2,3
39	$Y/\Delta -11$	250	6000	400	4,5	3700	780	2,3
40	$Y/Y_0 - 0$	250	10000	230	4,7	4200	780	2,3
41	$Y/Y_0 - 0$	250	10000	690	4,7	4200	780	2,3
42	$Y/Y_0 - 0$	400	3000	400	4,5	5500	1080	3,2
43	$Y/Y_0 - 0$	400	6000	400	4,5	5500	1080	3,2
44	$Y/Y_0 - 0$	400	6000	690	4,5	5500	1080	3,2
45	$Y/Y_0 - 0$	400	6300	400	4,5	5500	1080	3,2
46	$Y/Y_0 - 0$	400	10000	230	4,5	5500	1080	3,2
47	$Y/Y_0 - 0$	400	10000	400	4,5	5500	1080	3,2
48	$Y/Y_0 - 0$	400	10000	690	4,5	5500	1080	3,2
49	$Y/Y_0 - 0$	630	3000	400	5,0	7600	1680	3,2
50	$Y/Y_0 - 0$	630	6000	400	5,0	7600	1680	3,2
51	$Y/Y - 0$	100	10000	230	5,0	2400	730	7,5
52	$Y/Y_0 - 0$	420	10000	230	5,5	7200	2100	6,5
53	$Y/Y - 0$	100	10000	690	5,0	2400	730	7,5
54	$Y/\Delta -11$	25	6000	230	4,5	600	125	3,0
55	$Y/\Delta -11$	40	6000	400	4,0	690	125	3,2
56	$Y/\Delta -11$	63	10000	525	4,5	1280	260	2,8
57	$Y/\Delta -11$	180	10000	230	4,8	4100	1200	7,0
58	$Y/Y - 0$	100	10000	400	5,0	2400	730	7,5
59	$Y/Y - 0$	240	10000	230	5,5	1875	590	7,5
60	$Y/Y - 0$	420	10000	400	5,5	7200	2100	6,5
61	$Y/Y - 0$	560	6000	400	4,2	7000	1970	3,5
62	$Y/\Delta -11$	180	10000	400	4,8	4100	1200	7,0
63	$Y/\Delta -11$	630	6000	400	5,5	7600	1680	3,0
64	$Y/\Delta -11$	1000	6000	400	5,5	12200	2450	2,8
65	$Y/Y_0 - 0$	420	10000	690	5,5	7200	2100	6,5
66	$Y/Y - 0$	240	10000	400	5,5	1875	590	7,5
67	$Y/Y - 0$	560	6000	230	4,2	7000	1970	3,5

Продовження таблиці 3

Варіант	Група з'єднань	Дані для розрахунку						
		$S_{\text{ном, кВА}}$	$U_{1 \text{ ном, В}}$	$U_{20, В}$	$U_k, \%$	$P_k, Вт$	$P_0, Вт$	$L_0, \%$
68	Y/Δ -11	1000	6000	525	5,5	12200	2450	2,8
69	Y/Δ -11	60	35000	400	4,5	1208	502	3,5
70	Y/Δ -11	180	10000	690	4,8	4100	1200	7,0
71	Y/Y - 0	240	10000	690	5,5	1875	590	7,5
72	Y/Y <sub>0</sub> - 0	420	10000	3150	5,5	7200	2100	6,5
73	Y/Δ -11	180	10000	3150	4,8	4100	1200	7,0
74	Y/Δ -11	40	6000	525	4,0	690	125	3,2
75	Y/Δ -11	630	6000	690	5,5	7600	1680	3,0
76	Y/Δ -11	60	10000	400	4,2	1208	502	2,8
77	Y/Y - 0	240	10000	3150	5,5	1875	590	7,5
78	Y/Y <sub>0</sub> - 0	630	6000	230	5,5	7600	1680	3,0
79	Y/Y - 0	560	6000	690	4,5	7000	1970	3,5
80	Y/Δ -11	60	10000	525	4,2	1208	502	2,8
81	Y/Δ -11	630	6000	3150	5,5	7600	1680	3,0
82	Y/Δ -11	1000	6000	690	5,5	12200	2450	2,5
83	Y/Y <sub>0</sub> - 0	30	6000	400	5,5	850	300	9,0
84	Y/Y <sub>0</sub> - 0	10	6300	525	5,0	335	105	10,0
85	Y/Δ -11	630	1000	690	5,5	7600	1680	3,0
86	Y/Y <sub>0</sub> - 0	75	6000	400	5,0	1875	590	7,5
87	Y/Y <sub>0</sub> - 0	50	6000	525	5,0	1325	440	8,0
88	Y/Y <sub>0</sub> - 0	160	6000	525	4,5	3100	540	2,4
89	Y/Δ -11	630	10000	400	5,5	7600	1680	3,0
90	Y/Δ -11	60	10000	690	4,2	1208	502	2,8
91	Y/Y <sub>0</sub> - 0	160	6000	400	4,5	3100	540	2,4
92	Y/Y <sub>0</sub> - 0	250	6000	400	4,7	4200	780	2,3
93	Y/Y <sub>0</sub> - 0	30	6000	525	5,0	850	300	9,0
94	Y/Δ -11	250	10000	525	4,5	3700	780	2,8
95	Y/Δ -11	20	10000	400	5,0	600	180	9,0
96	Y/Y <sub>0</sub> - 0	25	6000	400	4,7	690	125	3,0
97	Y/Y <sub>0</sub> - 0	63	6000	525	4,7	1470	260	2,8
98	Y/Δ -11	630	10000	2300	5,5	9600	1680	3,0
99	Y/Δ -11	60	10000	3150	4,2	1208	502	2,8
100	Y/Δ -11	40	10000	690	4,0	690	125	3,2