

Волинський національний університет імені Лесі Українки  
Навчально-науковий фізико-технологічний інститут

**Кафедра експериментальної фізики  
та інформаційно-вимірювальних технологій**

**Андрій Кевшин**

# **ЕЛЕКТРОТЕХНІКА**

методичні рекомендації  
до виконання лабораторних робіт

Луцьк

2023

УДК 539.2  
К-33

Рекомендовано до друку науково-методичною радою Східноєвропейського національного університету імені Лесі Українки (протокол № 6 від 15 лютого 2023 р.).

**Рецензенти:** *Назарчук П. Ф.* – канд. фіз.-мат. наук, доцент, кафедри фізики та вищої математики, ЛНТУ;

*Трохимчук П. П.* – канд. фіз.-мат. наук, доцент, кафедра теоретичної та комп'ютерної фізики імені А. В. Свідзинського, ВНУ імені Лесі Українки.

**К 33** Кевшин А. Г. **Електротехніка** : методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт. Луцьк, 2023. 51 с.

Методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Електротехніка» – складова комплексу робочих матеріалів написаних на українській мові, створених для забезпечення якісної практичної підготовