

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

# **ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА АВТОМАТИКА**

**методичні вказівки**  
**до виконання лабораторно - практичних робіт**  
**Частина 1**



**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Кафедра «Енергетики та електротехнічних систем»

# **ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА АВТОМАТИКА**

**методичні вказівки**  
**до виконання лабораторно - практичних робіт**  
**Частина 1**  
для студентів 2 та 1 с.т. курсів спеціальності  
208 "Агроінженерія"  
ОС «Бакалавр»  
денної та заочної форм навчання

**Укладачі:** к.т.н., доцент кафедри енергетики та електротехнічних систем – Сіренко В. Ф., ст. викладач кафедри енергетики та електротехнічних систем – Савойський О.Ю., асистент кафедри енергетики та електротехнічних систем – Вольвач Т.С.

Електротехніка. Методичні вказівки до виконання лабораторно – практичних робіт для студентів 2 та 1 с.т. курсів спеціальності 208 "Агроінженерія" ОС «Бакалавр» денної та заочної форм навчання. Частина 1. – Суми: Сумський національний аграрний університет, 2022. - 44 с.

Методичні вказівки спрямовані на надання методичної допомоги студентам під час виконання лабораторно-практичних робіт. Містять загальні методичні рекомендації, практичні завдання та питання для самоконтролю знань.

**Рецензенти:**

**Барсукова Г. В.** - кандидат технічних наук, ст. викладач кафедри енергетики та електротехнічних систем СНАУ.

**Ярошенко П. М.** - кандидат технічних наук, доцент кафедри експлуатації техніки СНАУ

**Відповідальний за випуск:** к.т.н., ст. викладач, завідувач кафедри енергетики та електротехнічних систем – Чепіжний А.В.

Рекомендовано до видання навчально-методичною радою інженерно-технологічного факультету (протокол № 6 від 25 травня 2022 року).

## Зміст

|                                                                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. <i>Лабораторно – практичне заняття №1.</i> Дослідження елементів електричних кіл постійного струму.....                                        | 6  |
| 2. <i>Лабораторно – практичне заняття №2.</i> Дослідження послідовного з'єднання активних і реактивних опорів при дії синусоїдальної напруги..... | 11 |
| 3. <i>Лабораторно – практичне заняття №3.</i> Дослідження паралельного з'єднання R, L, C.....                                                     | 16 |
| 4. <i>Лабораторно – практичне заняття №4.</i> Дослідження 3-х фазного кола при з'єднанні приймачів зіркою.....                                    | 22 |
| 5. <i>Лабораторно – практичне заняття №5.</i> Дослідження реле захисту потужних електроустановок.....                                             | 25 |
| 6. <i>Лабораторно – практичне заняття №6.</i> Дослідження однофазного трансформатора.....                                                         | 29 |
| 7. <i>Лабораторно – практичне заняття №7.</i> Дослідження трифазного асинхронного двигуна.....                                                    | 32 |
| 8. <i>Лабораторно – практичне заняття №8.</i> Дослідження електромагнітних контакторів і магнітних пускачів.....                                  | 35 |
| 9. <i>Лабораторно – практичне заняття №9.</i> Дослідження теплових реле захисту.....                                                              | 40 |

## ЛАБОРАТОРНО – ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ №1.

### ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

**Мета:** оволодіти методиками розрахунку ел. кіл постійного струму

Відповідно до варіанта розрахувати електричне коло, (рис. 1.1-1.10) та виконати такі операції:

- 1) спростити схему шляхом заміни послідовно й паралельно з'єднаних опорів еквівалентними;
- 2) методом законів Кірхгофа;
- 3) скласти баланс потужності для вихідної (не спрощеної схеми).

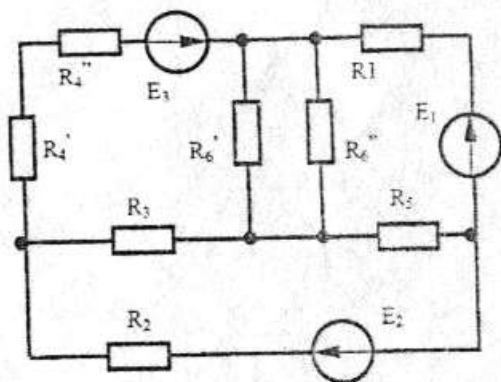


Рис. 1.1

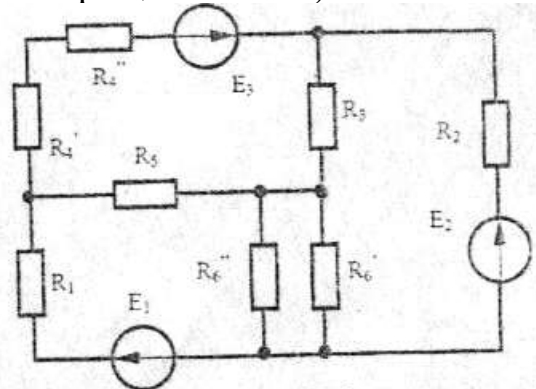


Рис. 1.2

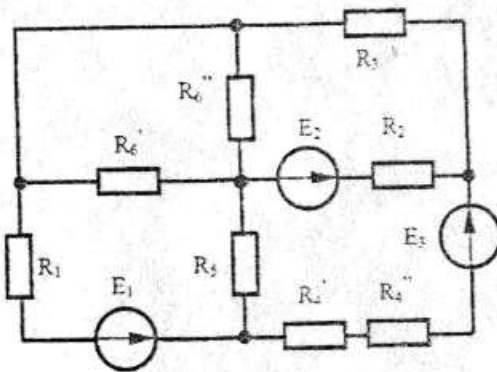


Рис. 1.3

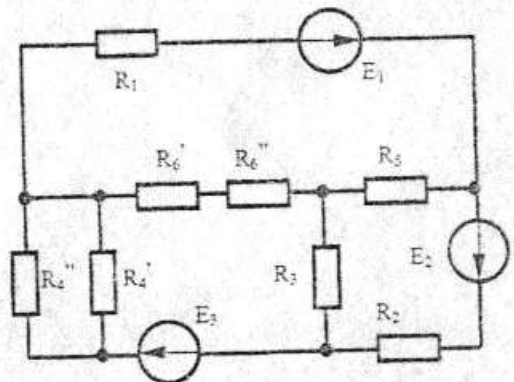


Рис. 1.4

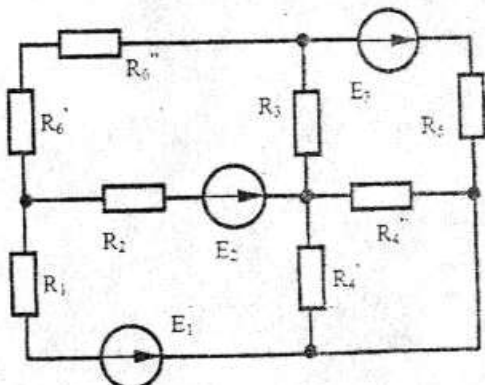


Рис. 1.5

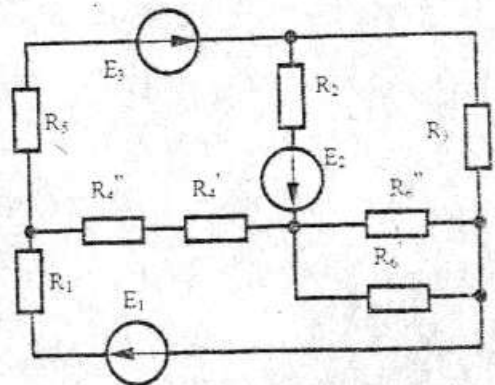


Рис. 1.6

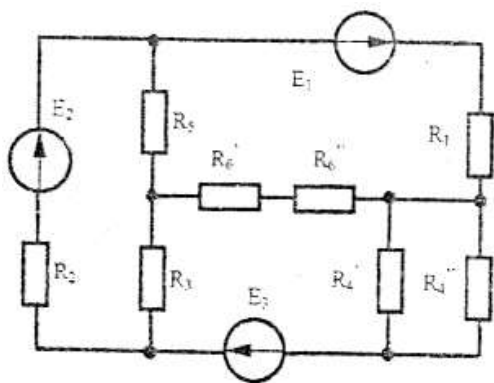


Рис. 1.7

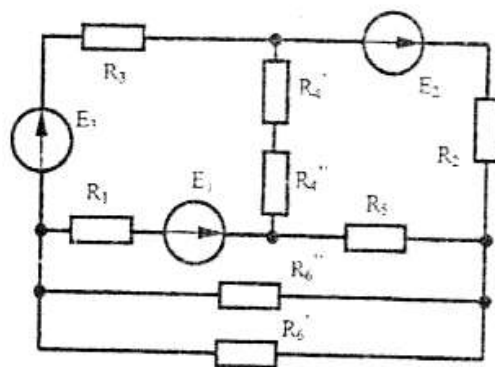


Рис. 1.8

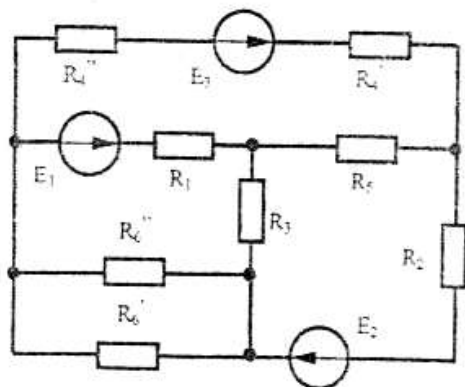


Рис. 1.9

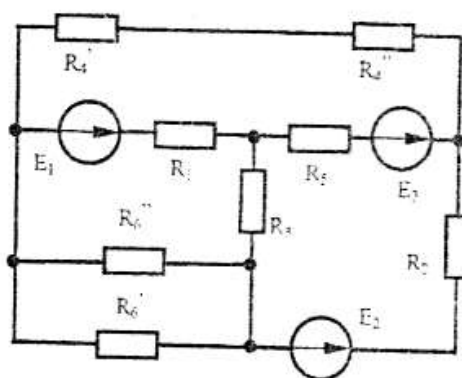


Рис. 1.10

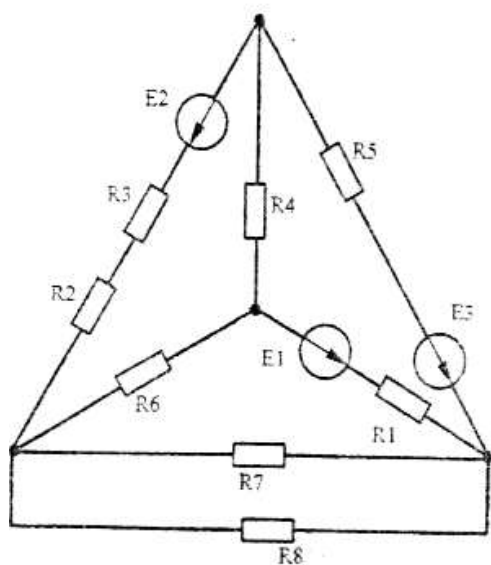


Рис. 1.11

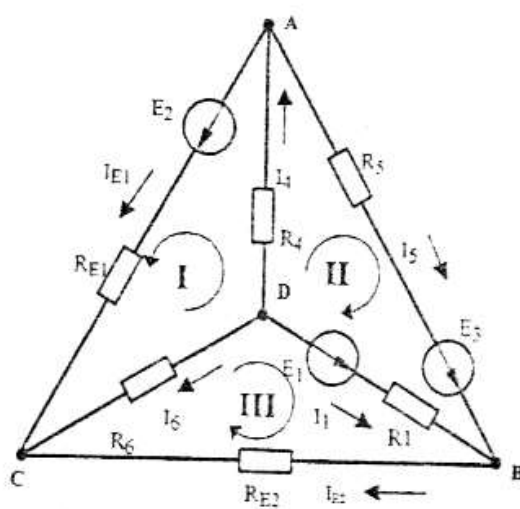


Рис. 1.12

## 1.2. Вказівки до вибору варіанта

Розрахункову схему і вихідні дані вибирати з табл. 1.1 та 1.2 згідно з останніми двома цифрами залікової книжки (шифру).

Таблиця 1.1

| Розрахункові дані  | Число одиниць шифру |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|--------------------|---------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                    | 0                   | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   |
| Рис.№              | 1.10                | 1.1 | 1.2 | 1.3 | 1.4 | 1.5 | 1.6 | 1.7 | 1.8 | 1.9 |
| E <sub>1</sub> , В | 200                 | 220 | 150 | 150 | 100 | 220 | 250 | 180 | 127 | 180 |
| E <sub>2</sub> , В | 200                 | 150 | 80  | 120 | 200 | 180 | 220 | 230 | 150 | 180 |
| E <sub>3</sub> , В | 50                  | 70  | 200 | 100 | 80  | 90  | 40  | 50  | 180 | 150 |

Таблиця 1.2

| Розрахункові дані     | Число одиниць шифру |    |     |     |     |     |     |     |    |    |
|-----------------------|---------------------|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|
|                       | 0                   | 1  | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8  | 9  |
| R <sub>1</sub> , Ом   | 160                 | 6  | 30  | 65  | 10  | 20  | 40  | 35  | 15 | 30 |
| R <sub>2</sub> , Ом   | 90                  | 18 | 40  | 60  | 20  | 30  | 20  | 25  | 20 | 15 |
| R <sub>3</sub> , Ом   | 65                  | 80 | 60  | 30  | 40  | 35  | 38  | 45  | 30 | 25 |
| R <sub>4</sub> ', Ом  | 50                  | 12 | 8   | 12  | 150 | 120 | 25  | 30  | 85 | 45 |
| R <sub>4</sub> '', Ом | 150                 | 6  | 12  | 100 | 60  | 40  | 20  | 120 | 10 | 10 |
| R <sub>5</sub> , Ом   | 30                  | 10 | 35  | 70  | 35  | 50  | 45  | 40  | 40 | 50 |
| R <sub>6</sub> ', Ом  | 75                  | 36 | 150 | 35  | 20  | 100 | 120 | 25  | 60 | 70 |
| R <sub>6</sub> '', Ом | 180                 | 50 | 80  | 15  | 50  | 80  | 60  | 15  | 90 | 80 |

### 1.3. Методичні вказівки до аналізу кіл постійного струму

Важливим етапом розрахунку простого електричного кола (містить одне джерело ЕРС — Е), є визначення еквівалентного опору  $R_{екв}$  кола або його ділянок. За послідовного з'єднання л омічних опорів й, значення еквівалентного опору  $R_{екв}$  (Ом) та за паралельного з'єднання опорів - значення еквівалентної провідності  $g_{екв}$  (См) розраховують за формулами, відповідно:

$$R_{екв} = \sum_{i=1}^n R_i; \quad g_{екв} = R_{екв}^{-1} = \sum_{i=1}^n g_i = \sum_{i=1}^n R_i^{-1}.$$

Струм кола визначають за законом Ома:

$$I = E/R_{екв}; \quad I = E g_{екв},$$

або за першим законом Кірхгофа,

Спади напруг у вітках кола визначають з застосуванням закону Ома або другого закону Кірхгофа.

Для аналізу розгалужених кіл з кількома джерелами енергії (складних кіл) використовують спеціальні методи: метод законів Кірхгофа, контурних струмів, накладання, вузлових потенціалів, еквівалентного генератора та інші. Алгоритми використання перших двох методів покажемо на прикладі числового розрахунку електричного кола, зображеного на рис.1.11 при:  $R_1=5$  Ом,  $R_2=10$  Ом,  $R_3=15$  Ом,  $R_4=20$  Ом,  $R_5=15$  Ом,  $R_6=10$  Ом,  $R_7=40$  Ом,  $R_8=60$  Ом,  $E_1=40$ В,  $E_2=30$ В,  $E_3=20$ В.

З метою спрощення розрахункової схеми: послідовно ввімкнені опори  $R_2$  та  $R_3$  замінимо еквівалентним опором  $R_{E1}$ , Ом:

$$R_{E1} = R_2 + R_3 = 25,$$

а паралельно з'єднані опори  $R_7$  та  $R_8$  — еквівалентних  $R_{E2}$ , Ом:



$$\frac{1}{R_{E2}} = \frac{1}{R_7} + \frac{1}{R_8}; \quad R_{E2} = \frac{40 \cdot 60}{40 + 60} = 24.$$

Після спрощення схема буде мати вигляд, зображений на рис. 1.12.

Незалежно від методу розв'язання задачі спочатку потрібно визначити кількість віток  $p$ , електричних вузлів  $m$  та незалежних (які відрізняються хоч би однією новою віткою, але всередині яких немає віток) контурів  $k$  кола.

Для схеми, наведеної на рис. 1.12, маємо: шість віток ( $p=6$ ) — AB, BC, CA, AD, BD, CD; чотири вузли ( $m=4$ ) — A, B, C, D.

Кількість незалежних контурів

$$k=p-(m-1)$$

Для схеми маємо три незалежних контури: I — ACD, II — ABD, III — CDB.

Далі довільно задаємось напрямками дії струмів у вітках ( $I_1$ – $I_6$ ) та напрямками обходу незалежних контурів кола — напрямки дії контурних струмів  $I_I, I_{II}, I_{III}$ .

У разі розв'язання задачі методом законів Кірхгофа для кола, що містить  $p$  віток та  $m$  вузлів складають систему із  $p$  рівнянь. При цьому, ( $m-1$ ) рівняння складають за першим, і  $k$ : рівнянь — за другим законами Кірхгофа. Для схеми Рис.1.12 система рівнянь має такий вигляд:

$$\begin{cases} I_4 - I_5 - I_{E1} = 0 - \text{для вузла } A; \\ I_1 + I_5 - I_{E2} = 0 - \text{для вузла } B; \\ I_6 + I_{E1} + I_{E2} = 0 - \text{для вузла } C; \\ R_{E1}I_{E1} + R_4I_4 - R_6I_6 = E_2 - \text{для контуру } I; \\ R_5I_5 + R_4I_4 - R_1I_1 = E_3 - E_1 - \text{для контуру } II; \\ R_1I_1 + R_{E2}I_{E2} - R_6I_6 = E_1 - \text{для контуру } III. \end{cases}$$

Після підстановки значень  $R_1 \dots R_6, E_1 \dots E_3$  та розв'язання системи відносно струмів (A) у вітках кола одержимо:

$$\begin{aligned} I_1 &= 1,501; & I_{E1} &= 0,676; & I_{E2} &= 0,756; \\ I_4 &= -0,066; & I_5 &= -0,745; & I_6 &= -1,432. \end{aligned}$$

У даному випадку маємо від'ємні значення  $I_4, I_5$ , та  $I_6$ . Це означає, що напрямки дії цих струмів у вітках обрані не правильно, але змінювати їх на протилежні не потрібно.

Визначимо струми у вітках, де були виконані спрощення.

У послідовно з'єднаних елементах  $R_2$  та  $R_3$  протікає один й той самий струм  $I_{E1}$ , (A):

$$I_2 = I_3 = I_{E1} = 0,676.$$

Для визначення струмів у вітках, що на вихідній схемі (див. рис. 1.11) з'єднані паралельно за законом Ома, обчислимо спад напруги  $U_{E2}$  (B) на еквівалентному опорі:

$$U_{E1} = I_{E2} R_{E2} = 18,144.$$

Струми (A), що протікають через опори  $R_2$  та  $R_8$  будуть, відповідно:

$$I_7 = \frac{U_{E2}}{R_7} = 0,454; \quad I_8 = \frac{U_{E2}}{R_8} = 0,302.$$

У разі розв'язання задачі за методом контурних струмів довільно задаються напрямками дії струмів  $I_I, I_{II}, I_{III}$  у незалежних контурах (напрямами обходу контурів) і складають систему з  $k=p-(m-1)$  рівнянь за другим законом Кірхгофа. При цьому струми у вітках, що є спільними для двох контурів, визначають як алгебраїчну суму відповідних контурних струмів. Система рівнянь для контурів розрахункової схеми має такий вигляд:

$$\begin{cases} (R_4 + R_6 + R_{E1})I_I + R_4I_{II} + R_6I_{III} = E_2; \\ R_4I_I + (R_1 + R_5 + R_4)I_{II} - R_1I_{III} = E_3 - E_1; \\ R_6I_6 - R_1I_{II} + (R_6 + R_{E2} + R_1)I_{III} = E_1. \end{cases}$$

Після підстановки значень  $R_1 \dots R_6$ ,  $E_1 \dots E_3$  та розв'язання системи рівнянь відносно контурних струмів (А) одержимо:

$$I_I = 0,679; \quad I_{II} = -0,745; \quad I_{III} = 0,756.$$

Струми (А) у вітках, які належать одному контуру, дорівнюють відповідним контурним струмам:

$$I_{E1} = I_I = 0,679; \quad I_5 = I_{II} = -0,745; \quad I_{E2} = I_{III} = 0,756.$$

Струми (А) у вітках, що є спільними для двох контурів, визначають за першим законом Кірхгофа:

$$I_1 = I_{III} + I_{II} = 1,501; \quad I_4 = I_{II} - I_I = 0,066; \quad I_6 = I_{II} + I_{III} = 1,432.$$

*Баланс потужностей* (Вт) джерел  $P_{дж}$  та споживачів  $P_{сп}$  кола складають на підставі закону Джоуля-Ленца:

$$P_{дж} = \sum (EI) = E_1I_1 + E_2I_2 - E_3I_5 = 40 \cdot 1,501 + 30 \cdot 0,679 - 20 \cdot 0,745 = 65,427;$$

$$\begin{aligned} P_{сп} &= \sum (I^2R) = I_1^2R_1 + I_2^2R_2 + I_3^2R_3 + I_4^2R_4 + I_5^2R_5 + I_6^2R_6 + I_7^2R_7 + I_8^2R_8 = \\ &= 1,501^2 \cdot 5 + 0,679^2 \cdot 10 + 0,679^2 \cdot 15 + 0,066^2 \cdot 20 + \\ &+ 0,745 \cdot 15 + 1,432^2 \cdot 10 + 0,454^2 \cdot 40 + 0,302^2 \cdot 60 = 65,51. \end{aligned}$$

Задачу вважають розв'язаною, якщо відносна розбіжність результатів розрахунків  $P_{дж}$  та  $P_{сп}$  не перебільшує  $\pm 1,0\%$ :

$$\Delta = \frac{P_{дж} - P_{сп}}{P_{дж}} 100\% < \pm 1,0\%.$$

### Контрольні запитання

1. Охарактеризувати основні методи розрахунку електричних кіл?
2. Вказати порядок аналізу електричних кіл?
3. Навести аналіз одного з електричних кіл наведеного в завданні?
4. Розрахувати одне з електричних кіл методом Кірхгофа?

## ЛАБОРАТОРНО – ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ №2.

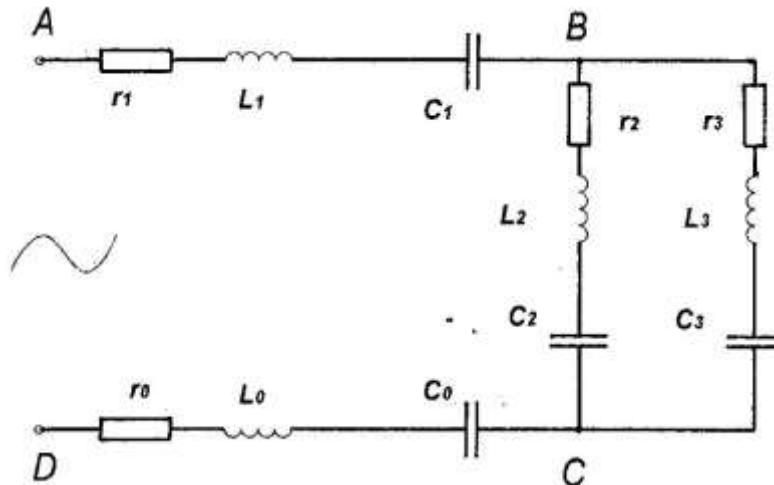
### ДОСЛІДЖЕННЯ ПОСЛІДОВНОГО З'ЄДНАННЯ АКТИВНИХ І РЕАКТИВНИХ ОПОРІВ ПРИ ДІЇ СИНУСОЇДАЛЬНОЇ НАПРУГИ

**Мета роботи:** Оволодіти методиками розрахунку ел. кіл синусоїдного струму

#### 2.1. Обсяг завдання

Відповідно до варіанта розрахувати електричне коло, зображене на рис.2.1 та виконати такі операції:

- 1) спростити схему та визначити опір кола відносно затискачів джерела синусоїдного струму частотою  $f = 50\text{Гц}$ ;
- 2) визначити струми та спади напруг всіх ділянок кола;



- 3) скласти баланс потужності джерела та споживачів, порівнявши окремо активні та реактивні потужності;
- 4) на комплексній площині побудувати суміщену векторну діаграму струмів і напруг.

#### 2.2. Вказівки до вибору варіанта

Значення напруги на ділянці кола, опір активних елементів, індуктивність і ємність реактивних елементів розрахункової схеми вибирають з таблиці згідно з останніми двома цифрами (одиниці та десятки) залікової книжки (шифру) або за кодовим номером, що його встановлює викладач.

Таблиця 2.1

| Число<br>десятків<br>шифру | U,<br>В | Активний<br>опір, Ом |                |                |                | Число<br>одиниць<br>шифру | Індуктивність,<br>мГн |                |                |                | Ємність,<br>мкФ |                |                |                |
|----------------------------|---------|----------------------|----------------|----------------|----------------|---------------------------|-----------------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|
|                            |         | r <sub>0</sub>       | r <sub>1</sub> | r <sub>2</sub> | r <sub>3</sub> |                           | L <sub>0</sub>        | L <sub>1</sub> | L <sub>2</sub> | L <sub>3</sub> | C <sub>0</sub>  | C <sub>1</sub> | C <sub>2</sub> | C <sub>3</sub> |
| 0                          | 110     | -                    | 12             | 20             | 19             | 0                         | 16                    | 24             | 32             | -              | -               | 300            | 350            | 400            |
| 1                          | 127     | 2                    | -              | 18             | 17             | 1                         | 40                    | 48             | -              | 58             | 450             | -              | 500            | 600            |
| 2                          | 60      | 4                    | 7              | -              | 15             | 2                         | 60                    | -              | 55             | 50             | 650             | 700            | -              | 750            |
| 3                          | 36      | 6                    | 9              | 14             | -              | 3                         | -                     | 45             | 50             | 55             | 300             | 350            | 400            | -              |
| 4                          | 100     | 8                    | 11             | -              | 11             | 4                         | 25                    | -              | 30             | 35             | 450             | 500            | -              | 550            |
| 5                          | 200     | 10                   | -              | 10             | 9              | 5                         | 40                    | 45             | -              | 50             | 600             | -              | 650            | 700            |
| 6                          | 127     | -                    | 15             | 8              | 7              | 6                         | 55                    | 60             | 65             | -              | -               | 800            | 850            | 900            |
| 7                          | 130     | 14                   | -              | 6              | 5              | 7                         | 75                    | 70             | -              | 60             | 300             | -              | 350            | 400            |
| 8                          | 220     | 16                   | 19             | -              | 3              | 8                         | 50                    | -              | 55             | 60             | 450             | 500            | -              | 550            |
| 9                          | 42      | 18                   | 10             | 2              | -              | 9                         | -                     | 45             | 70             | 35             | 600             | 650            | 300            | -              |

### 2.3. Методичні вказівки до аналізу

На відміну від кіл постійного струму, де наявний тільки омичний опір  $R$ , в колах змінного струму розрізняють активний  $r$  (аналог омичного), реактивний  $x$  (індуктивний —  $x_L = 2\pi fL$  та ємнісний —  $x_C = (2\pi fC)^{-1}$ ) і повний  $Z$  опори. Разом з тим, методики розрахунків кіл змінного і постійного струму по суті аналогічні.

За послідовного з'єднання  $n$  активних  $r$ , індуктивних  $x_L$  та ємнісних  $x_C$  опорів, повний опір кола (ділянки) розраховують за такою формулою:

$$Z = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n r_i\right)^2 + \left[\sum_{i=1}^n (x_L)_i - \sum_{i=1}^n (x_C)_i\right]^2}.$$

У розрахунках паралельного з'єднання використовують поняття провідності: активна —  $g=1/r$ ; реактивна —  $b=1/(X_L-X_C)$ ; повна —  $Y=1/Z=\sqrt{g^2+b^2}$ .

Струми та спади напруг на ділянках кола розраховують за законом Ома або з використанням законів Кірхгофа. Проте у разі застосування законів Кірхгофа діючі значення струмів і напруг, на відміну від кіл постійного струму, сумують не алгебраїчно, а геометрично. Щоб зменшити похибку, геометричні дії з векторами електричних величин часто замінюють алгебраїчними операціями з комплексними числами. Звідси поділ методів розрахунку розгалужених кіл змінного струму на класичний (провідностей) та символічний (комплексних чисел). Зазначимо, що використання символічного методу дає можливість суттєво скоротити розрахунок кола та одержувати результати у формі, більш прийнятній для аналізу процесів, які відбуваються у колі.

Методику використання символічного методу для аналізу розгалуженого кола змінного струму покажемо на прикладі числового розрахунку схеми, наведеної на

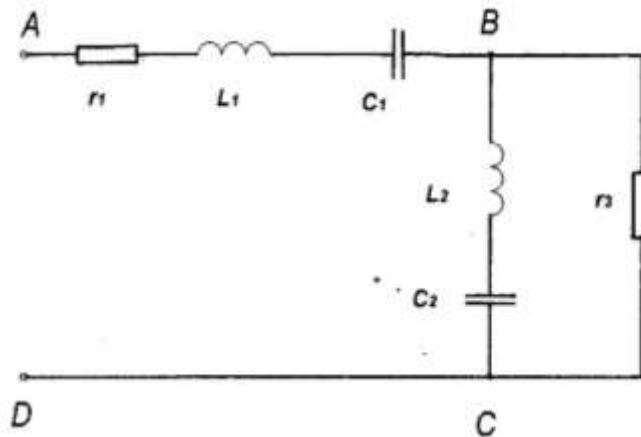


рис.2.1, де  $U_{AB}=110$  В,  $f=50$  Гц,  $r_1=5$  Ом,  $r_3=1$  ГОм,  $L_1=47,75$  мГн,  $L_2=32,84$  мГн,  $C_1=318,3$  мкФ,  $C_2=212,2$  мкФ.

Обчислимо струми у вітках кола складанням балансу потужності джерела та споживачів

доведемо правильність зроблених обчислень, побудуємо суміщену діаграму струмів та напруг кола та проаналізуємо характер навантажень у вітках і всього кола.

Відповідно до завдання створимо розрахункову схему (рис.2.2), в яку ввійдуть тільки ті елементи, значення яких в завданні не дорівнює нулю. За заданими значеннями індуктивності  $L$  та ємності  $C$  розраховуємо реактивні опори (Ом) ділянок кола:

$$\begin{aligned} X_{L1} &= 2\pi fL_1 = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 47,75 \cdot 10^{-3} = 15; \\ X_{C1} &= (2\pi fC_1)^{-1} = (2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 318,6 \cdot 10^{-6})^{-1} = 10; \\ X_{L2} &= 2\pi fL_2 = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 31,84 \cdot 10^{-3} = 10; \end{aligned}$$

$$X_{C3} = (2\pi f C_3)^{-1} = (2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 212,2 \cdot 10^{-6})^{-1} = 15$$

Далі визначаємо комплекси опорів (Ом) відповідних ділянок кола:

$$\underline{Z}_1 = r_1 + j(X_{L1} - X_{C1}) = 5 + j5 = 7,07e^{j45^\circ};$$

$$\underline{Z}_2 = r_2 + jX_{L2} = 5 + j10 = 11,66e^{j59,03^\circ};$$

$$\underline{Z}_3 = r_3 + jX_{C3} = 11 - j15 = 18,6e^{-j53,75^\circ}.$$

Подання опорів ділянок у вигляді комплексів дає підстави привести розрахункову схему до вигляду, зображеного на рис.2.3. Тут опори  $\underline{Z}_2$  та  $\underline{Z}_3$  ввімкнені паралельно. Отже, еквівалентний опір (Ом)

$$\underline{Z}_{23} = \frac{\underline{Z}_2 \cdot \underline{Z}_3}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3} = \frac{11,66e^{j59,03^\circ} \cdot 18,6e^{-j53,75^\circ}}{5 + j10 + 11 - j5} = 12,2e^{j21,54^\circ} = 11,35 + j4,48$$

і схема набуває вигляду, поданого на рис. 2. 4.

Подальша заміна ввімкнених послідовно опорів  $\underline{Z}_1$  та  $\underline{Z}_{23}$  еквівалентним  $\underline{Z}_k$  (Ом)

$$\underline{Z}_k = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_{23} = (5 + j5) + (11,35 + j4,48) = 16,35 + j9,48 = 18,9e^{j30,1^\circ}$$

дає підстави спростити розрахункову схему до вигляду, зображеного на рис.2.3.

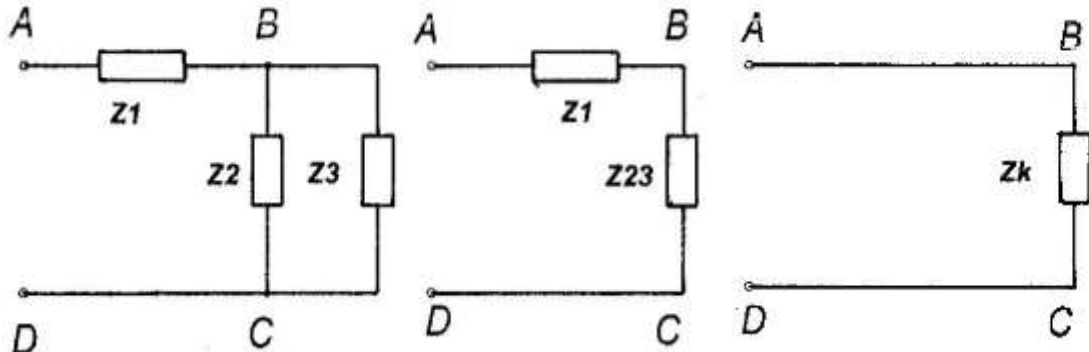


рис.2.3.

Умовно прийемо, що вектор спаду напруги на ділянці АВ спрямовано по осі дійсних чисел комплексної площини. В цьому випадку комплекс напруги (В) ділянки

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_{AB} = 110e^{j0^\circ} = (110 + j0)$$

Комплекс струму кола  $\dot{I}_K$  (А) та комплекси спадів напруг  $\dot{U}_K$  й  $\dot{U}_{23}$  (В) на окремих ділянках схеми розраховують за законом Ома:

$$\dot{I}_K = \frac{\dot{U}_1}{\underline{Z}_1} = \frac{110e^{j0^\circ}}{7,07e^{j45^\circ}} = 15,56e^{-j45^\circ} = (11 - j11);$$

$$\dot{U} = \underline{Z}_K \dot{I}_K = 18,9e^{j30,1^\circ} \cdot 15,56e^{-j45^\circ} = 294,06e^{-j14,9^\circ} = (284,17 - j75,61);$$

$$\dot{U}_{23} = \underline{Z}_{23} \dot{I}_K = 12,2e^{j21,54^\circ} \cdot 15,56e^{-j45^\circ} = 189,83e^{-j23,46^\circ} = (174,15 - j75,59).$$

Правильність обчислення напруг  $\dot{U}_1$ , та  $\dot{U}_{23}$  перевіряють за другим законом Кірхгофа:

$$\dot{U}_K = \dot{U}_\Sigma = \dot{U}_1 + \dot{U}_{23} = (110 + j0) + (174,15 - j75,59) = (284,15 - j75,59).$$

Якщо відносні розбіжності активних і реактивної складових  $\dot{U}_\Sigma$  та  $\dot{U}_K$  не перебільшують  $\pm 1,0\%$

$$\Delta_a = \frac{U_{\Sigma 2} - U_{ka}}{U_{ka}} 100\% = \frac{284,17 - 284,15}{284,17} 100\% = 0,007\% < 1\%;$$

$$\Delta_p = \frac{U_{\Sigma p} - U_{kp}}{U_{kp}} 100\% = \frac{75,59 - 75,61}{75,61} 100\% = 0,03\% < 1\%;$$

розрахунок кола можна продовжувати далі. У іншому разі слід зробити перевірку виконаних обчислень з початку задачі.

Комплекси струмів (А) ділянок кола розраховують так:

$$\begin{aligned}\dot{I}_1 &= \dot{I}_k = 15.56e^{-j45^\circ} = (11 - j11); \\ \dot{I}_2 &= \frac{\dot{U}_{23}}{\underline{Z}_2} = \frac{189.83e^{-j23.46^\circ}}{11.66e^{j59.03^\circ}} = 16.28e^{-j82.49^\circ} = (2.13 - j16.14); \\ \dot{I}_3 &= \frac{\dot{U}_{23}}{\underline{Z}_3} = \frac{189.83e^{-j23.46^\circ}}{18.6e^{-j53.75^\circ}} = 10.21e^{j30.29^\circ} = (8.82 - j5.15).\end{aligned}$$

Правильність обчислення струмів перевіряють за першим законом Кірхгофа:

$$\dot{I}_k = \dot{I}_2 + \dot{I}_3 = (2.13 - j16.14) + (8.82 + j5.15) = (10.95 - j10.99) \approx (11 - j11).$$

Якщо відносні розбіжності активних і реактивних складових  $\dot{I}_\Sigma$  та  $\dot{I}_K$  не перебільшують  $\pm 1,0\%$  розрахунок кола можна продовжувати далі. У іншому разі слід зробити перевірку всіх раніше виконаних дій.

Комплекс повної потужності  $\underline{S}_{дж}$  (ВА) джерела, його активну  $P_{дж}$  та реактивну  $Q_{дж}$  складові визначаємо за такою формулою:

$$\begin{aligned}\underline{S}_{дж} &= \dot{U}_k \dot{I}_k^* = 294.06e^{-j14.9^\circ} \cdot 15.56e^{j45^\circ} = 4575.57e^{j30.1^\circ} = (3958.56 + j2294.69); \\ P_{дж} &= 3958,56 \text{ Вт} \text{ та } Q_{дж} = 2294,69 \text{ вар}.\end{aligned}$$

Комплекс повної потужності  $\underline{S}_{cn}$  (ВА) споживачів кола визначаємо як суму повних потужностей всіх споживачів додаванням їх активних  $P_{cn}$  (Вт) та реактивних  $Q_{cn}$  (вар) складових:

$$\begin{aligned}\underline{S}_1 &= \underline{Z}_1 I_1^2 = 7.07e^{j45^\circ} \cdot 15.56^2 = 1711.74e^{j45^\circ} = (1210.38 + j1210.38); \\ \underline{S}_2 &= \underline{Z}_2 I_2^2 = 11.66e^{j59.03^\circ} \cdot 16.28^2 = 3090.35e^{j59.03^\circ} = (1590.26 + j2649.78); \\ \underline{S}_3 &= \underline{Z}_3 I_3^2 = 18.6e^{-j53.75^\circ} \cdot 10.21^2 = 1938.94e^{-j53.75^\circ} = (1146.51 - j1563.65); \\ \underline{S}_{cn} &= \sum_{i=1}^3 \underline{S}_i = (3947.15 + j2296.51)4566.61e^{j30.19^\circ}.\end{aligned}$$

**Зверніть увагу:** обчислюючи  $\underline{S}_{cn}$ , використовують спряжений комплекс  $\dot{I}_k^* = 15,56e^{j45^\circ}$  від струму кола  $\dot{I}_k = 15,56e^{-j45^\circ}$ ; обчислюючи  $\underline{S}_{cn}$ , до квадрату беруть тільки модуль комплексу струму кола, наприклад модуль комплексу струму  $I = 15,56$  від струму  $\dot{I}_1 = 15,56e^{-j45^\circ}$  А.

Задачу вважають розв'язаною правильно, якщо відносні розбіжності активних і реактивних складових  $\underline{S}_{дж}$  та  $\underline{S}_{cn}$  не перебільшують  $\pm 1,0\%$ :

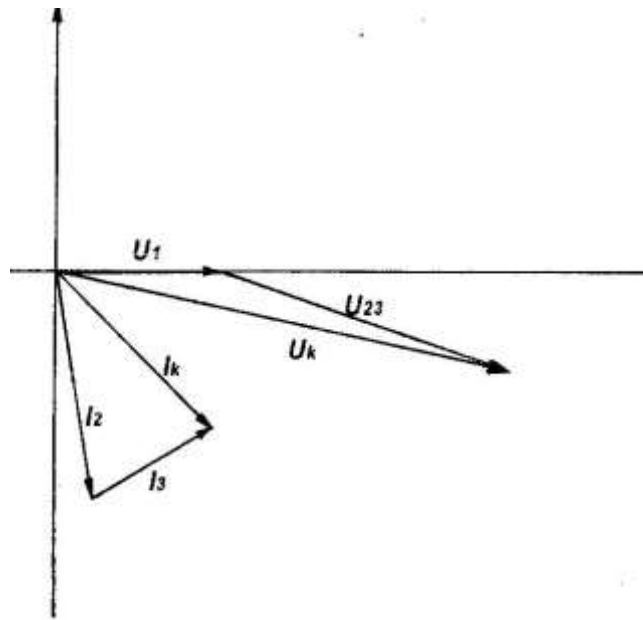


Рис.2.4

$$\Delta_a = \frac{P_{\text{дж}} - P_{\text{сп}}}{P_{\text{дж}}} 100\% < \pm 1.0\%,$$

$$\Delta_p = \frac{Q_{\text{дж}} - Q_{\text{сп}}}{Q_{\text{дж}}} 100\% < \pm 1.0\%,$$

За результатами розрахунків на комплексній площині будують суміщену діаграму струмів та напруг кола (рис. 2.4). Для цього спочатку обирають зручні масштаби побудови векторів струму  $M_i$  (А/мм) і напруги  $M_n$  (В/мм) та вказують їх на комплексній площині. Методика побудови векторів діаграми така:

1)  $\dot{U}_1 = 110e^{j0^\circ}$  - з початку координат по осі дійсних чисел ( $\psi_{uk} = 0$ ) відкласти відрізок завдовжки  $110/M_n$ ;

2)  $\dot{U}_R = 294.06e^{-j14.9^\circ}$  - з початку координат, під кутом  $\psi_{u1} = -14.9^\circ$  до осі дійсних чисел відкласти відрізок завдовжки  $294,06/M_n$ ;

3)  $\dot{U}_{23} = 189.83e^{-j23.46^\circ}$  - з кінця  $\dot{U}_1$  під кутом  $\psi_{u23} = -23.46^\circ$  до осі дійсних чисел відкласти відрізок завдовжки  $189,83/M_n$ ;

4)  $\dot{I}_k = \dot{I}_1 = 15.56e^{-j45^\circ}$  - з початку координат, під кутом  $\psi_{ik} = \psi_{i1} = -45^\circ$  до осі дійсних чисел відкласти відрізок завдовжки  $15,56/M_i$ ;

5)  $\dot{I}_2 = 16.28e^{-j82.49^\circ}$  - з початку координат під кутом  $\psi_{i2} = -82.49^\circ$  до осі дійсних чисел відкласти відрізок завдовжки  $16,28/M_i$ ;

6)  $\dot{I}_3 = 10.21e^{j30.29^\circ}$  - з кінця  $\dot{I}_2$  під кутом  $\psi_{i3} = 30,29^\circ$  до осі дійсних чисел відкласти відрізок завдовжки  $10,21/M_i$ .

**Зверніть увагу:** в загальному випадку на суміщеній діаграмі, за правильного виконання дій отримують два замкнених багатокутники, один з яких складений з векторів напруг, а другий — з векторів струмів (у даному випадку маємо трикутник струмів та трикутник напруг). Суміщена векторна діаграма дає можливість наочно аналізувати характери навантажень ділянок кола. Так, в цілому розрахункова схема має активно-індуктивний характер навантаження, оскільки вектор струму кола  $\dot{I}_k$  відстає від вектора напруги кола  $\dot{U}_k$  на кут

$$\varphi_k = \psi_{uk} - \psi_{ik} = -14.9^\circ - (-45^\circ) = 30.1^\circ.$$

Перша ділянка схеми, де включені активний опір  $r_1$ , індуктивність  $L_1$  та ємність  $C_1$ , також має активно-індуктивний характер навантаження, оскільки вектор діючого тут струму  $\dot{I}_1 = \dot{I}_k$ , відстає від вектора напруги  $\dot{U}_1$ , на кут

$$\varphi_1 = \varphi_{n1} - \varphi_{i1} = 0^\circ - (-45^\circ) = 45^\circ.$$

Одна з паралельних віток ( $Z_2$ ) кола має активно-індуктивний характер навантаження. Тут кут зсуву фаз між векторами  $\dot{I}$  і  $\dot{U}_{23}$  додатний:

$$\varphi_2 = \varphi_{u23} - \varphi_{i2} = -23.46^\circ - (-82.49^\circ) = 59.03^\circ.$$

В іншій паралельній вітці ( $Z_3$ ), оскільки кут зсуву фаз між  $\dot{I}_k$  та  $\dot{U}_{23}$  від'ємний –

$$\varphi_3 = \varphi_{u23} - \varphi_{i3} = -23.46^\circ - 30.29^\circ = -53.75^\circ,$$

характеристика навантаження активно-ємнісний. У сукупності ж ділянка кола, що складається з двох паралельних віток, має активно-індуктивний характер навантаження, оскільки  $\dot{I}_k$  відстає від  $\dot{U}_{23}$  на кут

$$\varphi_{23} = \varphi_{u23} - \varphi_{ik} = -23.46^\circ - (-45^\circ) = 21.54^\circ.$$

### Контрольні запитання

1. Основні методики розрахунку електричних кіл синусоїдного струму?
2. Основні питання аналізу електричних кіл синусоїдного струму?
3. Проаналізувати одне з електричних кіл наведених в завданні до роботи?
4. Проаналізувати розгалужене коло синусоїдного струму з використанням символічного методу?

## ЛАБОРАТОРНО – ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ №3.

### ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАЛЕЛЬНОГО З'ЄДНАННЯ R, L, C

**Мета роботи:** Оволодіти методиками розрахунку трифазних кіл.

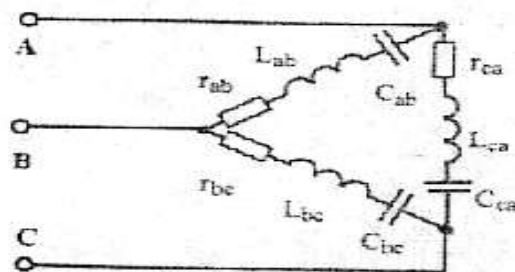
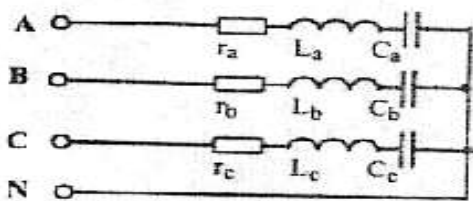
#### 3.1. Обсяг завдання

1. Відповідно до варіанта визначити лінійні і фазні струми споживачів і джерела розрахункової схеми.
2. Правильність обчислення струмів довести складанням балансу потужностей джерела та споживачів.
3. На комплексній площині побудувати векторні діаграми струмів та напруг окремих споживачів і джерела, з використанням яких проаналізувати характери навантажень у фазах споживачів.

#### 3.2. Вказівки до вибору варіанта

Студенти розраховують схеми, наведені на рис.3. Параметри елементів схеми та напругу мережі вибирають відповідно за таблицями 3.1 та 3.2.





Таблиця 3.1.

| Число<br>десятиків<br>шифру | U <sub>л</sub> , В | Активний опір, Ом |                |                | Число<br>одиниць<br>шифру | Індуктивність, мГн |                |                | Ємність, мкФ   |                |                |
|-----------------------------|--------------------|-------------------|----------------|----------------|---------------------------|--------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                             |                    | r <sub>A</sub>    | r <sub>B</sub> | r <sub>C</sub> |                           | L <sub>A</sub>     | L <sub>B</sub> | L <sub>C</sub> | C <sub>A</sub> | C <sub>B</sub> | C <sub>C</sub> |
| 0                           | 380                | -                 | 5              | 10             | 0                         | 10                 | 15             | 20             | 200            | 250            | 300            |
| 1                           | 400                | 10                | -              | 5              | 1                         | 20                 | 10             | -15            | 350            | 400            | 450            |
| 2                           | 220                | 15                | 20             | -              | 2                         | 10                 | -              | 25             | 500            | 550            | 600            |
| 3                           | 230                | 20                | 15             | 5              | 3                         | -30                | 5              | 40             | 550            | -              | 550            |
| 4                           | 380                | 5                 | 10             | 15             | 4                         | 40                 | 35             | 30             | 450            | -              | -              |
| 5                           | 500                | 10                | 15             | 20             | 5                         | -10                | 35             | 40             | 400            | -              | -              |
| 6                           | 660                | 5                 | 15             | 25             | 6                         | 50                 | 20             | 25             | 300            | 350            | -              |
| 7                           | 380                | 25                | 15             | -              | 7                         | 60                 | -40            | -50            | -              | 350            | 300            |
| 8                           | 240                | 10                | -              | 5              | 8                         |                    | 65             |                | 250            | 300            | 200            |
| 9                           | 150                | -                 | 15             | 10             | 9                         |                    |                |                | 350            | 450            | 550            |

Таблиця 3.2

| Число<br>десятиків<br>шифру | U <sub>л</sub> , В | Активний опір, Ом |                 |                 | Число<br>одиниць<br>шифру | Індуктивність, мГн |                 |                 | Ємність, мкФ   |                |                |
|-----------------------------|--------------------|-------------------|-----------------|-----------------|---------------------------|--------------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|
|                             |                    | r <sub>AB</sub>   | r <sub>BC</sub> | r <sub>CA</sub> |                           | L <sub>AB</sub>    | L <sub>BC</sub> | L <sub>CA</sub> | C <sub>A</sub> | C <sub>B</sub> | C <sub>C</sub> |
| 0                           | 220                | -                 | 5               | 10              | 0                         | 10                 | 15              | 20              | 200            | 250            | 300            |
| 1                           | 250                | 10                | -               | 5               | 1                         | 20                 | 10              | -               | 350            | 400            | 450            |
| 2                           | 127                | 15                | 20              | -               | 2                         | 10                 | -               | 15              | 500            | 550            | 600            |
| 3                           | 130                | 20                | 15              | 5               | 3                         | -                  | 5               | 25              | 550            | -              | 550            |
| 4                           | 220                | 5                 | 10              | 15              | 4                         | 30                 | 35              | 40              | 450            | -              | -              |
| 5                           | 100                | 10                | 15              | 20              | 5                         | 40                 | 35              | 30              | 400            | -              | -              |
| 6                           | 380                | 5                 | 15              | 25              | 6                         | -                  | 20              | 40              | 300            | 350            | -              |
| 7                           | 240                | 25                | 15              | -               | 7                         | 10                 | -               | 25              | -              | 350            | 300            |
| 8                           | 127                | 10                | -               | 5               | 8                         | 50                 | 40              | -               | 250            | 300            | 200            |
| 9                           | 100                | -                 | 15              | 10              | 9                         | 60                 | 65              | 50              | 350            | 450            | 550            |

### 3.3. Методичні вказівки до аналізу кіл трифазного струму

Багатофазна електрична система - це сукупність кількох електричних кіл (фаз), де діють створені спільним джерелом синусоїд ЕРС однакової частоти, зсунуті між собою за фазою. Найбільше поширення серед багатофазних отримала зв'язана трифазна система симетричних ЕРС. У ній три діючі ЕРС зсунуті одна відносно другої на  $\kappa 120^\circ$ . Фази джерела (трифазного синхронного генератора) звичай з'єднують за схемою „зірка”. Фази споживача, куди можуть бути включені однакові або різні за величиною і фізичною суттю опори (симетричне або несиметричне навантаження), залежно від обставин з'єднують між собою за схемою „зірка” або „трикутник”.

За симетричного навантаження фаз споживача незалежно від схеми їх включення („зірка” або „трикутник”), методика розрахунку системи по суті не відрізняється від методики розрахунку кола однофазного змінного струму.

Методику аналізу трифазної системи за несиметричного навантаження фаз споживача покажемо на прикладі числового розрахунку схеми, наведеної кз рис.3.1. Тут два споживача, один з яких з'єднаний у „зірку”, а другий у „трикутник”, підключені до джерела трифазного струму з лінійною напругою  $U=380$  В.

Задачу сформулюємо так: при  $r_a=100\Omega$ ,  $L_a=63,69\text{мГн}$ ,  $C_a=212,3\text{мкФ}$ ,  $L_b=79,62\text{мГн}$ ,  $C_b=90,99\text{мкФ}$ ,  $r_c=150\Omega$ ,  $r_n=10\Omega$ ,  $L_n=6,37\text{мГн}$  та  $r_{ab}=100\Omega$ ,  $r_{bc}=50\Omega$ ,  $L_{bc}=57,32\text{мГн}$ ,  $C_{bc}=10,6\text{мкФ}$ ,  $r_{ca}=14\Omega$ ,  $L_{ca}=58\text{мГн}$  визначити: лінійні та фазні струми обох споживачів, а також струми джерела; правильність обчислення струмів довести складанням балансу потужностей джерела та споживачів; на комплексній площині побудувати векторні діаграми струмів та напруг окремих споживачів і джерела, з використанням яких проаналізувати характер навантажень у фазах споживачів та джерела.

Аналіз трифазної схеми з несиметричним навантаженням фаз споживача починають з запису комплексів фазних і лінійних напруги джерела енергії, прийняті значення яких втримують незмінними до повного, закінчення розрахунку.

### 3.4 Комплекси фазних і лінійних напруг джерела трифазного струму.

Вище було зазначено, фази джерела трифазного струму звичайно з'єднують у „зірку”. За такої схеми „зірка” комплексів лінійних  $U_L$  напруг ( $U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}$ , що засунуті між на кут  $120^\circ$ ) джерела повернута відносно „зірки” комплексів його фазних  $\dot{U}_\phi$  напруг ( $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ ), що також зсунуті між собою на кут  $120^\circ$  на кут  $30^\circ$  та між модулями комплексів лінійних та фазних напруг ( $U_L$  і  $U_\phi$ ) діє співвідношення:

$$U_L = \sqrt{3} U_\phi$$

Оскільки за умовою задачі  $U_L=380\text{ В}$ , то модуль фазних напруг ( $U_\phi$ ) джерела

$$U_\phi = U_L / \sqrt{3} = 380 / 1,73 = 219,65 \approx 220.$$

Прийmemo, що комплекс однієї з напруг джерела, наприклад напруги фази А, збігається з віссю дійсних чисел комплексної площини. Для розрахункової схеми за цієї умови комплекси фазних і лінійних напруг ( $U$ ) будуть такими:

$$\begin{aligned} \dot{U}_A &= 220e^{j0^\circ} = (220 + j0); & \dot{U}_{AB} &= 380e^{j30^\circ} = (329,1 + j190); \\ \dot{U}_B &= 220e^{-j120^\circ} = (-110 + j190,52); & \dot{U}_{BC} &= 380e^{-j90^\circ} = (0 - j380); \\ \dot{U}_C &= 220e^{j120^\circ} = (-110 + j190,52); & \dot{U}_{CA} &= 380e^{j150^\circ} = (-329,1 + j190); \end{aligned}$$

У разі з'єднання споживача у „зірку” комплекс лінійної напруги джерела дорівнює різниці комплексів відповідних фазних напруг генератора:

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B; \quad \dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C; \quad \dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A.$$

Тому напруги джерела на векторній діаграмі зручно зображувати так, як подано на рис.3.4,а. У разі з'єднання споживача у „трикутник” комплекс лінійної напруги джерела дорівнює відповідному комплексу фазної напруги споживача:

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_{ab}; \quad \dot{U}_{BC} = \dot{U}_{bc}; \quad \dot{U}_{CA} = \dot{U}_{ca}.$$

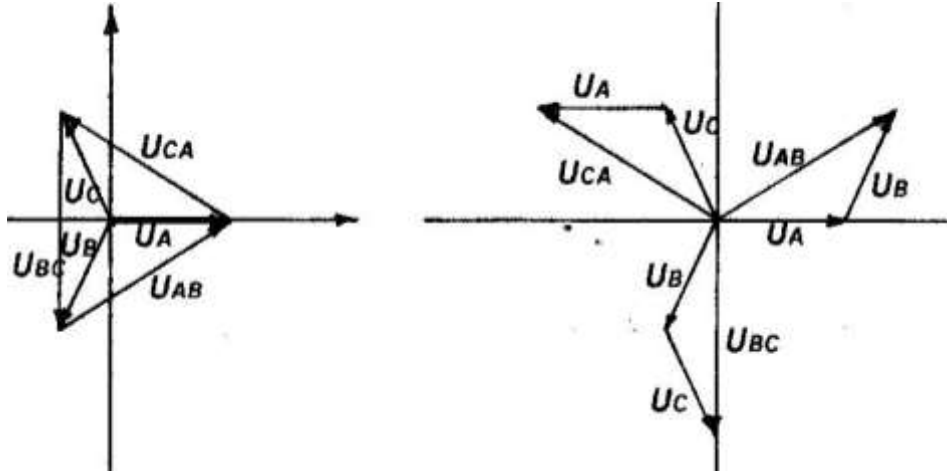
Тому на векторній діаграмі можна показувати тільки „зірку”<sup>1</sup> лінійних напруг (рис.3.4,б). У тому чи іншому варіанті діаграми на круг джерела будують у масштабі  $M_U$ . Його обов'язково вказують на комплексній площині і далі дотримуються під час побудови векторів; напруг споживача.

### 3.5 Аналіз споживача з'єданого у „зірку”.

За даними значеннями індуктивностей  $L_\phi$  і ємностей  $C_\phi$  аналогічно розрахунку кола однофазного струму розраховують реактивні індуктивні  $X_L=2\pi fL$  та ємнісні  $X_C=(2\pi fL)^{-1}$  опори ( $\Omega$ ), після чого затісують комплекси повних опорів  $\underline{Z}_\phi$  ( $\Omega$ ) фаз (а, б,

с) і нейтрального проводу (n) „зірки”. Для розрахункової схеми ці величини дорівнюють (Ом):

$$\begin{aligned} X_{La} &= 20; & X_{Lb} &= 25; & X_{Ln} &= 2; & X_{Ca} &= 15; & X_{Cb} &= 15; \\ \underline{Z}_a &= r_a + j(X_{La} - X_{Ca}) = 10 + j5 = 11.18e^{j26.56}; \\ \underline{Z}_b &= r_b + j(X_{Lb} - X_{Cb}) = 0 + j10 = 10e^{-j90}; \\ \underline{Z}_c &= r_c + j0 = 15 + j0 = 15e^{j0}; \\ \underline{Z}_n &= r_n + jX_{Ln} = 1 + j2 = 2.4e^{j63.43}. \end{aligned}$$



Оскільки розрахункова „зірка” має несиметричне навантаження фаз ( $\underline{Z}_a \neq \underline{Z}_b \neq \underline{Z}_c$ ), то у нейтральному проводі з’єднання діятиме струм (струм нейтрального проводу —  $I_n \neq 0$ ). До того ж, оскільки нейтральний провід має опір ( $\underline{Z}_n \neq 0$ ), то нейтральні точки джерела N і споживача n матимуть не однакові потенціали. Різниця цих потенціалів визначає величину вузлової напруги - напруги зміщення нейтралі „зірки”:

$$\dot{U}_{Nn} = \underline{Z}_n I_n = \frac{\dot{U}_a \underline{Y}_a + \dot{U}_b \underline{Y}_b + \dot{U}_c \underline{Y}_c}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c + \underline{Y}_n}.$$

Наявність напруги зміщення нейтралі, у свою чергу, призводить до так званого „перекосу” фазних напруг „зірки” споживача — комплекс фазної напруги споживача не дорівнює відповідному комплексу фазної напруги джерела. Комплексі; фазних напруг споживача при цьому розраховують за такою формулою:

$$\dot{U}_{\phi, \text{сп}} = \dot{U}_{\phi, \text{дж}} - \dot{U}_{Nn}.$$

**Зверніть увагу:** за симетричного навантаження фаз „зірки”  $Z_a = Z_b = Z_c$  струм у нейтральному проводі дорівнює нулю  $I_n = 0$ ; при відсутності опору нейтрального проводу ( $Z_n = 0$ ) напруга зсуву нейтралі дорівнює нулю ( $U_{Nn}=0$ ). і комплекси фазних напруг споживача дорівнюють відповідним комплексам фазних напруг джерела ( $U_{\phi \text{ сп}}=U_{\phi \text{ дж}}$ ).

Для розрахункової схеми комплекс напруги зсуву нейтралі та комплекси фазних напруг „зірки” споживача дорівнюють (В):

$$\begin{aligned} \dot{Y} &= ((220e^{j0} / 11.18e^{j26.56}) + (220e^{j120} / 10e^{-j90}) + (220e^{j120} / 15e^{j0})) / ((1/11.18e^{j26.56}) + (1/10e^{-j90}) + (1/15e^{j0}) + (1/2.4e^{j63.43})) = 61.24e^{j30.95} = (52.52 + j31.5); \\ U_a &= (220 + j0) - (52.52 + j31.5) = (167.48 - j31.5) = 170.42e^{-j10.65}; \\ U_b &= (-110 - j190.52) - (52.52 + j31.5) = (-162.52 - j222.02) = 275.15e^{j283.8}; \\ U_c &= (-110 - j190.52) - (52.52 + j31.5) = (-162.52 - j159.02) = 227.38e^{j135.62}. \end{aligned}$$

У разі з’єднання у „зірку” комплекс фазного струму дорівнює

комплексу відповідного лінійного струму ( $I_{\phi Y} = I_{nY}$ ). Для розрахункової схеми комплекси фазних (лінійних) струмів та комплекс струму нейтрального проводу  $I_n$  дорівнюють (А):

$$I_a = I_{AY} = U_a / Z_a = 170,42e^{-j10,65} / (11,18e^{j26,56}) = 15,17e^{-j37,21} = (12,08 - j9,22);$$

$$I_b = I_{BY} = U_b / Z_b = 275,15e^{j233,8} / (10e^{-j90}) = 27,51e^{j323,8} = (22,19 - j16,25);$$

$$I_c = I_{CY} = U_c / Z_c = 227,38e^{j135,62} / (15e^{j0}) = 15,16e^{j135,62} = (-10,84 - j10,6);$$

$$I_n = U_{Nn} / Z_n = 61,24e^{j30,95} / (2,24e^{j63,43}) = 27,34e^{-j32,48} = (23,25 - j14,79).$$

Правильність визначення струмів „зірки” перевіряють за першим законом Кірхгофа ( $I_n = I_a + I_b + I_c$ ). Якщо відносні розбіжності сум активних і реактивних складових суми комплексів фазних струмів

$$I_{\Sigma} = I_a + I_b + I_c = (12,08 - j9,22) + (22,19 - j16,25) + (-10,84 + j10,6) = (23,43 - j14,86)$$

та струму нейтрального проводу не перебільшують  $= 1,0\%$ ,

$$\Delta_{ak} = 100(I_{ak\Sigma} - I_{akn}) / I_{akn} = 100(23,43 - 23,25) / 23,25 = 0,07 < \pm 1\%;$$

$$\Delta_p = 100(I_{p\Sigma} - I_{pн}) / I_{pn} = 100(-14,86 - (-14,79)) / (-14,79) = 0,04 < \pm 1\%,$$

розрахунок схеми можна продовжувати далі. У іншому випадку по трібно зробити перевірку раніше виконаних дій.

Комплекси повної потужності  $S_{\phi Y}$  (ВА) активні  $P_{\phi Y}$  (Вт) та реактивні  $Q_{\phi Y}$  (вар) потужності фаз споживача, а також нейтрального проводу і з'єднання у „зірку” в цілому, відповідно  $S_n$ ,  $P_n$ ,  $Q_n$ ;  $S_Y$ ,  $P_Y$ ,  $Q_Y$  визначають за формулами:

$$S_{\phi Y} = Z_{\phi Y} I_{\phi Y}^2 = P_{\phi Y} \pm jQ_{\phi Y};$$

$$S_n = Z_n I_n^2 = P_n \pm jQ_n;$$

$$S_Y = S_n + \Sigma S_{\phi Y} = P_Y \pm jQ_Y;$$

Для розрахункової схеми значення цих величин будуть такі (ВА):

$$S_a = 11,18e^{j26,56} * 15,17^2 = 2597e^{j26,56} = (2323 + j1161);$$

$$S_b = 10e^{-j90} * 27,51^2 = 7568e^{-j90} = (0 - j7568);$$

$$S_c = 15e^{j0} * 15,16^2 = 3447e^{j0} = (3447 + j0);$$

$$S_n = 2,24e^{j63,43} * 27,56^2 = 1671e^{j63,43} = (747 + j1495);$$

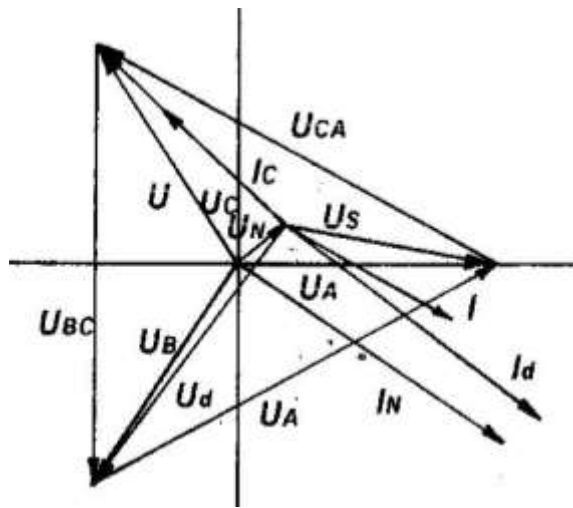
$$S_Y = (747 + j1495) + (2323 + j1161) + (0 - j7568) + (3447 + j0) = (6517 - j4912).$$

**Зверніть увагу:** оскільки за умовою розрахункової задачі до одного джерела підключені кілька споживачів („зірка” і „трикутник”), то комплекс фазного струму „зірки” не дорівнює комплексу відповідного фазного струму джерела і, отже, у цьому разі не можна розраховувати потужності фаз джерела. У разі, коли до джерела підключений лише споживач, фази якого з'єднані „зіркою” потужність джерела визначаємо за такими формулами:

$$S_{\phi дж} = U_{\phi дж} I_{\phi Y} = P_{\phi дж} \pm jQ_{\phi дж};$$

$$S_{дж} = \Sigma S_{\phi дж} = \Sigma P_{\phi дж} \pm j \Sigma Q_{\phi дж} = P_{дж} \pm jQ_{дж}.$$

За результатами розрахунків будують суміщену векторну діаграму струмів та напруг „зірки” (рис.3.5). Порядок побудови цієї діаграми такий:



- 1) у масштабі  $M_n$ , як і на рi:с.3.4,а, будують векторну діаграму напруг джерела:
- 2) з центра координат комплексної площини (з нейтральної точки N джерела будують вектор зсуву нейтралі „зірки”;
- 3) з'єднавши кінець вектора (нейтральну точку по споживача) з вершинами A, B, C трикутника лінійних напруг джерела (споживача), одержують вектори фазних напруг споживача:
- 4) з нейтральної точки споживача п будують вектори фазних струмів та вектор струму нейтрального проводу „зірки”;
- 5) на діаграмі показують кути зсуву фаз у фазах „зірки”.

**Зверніть увагу:** за правильно виконаних розрахунків та правильно побудованої діаграми кут між вектором фазного струму і вектором відповідної фазної напруги споживача (кут зсуву фаз  $\varphi_\phi$ ) дорівнює аргументу комплексу повного опору цієї фази.

З аналізу векторної діаграми випливає, що фази споживача з'єднаного в "зірку", мають навантаження:

фаза a — активно-індуктивне, оскільки кут зсуву додатний:

$$\varphi_{ab} = \psi_{uab} - \psi_{iab} = -10.65^\circ - (-37.21^\circ) = 26.56^\circ > 0;$$

фаза b — ємнісне, оскільки кут зсуву фаз від'ємний:

$$\varphi_b = \psi_{ub} - \psi_{ib} = 233.8^\circ - 323.8^\circ = -90^\circ < 0;$$

фаза c — активне, оскільки кут зсуву фаз дорівнює нулю:

$$\varphi_c = \psi_{uc} - \psi_{ic} = 135.62^\circ - 135.62^\circ = 0.$$

**Зверніть увагу:** за правильно виконаних розрахунків та правильно побудованої діаграми кут між вектором фазного струму і вектором відповідної фазної напруги споживача (кут зсуву фаз ) дорівнює аргументу комплексу повного опору цієї фази.

### Контрольні запитання

1. Охарактеризувати методи розрахунку трифазних електричних кіл?
2. Дослідити паралельне з'єднання R, C, L?
3. Комплекси фазних і лінійних напруг джерела трифазного струму?

## ЛАБОРАТОРНО – ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ №4.

### РОЗРАХУНОК 3-Х ФАЗНОГО КОЛА ПРИ З'ЄДНАННІ ПРИЙМАЧІВ ЗІРКОЮ

**Мета:** Оволодіти методиками розрахунку навантаження з'єданого у "зірку".

#### 4.1 Обсяг завдання

1. Відповідно до варіанта, вибраного на попередньому занятті, визначити лінійні і фазні струми споживачів і джерела розрахункової схеми.

2. Правильність обчислення струмів довести складанням балансу потужностей джерела та споживачів.

3. На комплексній площині побудувати векторні діаграми струмів та напруг окремих споживачів і джерела, з використанням яких проаналізувати характер навантажень у фазах споживачів.

#### 4.2 Методичні вказівки до аналізу кола

За заданими значеннями індуктивностей  $L_\phi$  і ємностей  $C_\phi$ , аналогічно розрахунку кола однофазного струму, розраховують реактивні опори  $X_{L\phi} = 2\pi f L_\phi$  та  $X_{C\phi} = (2\pi f C_\phi)^{-1}$ , після чого записують комплекси повних опорів фаз (ab, bc, ca) трикутника (Ом):

$$\begin{aligned}X_{Lbc} &= 18; X_{Cbc} = 30; X_{Lca} = 8; \\ \underline{Z}_{ab} &= r_{ab} + j0 = 10 + j0 = 10e^{j0}; \\ \underline{Z}_{bc} &= r_{bc} + j(X_{Lbc} - X_{Cbc}) = 5 - j13 = 13e^{-j67.38}; \\ \underline{Z}_{ca} &= r_{ca} + jX_{Lca} = 14 - j8 = 16.12e^{j29.74}.\end{aligned}$$

За законом Ома розраховують комплекси фазних струмів (А):

$$\begin{aligned}I_{ab} &= U_{ab} / \underline{Z}_{ab} = 380e^{j30^\circ} / (10e^{j0}) = 38e^{j30^\circ} = (32.91 + j19); \\ I_{bc} &= U_{bc} / \underline{Z}_{bc} = 380e^{j90^\circ} / (13e^{j67.38^\circ}) = 29.23e^{j22.52^\circ} = (26.98 + j11.24); \\ I_{ca} &= U_{ca} / \underline{Z}_{ca} = 380e^{j150^\circ} / (16.12e^{j29.74^\circ}) = 23.57e^{j120.26^\circ} = (-11.88 + j20.36).\end{aligned}$$

У разі з'єднання фаз споживача у „трикутник” комплекс лінійного струму визначають як різницю комплексів відповідних фазіте струмів:

$$I_{A\Delta} = I_{ab} - I_{ca}; \quad I_{B\Delta} = I_{bc} - I_{ab}; \quad I_{C\Delta} = I_{ca} - I_{bc}.$$

Для розрахункової схеми комплекси лінійних струмів будуть (А)

$$\begin{aligned}I_{A\Delta} &= (32.91 - j19) - (-11.88 + j20.36) = 44.79 - j1.36 = 44.81e^{-j1.74^\circ} \\ I_{B\Delta} &= (26.98 - j11.24) - (32.91 - j19) = -5.93 - j30.24 = 30.82e^{j258.9^\circ} \\ I_{C\Delta} &= (-11.88 - j20.36) - (26.98 - j11.24) = -38.87 + j31.6 = 50.09e^{j140.88^\circ}\end{aligned}$$

Правильність визначення комплексів струмів „трикутника” перевіряють за першим законом Кірхгофа  $I_{A\Delta} + I_{B\Delta} + I_{C\Delta} = 0$ :

$$(44.79 - j1.36) + (-5.93 - j30.24) + (-38.87 - j31.6) \approx (0 \pm j0).$$

У разі його невиконання треба перевіряти розрахунок напруг струмів з'єднання.

Комплекси повної потужності  $\underline{S}_{\phi\Delta}$  (ВА) активні  $P_{\phi\Delta}$  (Вт) та реактивні  $Q_{\phi\Delta}$  (вар) потужності фаз „трикутника”, а також з'єднання і цілому відповідно  $\underline{S}_{\Delta}$ ,  $P_{\Delta}$ ,  $Q_{\Delta}$  визначають за такими формулами:

$$\underline{S}_{\phi\Delta} = \underline{Z}_{\phi\Delta} I_{\phi\Delta}^2 = P_{\phi\Delta} \pm jQ_{\phi\Delta};$$

$$S_{\Delta} = \Sigma S_{\phi\Delta} = P_{\Delta} \pm j Q_{\Delta}$$

Для розрахункової схеми ці величини мають такі значення:

$$S_{ab} = 10e^{j0} \cdot 38^2 = 14440e^{j0} = (14440 + j0);$$

$$S_{bc} = 13e^{-j67.37} \cdot 29,23^2 = 11107e^{-j67.37} = (4272 - j10253);$$

$$S_{ca} = 16.12e^{j29.74} \cdot 23,57^2 = 8955e^{j29.74} = (7778 + j4444);$$

$$S_{\Delta} = (14440 + j0) + (4272 - j10253) + (7778 + j4444) = (26490 - j5809).$$

**Зверніть увагу:** оскільки за умовою розрахункової задачі до одного джерела підключені кілька споживачів („зірка” і „трикутник”), то комплекс лінійного струму „трикутника” не дорівнює комплексу відповідного фазного струму джерела і, отже, у цьому разі не можна визначати потужності фаз джерела і потужність джерела в цілому. Коли ж до джерела підключений лише один „трикутник” потужність джерела визначаємо за формулою:

$$S_{ф дж} = U_{ф дж} I_{л \Delta} = P_{ф дж} \pm jQ_{ф дж};$$

$$S_{дж} = \Sigma S_{ф дж} = P_{дж} \pm jQ_{дж}.$$

За результатами розрахунків на комплексній площині будують суміщену діаграму струмів і напруг „трикутника” (рис. 3.6) у такому порядку:

1) у масштабі, аналогічному рис. 3.4.б, будують „зірку” векторів фазних (вана ж – „зірка” векторів лінійних)

напруг споживача (джерела);

2) з центра координат площини у масштабі (Мі), з урахуванням напрямків (кутів) відкладають вектори лінійних ( $I_{A\Delta}$ ,  $I_{B\Delta}$ ,  $I_{C\Delta}$ ) і фазних ( $I_{ab}$ ,  $I_{bc}$ ,  $I_{ca}$ ) струмів з'єднання;

3) з кінців векторів  $I_{ab}$ ,  $I_{bc}$ ,  $I_{ca}$ , змінивши напрямок на зворотний, відкладають і показують

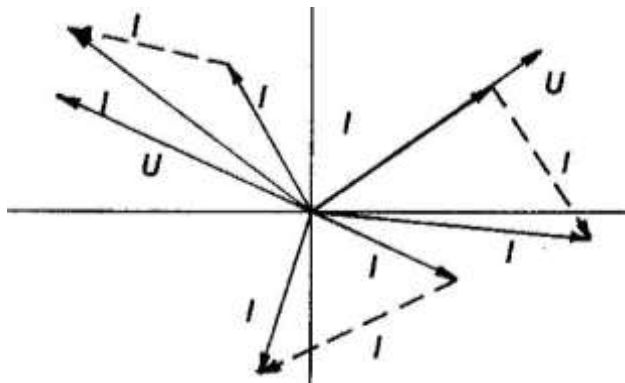


Рис 4.1

пунктирно вектори відповідно:  $-I_{ca}$ ,  $I_{ab}$ ,  $I_{bc}$ .

4) на діаграмі показують кути зсуву фаз  $\varphi_\phi$  у фазах „трикутника” (кути між фазним струмом ( $I_{ab}$ ,  $I_{bc}$ ,  $I_{ca}$ ) і відповідною фазою з напругою споживача).

За правильно виконаних розрахунків струмів і правильно довжини їх векторів на діаграмі отримують три трикутники струми однією стороною кожного з цих трикутників є вектор лінійного струму. Дві інші сторони кожного з трикутників утворені векторами однакових струмів, один з яких має зворотний напрямок і поданий пунктиром.

З аналізу векторної діаграми впливає споживача з'єднаного в „трикутник” мають навантаження :

ФАЗА  $ab$  — активне, оскільки кут зсуву дорівнює нулю:

$$\varphi_{ab} = \psi_{uab} - \psi_{I_{ab}} = 30^\circ - 30^\circ = 0^\circ ;$$

ФАЗА  $bc$  — активно-ємнісне, оскільки кут зсуву фаз від'ємний:

$$\varphi_{bc} = \psi_{u_{bc}} - \psi_{I_{bc}} = -90^\circ - (-22,62^\circ) = -67,38^\circ < 0^\circ ;$$

ФАЗА  $ca$  — активно - індуктивне, оскільки кут зсуву фаз від'ємний:

$$\varphi_{ca} = \psi_{u_{ca}} - \psi_{I_{ca}} = 150^\circ - 120,26^\circ = 29,71^\circ > 0^\circ .$$

**Зверніть увагу:** за правильно виконаних розрахунків та правильно побудованої діаграми кут між вектором фазного струму і вектором відповідної фазної напруги споживача (кут зсуву фаз ) дорівнює комплексу повного опору цієї фази.

### 4.3 Розрахунок балансу потужностей схеми.

Оскільки до одного джерела підключені два споживачі („зірка” і „трикутник”) то комплекс повної потужності  $S_{\text{сп}}$  (ВА), активну  $P_{\text{сп}}$  (Вт) та реактивну  $Q_{\text{сп}}$  (вар) потужності фаз і навантаження в цілому можна визначити так:

$$S_{\text{сп}} = S_y + S_\Delta = P_{\text{сп}} \pm jQ_{\text{сп}} = 6517 - j4912 + 26490 - j5809 = 33007 - j10720 = 34704e^{-j17,99}$$

Комплекс повної потужності  $S_{\phi \text{ дж}}$  (ВА), активну  $P_{\phi \text{ дж}}$  (Вт) та реактивну  $Q_{\phi \text{ дж}}$  (вар) потужності фаз джерела , а також джерела в цілому  $S_{\text{дж}}$  (ВА) розраховують за формулою:

$$S_{\phi \text{ дж}} = U_{\phi \text{ дж}} I_{\phi \text{ дж}} = P_{\phi \text{ дж}} \pm jQ_{\phi \text{ дж}} ;$$

$$S_{\text{дж}} = \Sigma S_{\phi \text{ дж}} = P_{\text{дж}} \pm jQ_{\text{дж}}$$

Для розрахункової схеми ці величини дорівнюють:

$$S_A = U_A I_A = 220e^{j0} * 57.9e^{j10.51} = 12738e^{j10.53} = (12523 + j2328);$$

$$S_B = U_B I_B = 220e^{-j120} * 49.25e^{j70.71} = 10835e^{-j49.29} = (7067 - j8213);$$

$$S_C = U_C I_C = 220e^{j120} * 65.2e^{-j139.67} = 14344e^{-j19.67} = (13507 - j4828);$$

$$S_{\text{дж}} = 12523 + j2328 + 7067 - j8213 + 13507 - j4828 = 33097 - j10713 = 34788e^{-j17.94}$$

Похибку розрахунку трифазного кола оцінюють за такою самою методикою, як і для кола однофазного змінного струму:

$$\Delta_{ak} = 100 (P_{\text{сп}} - P_{\text{дж}}) / P_{\text{дж}} = (33007 - 33097) / 33097 = -0,27\%;$$

$$\Delta_p = 100 (Q_{\text{сп}} - Q_{\text{дж}}) / Q_{\text{дж}} = (-10720 - (-10713)) / (-10713) = 0,065\%.$$

При  $\Delta_{ak} < \pm 1 \%$  та  $\Delta_p < \pm 1 \%$  задача розв'язана правильно.



## Контрольні запитання

1. Розрахувати баланс потужностей електричної схеми?
2. Основні питання аналізу електричних кіл?
3. Методика розрахунку навантаження з'єднаного трикутником?

## ЛАБОРАТОРНО – ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ №5.

### ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЛЕ ЗАХИСТУ ПОТУЖНИХ ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК

**Мета:** вивчити будову та принципи дії реле захисту потужних установок

#### Короткі теоретичні відомості

Розглянемо технічні характеристики різних реле часу.

#### Реле часу ВЛ-64...ВЛ-69.

Реле часу ВЛ-64...ВЛ-69 (рис. 5.1) призначені для комутації електричних кіл з певними, попередньо встановленими, витримками часу й застосовуються в схемах автоматики.

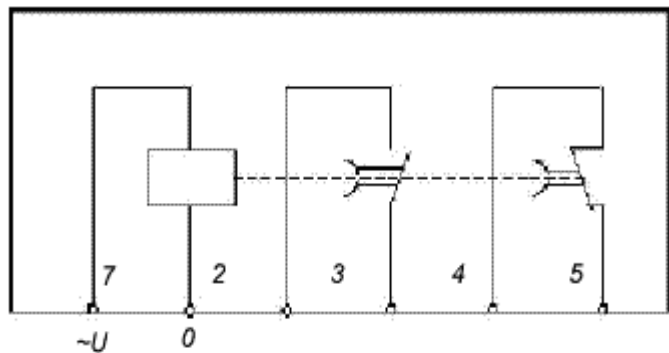
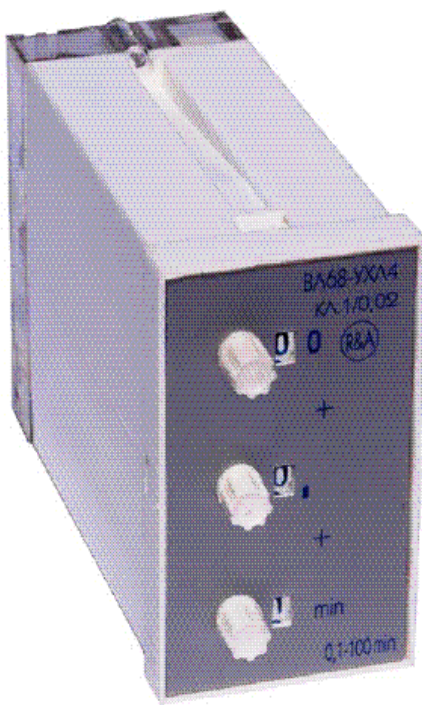


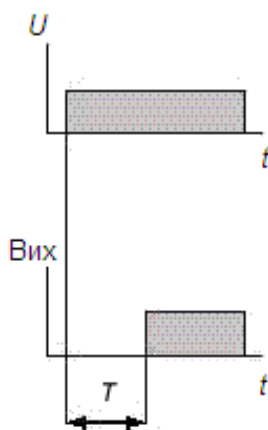
Рисунок 5.1 – Реле часу ВЛ-68 і схема внутрішніх з'єднань

Технічні характеристики ВЛ-64...ВЛ-69 наведені в табл. 5.1.

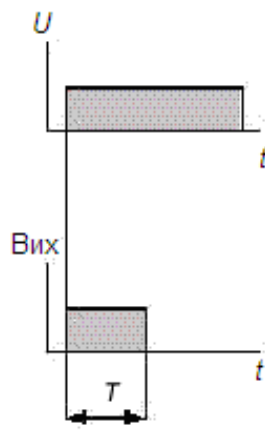
Таблиця 5.1 – Технічні характеристики ВЛ-64...ВЛ-69

| Тип реле                                              |                 | ВЛ-64                                        | ВЛ-65    | ВЛ-66                 | ВЛ-67 | ВЛ-68                   | ВЛ-69                   |
|-------------------------------------------------------|-----------------|----------------------------------------------|----------|-----------------------|-------|-------------------------|-------------------------|
| Діапазон витримок часу, с, хв., год                   |                 | 0.1...1.0, 0.3...3.0, 1.0...10.0, 3.0...30.0 |          | 0.1...9.9, 1.0...99.0 |       | 0.1...99.9, 1.0...999.0 | 0.1...9.9, 1.0...99.0 с |
| Напруга живлення, В                                   | постійний струм | 24, 27, 110, 220                             | —        | 24, 27, 110, 220      |       |                         |                         |
|                                                       | змінний струм   | 110, 220, 230, 240                           | 110, 220 | 110, 220, 230, 240    |       |                         |                         |
| Споживана потужність, В·А                             |                 | 4.5                                          |          |                       |       |                         |                         |
| Мін.комутований струм, А                              |                 | 0.01                                         |          |                       |       |                         |                         |
| Тривалий припустимий струм, А                         |                 | 4                                            |          |                       |       |                         |                         |
| Середня основна похибка на початку / в кінці шкали, % |                 | 23/6                                         | 22/3.5   | 11/1                  |       | 21/1                    | 21/1.7                  |
| Розкид витримок часу, %                               |                 | 0.5                                          |          | 0.3                   |       |                         |                         |
| Похибка від зміни температури, на 1 °С                |                 | 0.1                                          | 0.2      | 0.1                   |       |                         |                         |
| Час повторної готовності, с                           |                 | 0.3                                          |          |                       |       | 0.1                     |                         |
| Час повернення, с, не більше                          |                 | 0.2                                          |          |                       |       | 0.07                    |                         |
| Механічна зносостійкість, млн. циклів                 |                 | 20                                           |          |                       |       |                         |                         |

ВЛ-64, ВЛ-66, ВЛ-68, ВЛ-69



ВЛ-67



ВЛ-65

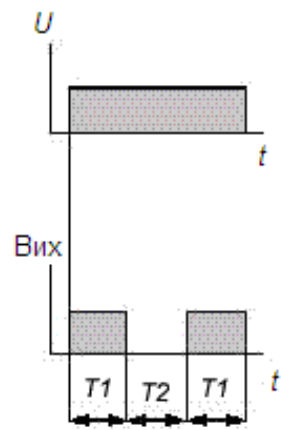


Рисунок 5.2 – Часові діаграми роботи реле ВЛ-64...ВЛ-69

### Таймер електронний ТЭ15

Таймер ТЭ15 (рис. 5.3) призначений для відліку інтервалів часу, автоматичного вмикання/вимикання електротехнічного устаткування через заданий проміжок часу протягом тижня й керування різними технологічними процесами. Таймер може використовуватися в промислових і побутових електроустановках. Монтаж роблять на 35 мм монтажну DIN-рейку.

Технічні характеристики ТЭ15 наведені у табл. 5.2, порядок програмування циклів роботи – у табл. 5.3.



Рисунок 5.3 – Таймер електронний ТЭ15

Таблиця 5.2 – Технічні характеристики ТЭ15

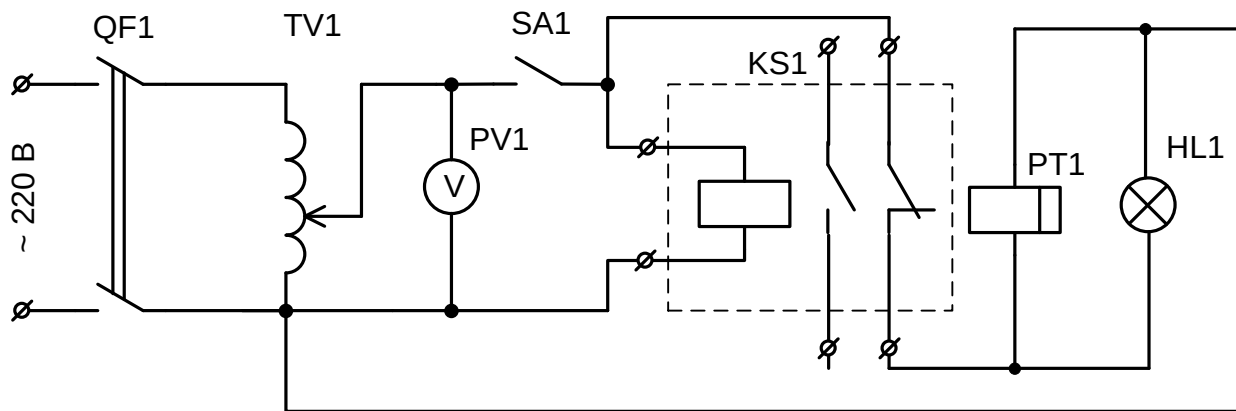
| Параметр                                                                              | Значення   |
|---------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| Час збереження встановленої програми при відключенні напруги живлення, не менше, год. | 150        |
| Діапазон робочої напруги, В                                                           | 180 – 264  |
| Максимальний струм навантаження, А (при $\cos\varphi = 1$ )                           | 16         |
| Механічна зносостійкість, циклів, не менше                                            | 10 000 000 |
| Мінімальний інтервал установки часу роботи програми, хв                               | 1          |
| Номінальна частота струму мережі, Гц                                                  | 50         |
| Номінальна напруга, В                                                                 | ~230       |
| Погрішність відліку тимчасових інтервалів, не більше, с/добу                          | 2          |
| Споживана потужність, не більше, Вт                                                   | 5          |
| Кількість програм керування вмикання/вимикання                                        | 8          |
| Електрична зносостійкість, циклів вмикання-вимикання                                  | 100 000    |

Таблиця 5.3 – Порядок програмування таймера ТЭ15

| Етап | Натиснути кнопку    | Виконувана функція              | Індикація             |
|------|---------------------|---------------------------------|-----------------------|
| 1    | Ⓟ                   | Установка 1-го циклу увімкнення | "1", "ВКЛ"            |
| 2*   | «Д+»                | Установка днів тижня            | Символи днів тижня    |
| 3    | «Ч+» / «М+»         | Установка                       | Час у цифрах          |
| 4    | Ⓟ                   | Установка 1-го циклу вимкнення  | "1", "ВИКЛ"           |
| 5    | «Д+»                | Установка                       | Символи днів тижня    |
| 6    | «Ч+» / «М+»         | Установка                       | Час у цифрах          |
| 7    | Повторити етапи 2-6 | Установка                       |                       |
| 8*   | ⌚                   | Програмування закінчено         | Поточний час у цифрах |

## Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з технічними даними досліджуваного реле.
2. Зібрати схему для дослідження реле (рис. 5.4), з'ясувавши призначення кожного елемента.



Рисунок

Рис. 5.4 – Схема для дослідження реле часу

3. Увімкнути QF1, встановити необхідну величину напруги живлення  $U$  і установку часу спрацювання  $t_{init}$ .
4. Увімкнути SA1. Дочекатися спрацювання реле.
5. Дослід повторити три рази для трьох значень напруг. Результати записати до табл. 5.3.
6. Вимкнути QF1, замінити реле часу і повторити пункти 3...5.
7. Оцінювання результатів вимірів зробити за середнім арифметичним значенням з трьох дослідів. Для цього провести розрахунок середніх арифметичних значень часу спрацювання. Результати розрахунку занести до табл. 5.3.
8. Розрахувати відносну похибку часу спрацювання  $\delta$  на декількох уставках за часом при різних напругах. Під відносною похибкою спрацювання реле розуміється відношення різниці між середнім арифметичним значенням часу спрацювання і часом уставки до часу уставки, виражене у відсотках:

$$er = \left[ \left( \bar{t}_s - t_{init} \right) / t_{init} \right] \cdot 100\%.$$

9. Порівняти отримані результати з технічними даними реле і зробити висновки щодо виконаної роботи.

Таблиця 5.3 – Визначення параметрів реле часу

| Тип реле              | ВЛ-68 |   |   |   |   |   |   |   |   | ТЭ15 |   |   |   |   |   |   |   |   |
|-----------------------|-------|---|---|---|---|---|---|---|---|------|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $U, \text{В}$         |       |   |   |   |   |   |   |   |   |      |   |   |   |   |   |   |   |   |
| № досліджу            | 1     | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1    | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| $t_{init}, \text{с}$  |       |   |   |   |   |   |   |   |   |      |   |   |   |   |   |   |   |   |
| $t_s, \text{с}$       |       |   |   |   |   |   |   |   |   |      |   |   |   |   |   |   |   |   |
| $\bar{t}_s, \text{с}$ |       |   |   |   |   |   |   |   |   |      |   |   |   |   |   |   |   |   |
| $er, \%$              |       |   |   |   |   |   |   |   |   |      |   |   |   |   |   |   |   |   |

### Зміст звіту

1. Короткі відомості про сферу застосування та основні елементи конструкції різних електронних реле часу.
2. Електрична схема досліджень, що проводяться.
3. Аналіз отриманих результатів, таблиці даних і висновки з роботи.

### Контрольні питання

1. Для чого призначені реле часу?
2. Від чого залежить похибка спрацювання електронних реле часу?
3. Наведіть приклади застосування електронних реле часу.
4. Наведіть основні недоліки й переваги електронних реле відносно електромеханічних.
5. Які реле часу «кращі»: електромеханічні чи електронні? Відповідь обґрунтувати.

## ЛАБОРАТОРНО – ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ №6.

### РОЗРАХУНОК ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

**Мета:** дослідження експлуатаційних властивостей однофазного трансформатора шляхом проведення дослідів холостого ходу (ХХ), короткого замикання (КЗ) і безпосереднього навантаження.

### Програма роботи

1. Провести дослід холостого ходу (ХХ).
2. Провести дослід короткого замикання (КЗ).
3. Провести дослід безпосереднього навантаження.

4. Використовуючи отримані дані розрахувати втрати потужності у сталі ( $P_{ст}$ ) та у міді ( $P_M$ ).

5. Побудувати характеристики залежності вихідної напруги, коефіцієнту корисної дії (ККД) та коефіцієнтів потужності від струму навантаження:

$$U_2 = f(I_2); \eta = f(I_2); \cos \varphi_1 = f(I_2); \cos \varphi_2 = f(I_2).$$

### Порядок виконання роботи

1. Записати паспортні дані однофазного трансформатора.
2. Зібрати схему для дослідження однофазного трансформатора згідно з рис. 6.1.

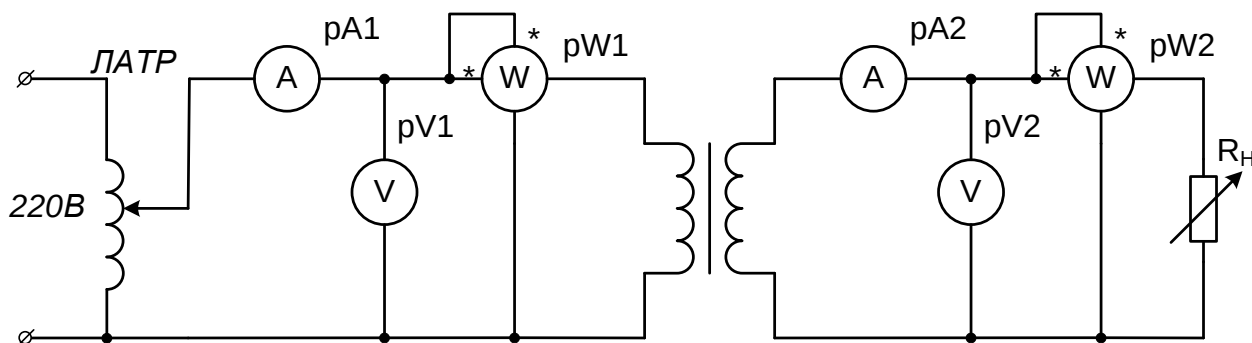


Рисунок 6.1 – Схема для дослідження однофазного трансформатора

3. Провести дослід ХХ однофазного трансформатора, для чого плавно збільшуючи за допомогою ЛАТРу напругу первинної обмотки однофазного трансформатора (приблизно сім вимірів), записати показання приладів до табл. 5.1.

Таблиця 6.1 – Дослід ХХ

| Результати вимірювань |                |              |                | Результати обчислень |              |              |              |
|-----------------------|----------------|--------------|----------------|----------------------|--------------|--------------|--------------|
| $U_{10},$<br>В        | $I_{10},$<br>А | $P_0,$<br>Вт | $U_{20},$<br>В | $\cos \varphi_0$     | $Z_0,$<br>Ом | $r_0,$<br>Ом | $X_0,$<br>Ом |
|                       |                |              |                |                      |              |              |              |

4. Провести дослід КЗ однофазного трансформатора, для чого повністю вивести опір реостату  $R_H$  і плавно збільшуючи за допомогою ЛАТРу напругу первинної обмотки трансформатора (шість вимірів), записати показання приладів до табл. 6.2. При цьому щоразу встановлювати струм вторинного ланцюга ( $I_2$ ) відповідно коефіцієнту завантаження трансформатора  $\beta$  ( $\beta = \frac{I_2}{I_{2H}}$ ).

Таблиця 6.2 – Дослід КЗ

| $\beta$ | Результати вимірювань |                |              |                | Результати обчислень |              |              |              |
|---------|-----------------------|----------------|--------------|----------------|----------------------|--------------|--------------|--------------|
|         | $U_{1K},$<br>В        | $I_{1K},$<br>А | $P_K,$<br>Вт | $I_{2K},$<br>А | $\cos \varphi_K$     | $Z_K,$<br>Ом | $r_K,$<br>Ом | $X_K,$<br>Ом |
| 0,25    |                       |                |              |                |                      |              |              |              |
| 0,5     |                       |                |              |                |                      |              |              |              |
| 0,75    |                       |                |              |                |                      |              |              |              |
| 1       |                       |                |              |                |                      |              |              |              |
| 1,25    |                       |                |              |                |                      |              |              |              |
| 1,5     |                       |                |              |                |                      |              |              |              |

5. Провести дослід безпосереднього навантаження, для чого встановивши напругу на первинній обмотці трансформатора 220 В, та змінюючи опір навантаження і контролюючи коефіцієнта завантаження  $\beta$  записати показання приладів до табл. 6.3 (6...7 значень).

Таблиця 6.3 – Дослід безпосереднього навантаження

| $\beta$ | Результати вимірювань |             |              |             |             |              | Результати обчислень |                  |                  |
|---------|-----------------------|-------------|--------------|-------------|-------------|--------------|----------------------|------------------|------------------|
|         | $U_1,$<br>В           | $I_1,$<br>А | $P_1,$<br>Вт | $U_2,$<br>В | $I_2,$<br>А | $P_2,$<br>Вт | $\eta,$<br>%         | $\cos \varphi_1$ | $\cos \varphi_2$ |
| 0       | 220                   |             |              |             |             |              |                      |                  |                  |
| ...     |                       |             |              |             |             |              |                      |                  |                  |
| 1,5     |                       |             |              |             |             |              |                      |                  |                  |

### Обробка результатів. Зміст звіту

1. Заповнити таблиці, використовуючи для обрахунку наступні формули:

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{I_{10} U_{10}}; Z_0 = \frac{U_{10}}{I_{10}}; r_0 = \frac{P_0}{I_{10}^2}; X_0 = \sqrt{Z_0^2 - r_0^2};$$

$$\cos \varphi_K = \frac{P_K}{I_{1K} U_{1K}}; Z_K = \frac{U_{1K}}{I_{1K}}; r_K = \frac{P_K}{I_{1K}^2}; X_K = \sqrt{Z_K^2 - r_K^2};$$

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{U_1 I_1}; \cos \varphi_2 = \frac{P_2}{U_2 I_2};$$

$$P_{CT} = P_0 \text{ (з дослідів ХХ)}; P_M = P_K \text{ (з дослідів КЗ)};$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{\beta P_1}{\beta P_1 + P_{CT} + \beta^2 P_M} \cdot 100\%$$

2. Побудувати залежності  $U_2, \eta, \cos \varphi_1, \cos \varphi_2$  від  $I_2$ , приблизний вигляд яких наведений на рис. 6.2.

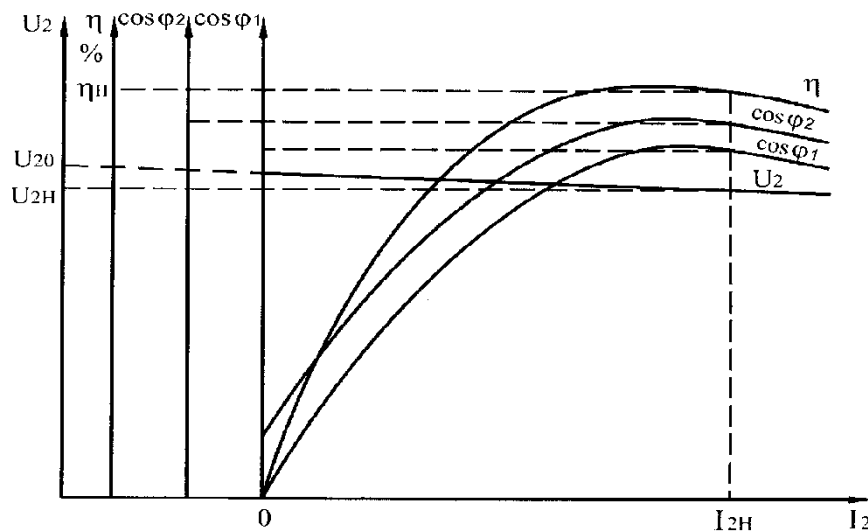


Рисунок 6.2 – Графіки залежностей  $U_2, \eta, \cos \varphi_1, \cos \varphi_2$  від  $I_2$

### Контрольні запитання

1. Схема, конструкція і принцип дії однофазного трансформатора.
2. Що таке коефіцієнт трансформації, втрати потужності в сталі та міді?
3. Чим пояснити збільшення струму первинної обмотки трансформатора, при збільшенні струму навантаження?
4. ККД і  $\cos \varphi$  трансформатора і їх залежність від навантаження?

## ЛАБОРАТОРНО – ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ №7.

### ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

**Мета:** визначення експлуатаційних властивостей асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором методом безпосереднього навантаження.

#### Програма роботи

1. Здійснити прямий пуск асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором.
2. Здійснити реверс асинхронного двигуна.
3. Провести дослід безпосереднього навантаження двигуна.
4. Побудувати характеристики асинхронного двигуна.
5. Провести аналіз отриманих характеристик і зробити висновки про експлуатаційні властивості досліджуваного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором.

#### Порядок виконання роботи



1. Записати паспортні дані досліджуваного двигуна.
2. Зібрати схему для проведення досліду безпосереднього навантаження АД згідно з рис. 7.1.
3. Провести дослід безпосереднього навантаження, для чого змінюючи за допомогою перемикачів SA1-SA3 опір навантаження записувати показання приладів до табл. 7.1 (7 вимірів). Попередньо виставити по pV3 напругу на обмотці збудження 220 В.

Таблиця 7.1 – Дослід безпосереднього навантаження

| № пор | Увімкнені перемикачі | Результати вимірювань |           |            |             |           |           | Результати обчислень |            |                |
|-------|----------------------|-----------------------|-----------|------------|-------------|-----------|-----------|----------------------|------------|----------------|
|       |                      | $U_1$ , В             | $I_1$ , А | $P_1$ , Вт | $n$ , об/хв | $U_2$ , В | $I_2$ , А | $P_2$ , Вт           | $\eta$ , % | $\cos \varphi$ |
| 1     | -                    |                       |           |            |             |           |           |                      |            |                |
| 2     | S1                   |                       |           |            |             |           |           |                      |            |                |
| 3     | S1, S2               |                       |           |            |             |           |           |                      |            |                |
| 4     | S1, S2, S3           |                       |           |            |             |           |           |                      |            |                |

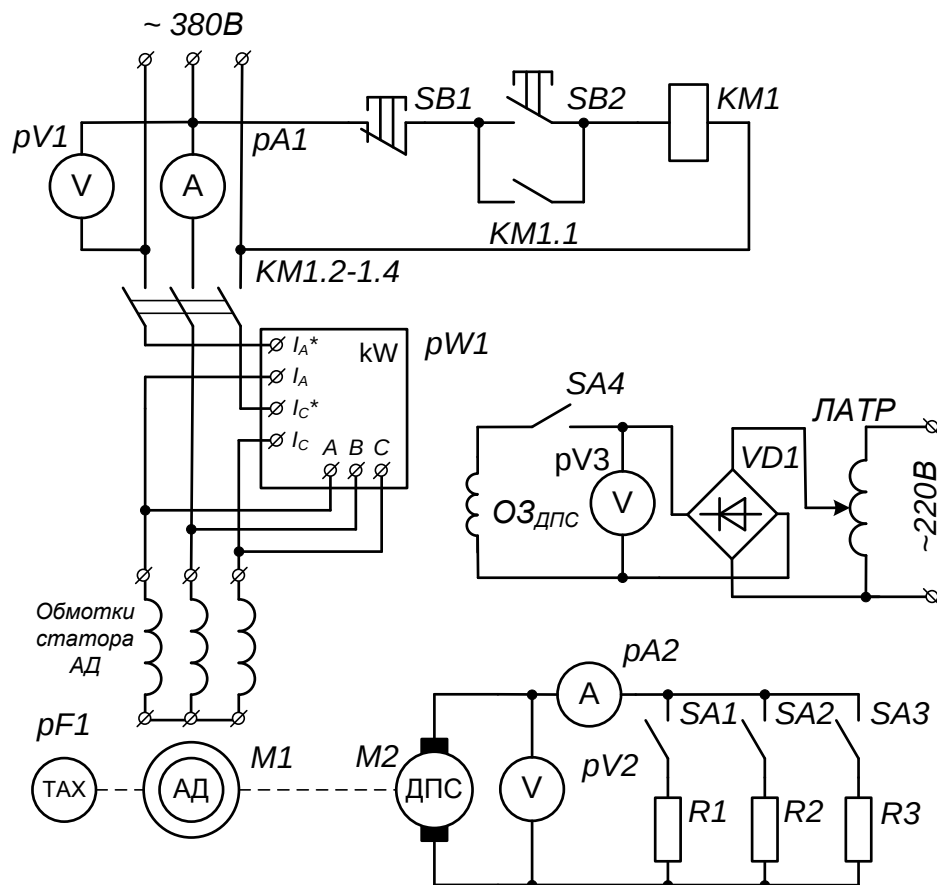


Рисунок 7.1 – Схема для дослідження трифазного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором

## Обробка результатів. Зміст звіту

1. Заповнити таблиці, використовуючи для обрахунку наступні формули:

$$P_2 = \frac{E_2 I_2}{\eta_{\text{дпс}}}; n_0 = \frac{60f}{p}; s = \frac{n_0 - n}{n_0}; \eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\%; \cos \varphi = \frac{P_1}{3\sqrt{3}U_1 I_1};$$

де  $\eta_{\text{дпс}}$  – ККД двигуна постійного струму (М2);  $f = 50$  Гц – частота мережі;  
 $p$  – число пар полюсів АД (для даного двигуна  $p=2$ ).

2. Побудувати характеристики асинхронного двигуна з КЗ ротором:

$$n = f(M) \text{ (приблизний вигляд на рис. 6.2); } \eta = f(P_2); \cos \varphi = f(P_2).$$

Формули, що необхідні для побудови цих характеристик:

$$M = \frac{9,750P_2}{n}; M_H = \frac{9,750P_H}{n_H}; M_{\Pi} = (1,1..1,6)M_H;$$

$$\gamma = 1,6..2,2; M_K = \gamma M_H; s = \frac{n_0 - n_H}{n_0}; s_K = s_H (\gamma + \sqrt{\gamma^2 - 1})$$

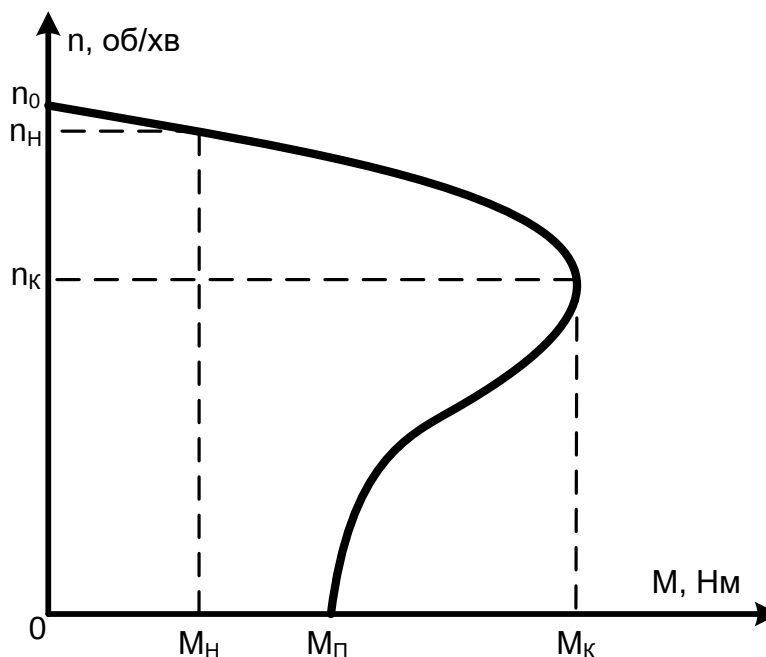


Рисунок 7.2 – Приблизний вигляд графіку  $n = f(M)$

## Контрольні запитання

1. Схема , конструкція і принцип роботи асинхронного двигуна з КЗ ротором.
2. Порядок прямого і автотрансформаторного пуску асинхронного двигуна, його реверс.
3. Як змінюється частота обертання асинхронного двигуна і момент від напруги?

## ЛАБОРАТОРНО – ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ №8.

### ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ КОНТАКТОРІВ І МАГНІТНИХ ПУСКАЧІВ

**Мета:** ознайомлення з призначенням принципом дії конструкцією особливостями роботи електромагнітних контакторів постійний і перемінний токи і магнітні пускачі, а також експериментальне визначення їхніх основних параметрів.

#### 8.1 Завдання

1. Ознайомитися зі стендом для дослідження контакторів і магнітного пускача, приладами й апаратами, установленими на робочому місці: призначенням, принципом дії і конструктивних особливостей контакторів постійний і перемінний токи, а також магнітного пускача (контакти, дугогасительная і магнітної системи).

2. Визначити значення напруги і струмів втягування і відпадіння для контакторів постійний і перемінний токи, а також магнітного пускача. Розрахувати коефіцієнт повернення.

3. Визначити власний час включення і відключення контакторів постійний і перемінний токи і магнітний пускач при номінальній напрузі.

4. Визначити залежність часу включення від величини напруги, подаваного на обмотку електромагніта контакторів і магнітного пускача.

5. Для контактора перемінного струму при номінальній напрузі визначити струм і потужність, споживані котушкою напугай замкнутої і розімкнутий магнітних системах.

6. Розрахувати параметри котушки (активний, реактивний і повний опори) при замкнутій і розімкнутої магнітних системах.

#### 8.2.Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися зі стендом для дослідження контакторів постійний і перемінний токи і магнітний пускач.

Принципова схема дослідження контакторів і магнітного пускача зображена на рис.8.1. Вимикач SA1 підключає харчування до схеми. Підключення контакторів постійний чи перемінний токи і магнітний пускач здійснюється перемикачем SA2. У положенні 1

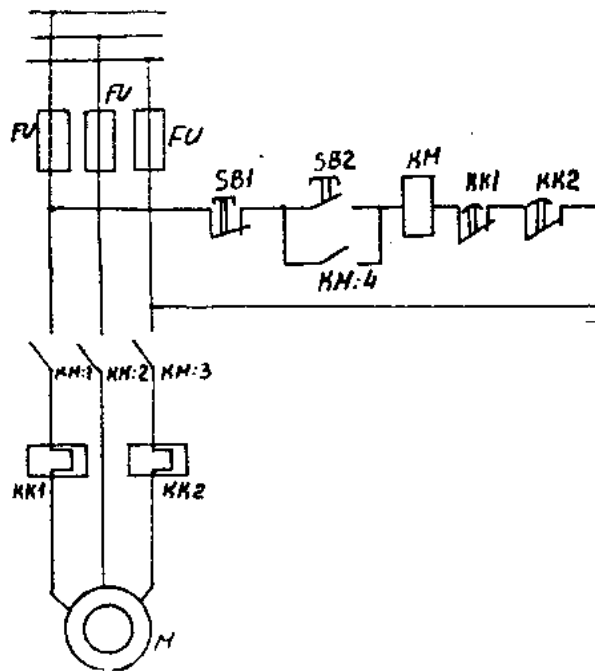


Рис. 8.1 Схема включення нереверсивного пускача

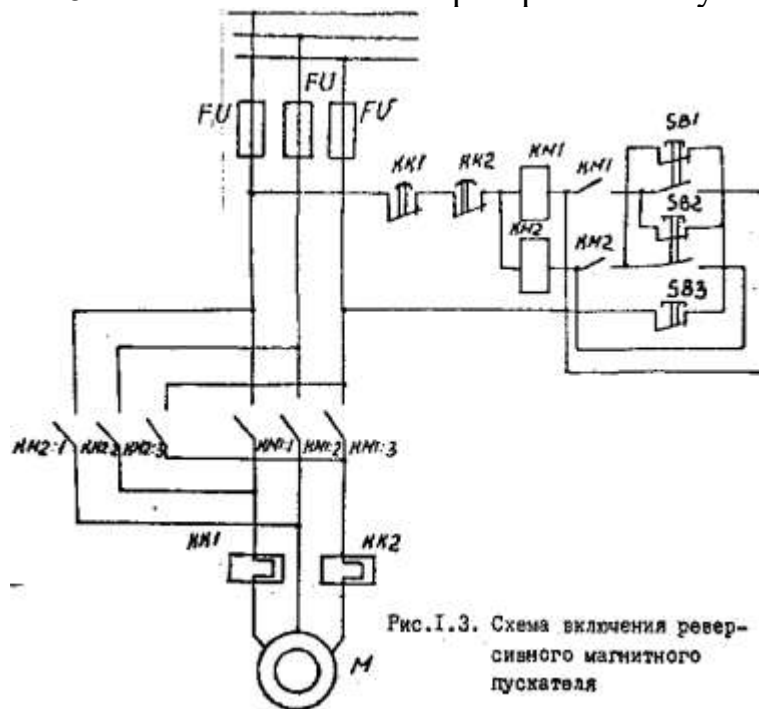


Рис.І.3. Схема включення реверсивного магнітного пускателя

Рис. 8.2 Схема включення реверсивного пускача

підключається контактор змінного струму та магнітний пускач, а в положенні 2 - контактор постійного струму. Магнітний пускач КМЗ чи контактор перемінного струму КМ2 підключається перемикачем SA3: у положенні 1 - магнітний пускач КМЗ, а в положенні 2 — контактор перемінного струму КМ2. За допомогою перемикача SA4 визначається час включення (у положенні 2) і відключення (у положенні 1) контакторів МК1-20УЗ (КМ1) і КТ7000 (КМ2) і магнітний пускачі ПМЕ211 (КМ3). Кнопка 5В підключає ватметр до схеми. Перемикач 5А5 служить для зміни діапазону виміру амперметра РА2. У верхнім положенні перемикача SA5 межа виміру амперметра РА2 складає 0,5 А, а в нижньому положенні - 5 А.

При вивченні призначення, принципу дії і конструкції контакторів варто звернути увагу на основні поняття і визначення, що відносяться до роботи контакторів: категорії

застосування і режими роботи, механічна й електрична зносостійкість, номінальні параметри (струм, напруга), час включення і відключення, конструктивні особливості.

Вивчаючи призначення магнітних пускачів (див. літературу), необхідно усвідомити схеми їхнього включення. Схема включення нереверсивного магнітного пускача, призначеного для пуску і зупинки трифазних асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором, показана на рис.8.2, а схема включення реверсивного пускача - на рис.8.3. Варто з'ясувати призначення всіх елементів, що входять у зазначені схеми. Крім того, потрібно звернути увагу на види захисту, здійснювані магнітними пускачами, - максимальну і нульову.

При вивченні принципу дії магнітного пускача важливо звернути увагу на склад пускача й особливості роботи окремих його елементів - контактора, теплових реле, кнопкових станцій; з'ясувати зміст основних термінів і визначень, таких, як уставка спрацьовування, захисна характеристика, напруги і струми спрацьовування і відпустки, час включення і відключення; з'ясувати призначення кнопки-повернення і важільця уставки теплового реле (рис.7.4); пояснити, чому в магнітних пускачах застосовуються двохполюсні, а також однополюсні теплові реле. При поясненні можна скористатися векторною діаграмою, зображеної на рис. .7.5.

2.Напруга (струм) утягування, тобто найменша напруга (струм) на затисках котушки електромагніта контактора (магнітного пускача), при якому якір починає переміщатися до повного притягання до сердечника без проміжних зупинок, визначити в такий спосіб. Перемикач SA2 поставити в положення 2 (це означає, що напруга подана на обмотку контактора постійного струму МК1—20У3), а перемикач SA4 — у нейтральне положення. Плавно підвищуючи трансформатором TV напруга, по вольтметрі P<sub>v1</sub> і амперметру P<sub>A1</sub> замірити напруга і струм утягування.

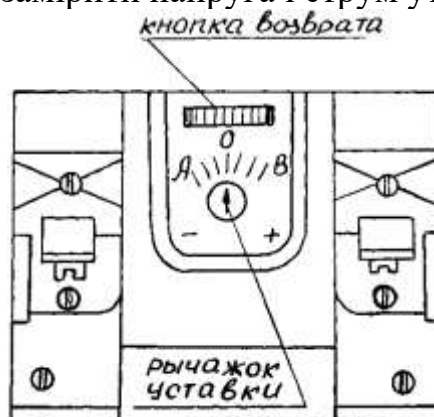


Рис 8.4 Теплове реле

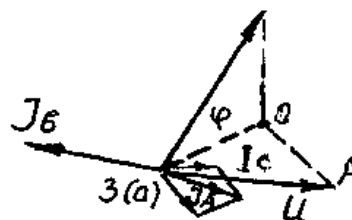


Рис 8.5 Векторна діаграма

Напруга (струм) відпадиння, тобто найбільша напруга (струм) на затисках котушки електромагніта контактора (магнітного пускача), при якому якір починає переміщатися

(відпадати) і приходить у вихідне положення без зупинок у проміжних станах, визначити наступний образом. Трансформатором TV знизити напруга від номінального значення і по вольтметрі P<sub>V1</sub> і амперметру P<sub>A1</sub> замірити напруга і струм відпадиння.

Аналогічно варто визначити параметри втягування і відпадиння для контактора перемінного струму КТ7000 і магнітного пускача ПМЕ211. Реєстрація параметрів зробити по вольтметрі PV2 і амперметру РА2 , при цьому перемикачі перевести: SA2 - у положення 1, а SA3 у верхнє положення 1 ( напруга подається на обмотку магнітного пускача ПМЕ211) чи в нижнє положення 2 ( напруга подається на обмотку контактора перемінного струму КТ7000).

Коефіцієнт повернення розрахувати по наступним формулах;

$$K_B = \frac{\mu_{OM}}{\mu_{BT}} \text{ чи } K_B = \frac{I_{OM}}{I_{BT}},$$

де  $U_{om}, I_{om}$  напруга і струм відпадиння.

$U_{BT}, I_{BT}$  напруга і струм утягування.

По зазначеній формулі необхідно розрахувати коефіцієнт повернення для обох контакторів і магнітного пускача. Експериментальні і розрахункові дані занести в табл.8.1.

Таблиця 8.1.

| Тип контактора,<br>магнітного пускача | Номер досвіду    | $U_{BT}$ В | $U_{OM}$ В | $I_{BT}$ А | $I_{OM}$ А | $K_B$ | $t_B$ с | $t_c$ с |
|---------------------------------------|------------------|------------|------------|------------|------------|-------|---------|---------|
| <b>МК1-20УЗ</b>                       | 1                |            |            |            |            |       |         |         |
|                                       | 2                |            |            |            |            |       |         |         |
|                                       | 3                |            |            |            |            |       |         |         |
|                                       | середнє значення |            |            |            |            |       |         |         |
| <b>КТ7000</b>                         | 1                |            |            |            |            |       |         |         |
|                                       | 2                |            |            |            |            |       |         |         |
|                                       | 3                |            |            |            |            |       |         |         |
|                                       | середнє значення |            |            |            |            |       |         |         |
| <b>ПМЕ211</b>                         | 1                |            |            |            |            |       |         |         |
|                                       | 2                |            |            |            |            |       |         |         |
|                                       | 3                |            |            |            |            |       |         |         |
|                                       | середнє значення |            |            |            |            |       |         |         |

3. Для визначення власних часів включення і відключення контакторів і магнітного пускача (рис.8.6) подати на котушку електромагніта номінальна напруга 220 В., поставивши перемикач SA4 у положення 2, а перемикач SA2 з нейтрального положення перевести в положення 2 і по електричному секундомірі РТ замірити власний час включення контактора постійного струму.

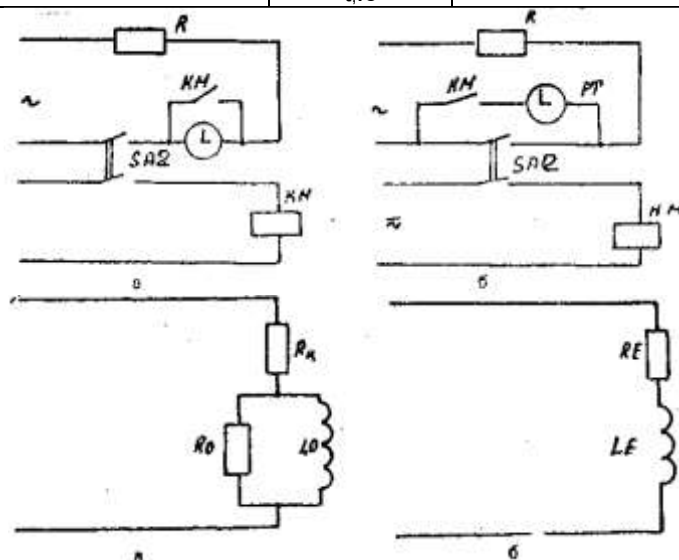
Потім перемикач SA3 поставити в положення 2, а перемикач SA2 перевести в положення І і замірити власний час включення контактора перемінного струму. Поставивши перемикач SA3 у положення 1 і перевівши перемикач SA2 з нейтрального положення в положення 1 , замірити власний час включення магнітного пускача. Потім перемикач SA4 поставити в положення 1, а перемикач SA2- у положення 2 (контактор постійного струму спрацює), після чого SA2 перевести в нейтральне положення і по електричному секундомірі РТ замірити власний час відключення контактора постійного струму. Для виміру власного часу відключення контактора перемінного струму перемикач SA3 поставити в положення 2, а перемикач SA2- у положення 1, а потім перевести його в нейтральне положення. Аналогічно визначають власний час відключення магнітного пускача, попередньо поставивши перемикач SA3 у положення 1. Для одержання більшої точності кожен досвід варто повторити 10 разів, не скидаючи показання секундоміра, і результат розділити на 10. Результати занести в табл.8.1.

4. для визначення залежності власного часу включення від величини напруги, подаваного на котушку електромагніта контактора постійний чи перемінний токи і

магнітний пускач, змінювати напруга від  $U_H$  до  $0,6U_H$  через кожні 10 В. Визначити власні часи включення по електричному секундомірі РТ аналогічно методу, описаному в п.3. Експериментальні дані занести в табл. 8.2.

Таблиця 8.2.

| Тип контактора, магнітного пускача | Параметри    | Експериментальні дані |
|------------------------------------|--------------|-----------------------|
| МК1-20У3                           | U, В<br>t, с |                       |
| КТ7000                             | U, В<br>t, с |                       |
| ПМЕ211                             | U, В<br>t, с |                       |



5. Для контактора КТ7000 при  $U = 220$  В визначити величини струму і потужності, споживані котушкою електромагніта при притягнутому якорі, для цього необхідно виконати наступні операції. Перемикач SA2 установити в положення 1, перемикач SA4- у нейтральне положення, а вимикач SA1 - у верхнє положення. Трансформатором TV по вольтметрі PV2 виставити номінальна напруга 220 В, при якому якір буде притягнутий до сердечника. По амперметрі PA2 і ватметру PW визначити струм і потужність, споживані котушкою при замкнутій магнітній системі. При цьому кнопку SB натиснути і тримати до закінчення виміру потужності по ватметру. У цьому досвіді перемикач SA5 поставити на межу виміру 0,5 А. Потім, не знижуючи трансформатором TV напруги, вимикач SA1 перевести в нижнє положення, відключивши тим самим вимірювальний ланцюг від мережі. Якір відпадає від сердечника. Перемикач SA5 обов'язково поставити на межу виміру 5 А. Для виміру струму і потужності, споживаних котушкою при розімкнутій магнітній системі, натиснути кнопку SB і, утримуючи рукою якір електромагніта, перевести вимикач SA1 у верхнє положення. По ватметру PW і амперметрі PA2 визначити потужність і струм, споживані котушкою при розімкнутій магнітній системі, Останній досвід необхідно провести досить швидко щоб уникнути нагрівання котушки.

Експериментальні дані занести в табл.8.3.

Таблиця 8.3.

Тип контактора КТ7000,  $R_K=40 \text{ Ом}$ ,  $U=U_n-220 \text{ В}$

| Положення якоря | Дослідні дані | Розрахункові дані |       |        |        |     |        |        |
|-----------------|---------------|-------------------|-------|--------|--------|-----|--------|--------|
|                 | N             | I, A              | Z, Ом | RE, Ом | LE, Гн | cos | Ro, Ом | Lo, Гн |
| Притягнутий     |               |                   |       |        |        |     |        |        |
| Відпущений      |               |                   |       |        |        |     |        |        |

6. Якщо не враховувати потоки розсіювання, то схема заміщення обмотки зі сталевим сердечником може бути зображена на рис.8.7.а. Резистор  $R_K$  являє собою активний опір обмотки. Резистор  $R_O$  враховує втрати в сталі в короткозамкнених витках.  $L_O$  -індуктивність обмотки.

Дана схема може бути заміщена більш простий (рис.8.7,б), причому  $RE$  і  $LE$  є деякі еквівалентні величини. Величини  $i$  і  $L$  підбирають так, щоб в обох схемах був той самий струм  $I$  і той самий кут зрушення фаз  $\varphi$  між напругою  $U$  і струмом  $I$ .

Величини  $RE$  і  $LE$  легко визначити за результатами попереднього досвіду:

$$Z = \frac{\mu}{l} \cos \varphi = \frac{N}{\mu l} :$$

$$RE = Z \cdot \cos \varphi :$$

$$LE = \frac{Z}{\omega} \cdot \sin \varphi$$

де  $Z$ -повний опір обмотки:

$$\omega\text{- кругова частота: } \omega = 2\pi f = 2 \cdot \pi \cdot 50 \approx 314 \frac{1}{c}$$

Якщо опір  $R_K$  заданий, то величини  $R_O$  і  $L_O$  можна розрахувати по формулах, отриманим, виходячи з еквівалентності схем, зображених на схемах на рис. 7.7:

$$R_O = R_e - R_k + \frac{\omega^2 \cdot L_e^2}{R_e - R_k} :$$

$$L_O = L_e + \frac{(R_e + R_k)^2}{L_e \cdot \omega^2}$$

### Контрольні запитання

1. Дослідити трифазний асинхронний двигун?
2. Ознайомитися зі стендом для дослідження контакторів постійного і змінного струму і магнітний пускач?
3. Проаналізувати схеми включення реверсивного пускача?
4. Навчитися складати векторні діаграми?

## ЛАБОРАТОРНО – ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ №9.

### ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВИХ РЕЛЕ ЗАХИСТУ

**Мета:** ознайомлення з конструкцією і технічними даними біметалічних розчеплювачів теплових реле і автоматів; визначення їхньої час-струмових характеристик.

#### 9.1. Завдання



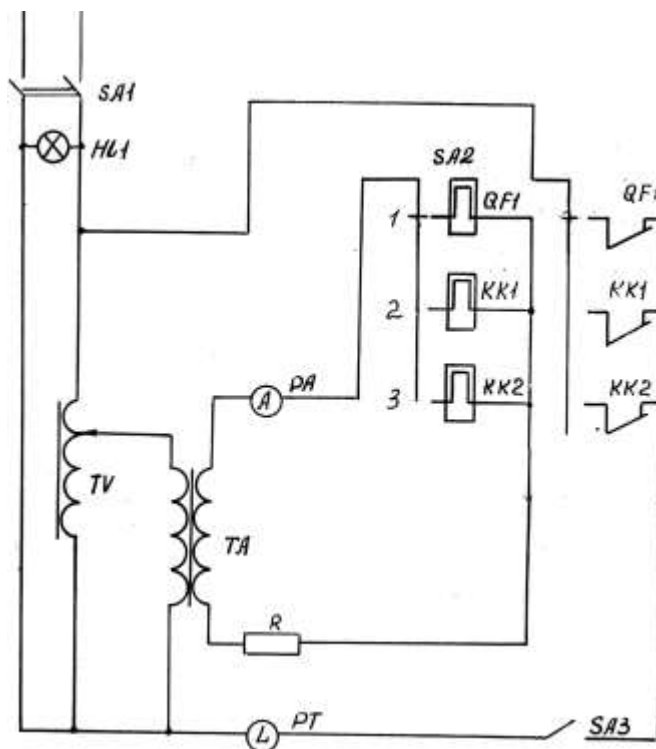
1. Ознайомитися з призначенням, принципом дії і конструкцією теплових реле ТРТ-121, ТРН-40 і автоматом АП-50, а також зі схемою для дослідження, приладами та автоматами, установленими на робочому місці.
2. Визначити дослідним шляхом часо-токові характеристики біметалічних розчеплювачів теплових реле та автомата при заданих положеннях регулювального повідця.
3. Визначити дослідним шляхом залежність часу спрацьовування біметалічного розчеплювача теплового реле від положення регулювального повідця при фіксованому значенні струму.

## 9.2. Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися зі стендом і схемою (мал.9.1.) для дослідження біметалічних розчеплювачів тепловим реле та автомата.

Вимикач SA1 підключає джерело перемінної напруги до схеми. Лампочка HL1 сигналізує про наявність напруги. Величина струму, що протікає по нагрівальному елементі біметалічного розчеплювача, регулюється автотрансформатором TV і реєструється амперметром PA. Трансформатор струму ТА знижує напругу при одночасному збільшенні струму в ланцюзі навантаження R. Почергове підключення теплових реле та автомата до схеми дослідження здійснюється за допомогою перемикача SA2. Вимикач SA3 служить для включення електросекундоміра PT, за допомогою якого визначається час спрацьовування біметалічних розчеплювачів.

2. Для визначення час-токових характеристик за допомогою перемикача до схеми дослідження підключається відповідний апарат відповідно до варіанта, представленому в табл.9.1.



Таблиця 9.1

| Визначення    | Варіанти |  |  |  |  |
|---------------|----------|--|--|--|--|
|               |          |  |  |  |  |
| час-струмової |          |  |  |  |  |

|                                          |    |    |    |    |    |
|------------------------------------------|----|----|----|----|----|
| характеристики                           | П  | РН | РТ | П  | РН |
| залежності часу від<br>положення поводка | РН | РТ | РН | РТ | РТ |

Регулювальний повідець розчеплювача установити в середнє (нульове) положення. Уключити вимикач 5A1 і за допомогою автотрансформатора TV установити первісне значення струму відповідно до табл.9.2.,

Таблиця 9.2

|                                 |  |   |   |   |   |   |
|---------------------------------|--|---|---|---|---|---|
| Струм, А                        |  | 0 | 5 | 0 | 5 | 0 |
| Час спрацювання<br>розчеплювача |  |   |   |   |   |   |

виключити SA1, включити SA3 і включити SA1.

Під час установки струму біметалічний розчеплювач прохолоджується вентилятором (при відключеному секундомірі). Відразу після спрацювання розчеплювача за допомогою автотрансформатора TV установити нульове значення струму, відключити вимикачем SA3 електросекундомір, записавши його показання в табл. 9.2, а потім показання звести на нуль. Одночасно з відключенням електросекундоміра автоматично включається вентилятор, за допомогою якого в пліні двох хвилин прохолоджується нагрівальний елемент біметалічного розчеплювача. Після охолодження розчеплювача варто натиснути кнопку повернення теплового чи реле кнопку "ПРО" автомат і за допомогою автотрансформатора TV установити наступне по табл.9.2. значення струму. Відразу ж після установки струму відключити вимикач SA1, уключити SA3 і знову включити SA1. Зробити вимір часу по електросекундоміру і повторити досвід для інших значень струму. Виключити вимикач SA1. Значення витримок часу спрацювання розчеплювача для кожного значення струму занести в табл.9.2. За даними табл. 9.2 побудувати графік залежності  $t = f(I)$  для середнього положення регулювального повідця.

3.Для визначення залежності часу спрацювання біметалічного розчеплювача теплового реле від положення регулювального повідця за допомогою перемикача SA2 підключити до схеми дослідження теплове реле відповідно до варіанта по табл.9.1. Установити регулювальний повідець досліджуваного реле в перше положення згідно табл.9.3.

Таблиця 9.3

|                                              |    |   |   |   |  |  |  |
|----------------------------------------------|----|---|---|---|--|--|--|
| № положення                                  |    |   |   |   |  |  |  |
| Положення регулювального<br>повідця для реле | РТ | 3 | 2 | 1 |  |  |  |
|                                              | РН |   |   |   |  |  |  |
| Час спрацювання розчеплювача, с              |    |   |   |   |  |  |  |

Включити виключити вимикач SA1 і за допомогою автотрансформатора TV установити в ланцюзі нагрівального елемента струм, рівний 10 А при відключеному секундомірі. Виключити SA1, уключити SA3 і знову включити SA1. Відразу після спрацювання розчеплювача установити за допомогою автотрансформатора TV нульове значення струму в ланцюзі, зробити вимір часу та установити нуль на електросекундомірі. Виключити SA3 і протягом 2 хв. прохолоджувати за допомогою вентилятора нагрівальний елемент теплового реле. Перевести регулювальний повідець на наступне положення згідно табл.9.3 і натиснути кнопку повернення теплового реле.

Установити автотрансформатором TV струм у ланцюзі, рівний 10 А, і відразу виключити SA1. Уключити SA3 і знову включити SA1. Зробити вимір часу по електросекундоміру і повторити досвід для наступного положення регульовального повідця.

Значення витримок часу спрацьовування розчеплювача для кожного положення регульовального повідця занести в табл.9.3. За даними табл.9.3 побудувати графік залежності часу спрацьовування від положення регульовального повідця при струмі, рівному 10 А.

### **Контрольні запитання**

1. Ознайомитися з призначенням, принципом дії і конструкцією теплових реле ТРТ-121, ТРН-40 і автоматом АП-50?

2. Визначити дослідним шляхом часо-токові характеристики біметалічних розчеплювачів теплових реле?

3. Визначити дослідним шляхом залежність часу спрацьовування біметалічного розчеплювача теплового реле від положення регульовального повідця при фіксованому значенні струму?

Сіренко Віктор Федорович  
Савойський Олександр Юрійович  
Вольвач Тетяна Сергіївна

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**  
**до виконання лабораторно - практичних робіт**  
**для студентів 2 та 1 с.т. курсів спеціальності**  
**208 "Агроінженерія"**  
**ОС «Бакалавр»**  
**денної та заочної форм навчання**

Сумський НАУ, вул.. Г. Кондратьєва 160

---

Підписано до друку      р. Тираж 20 прим. Гарнитура. Times New Roman.  
Умовн. Друк. арк. 2,0 замовл.

---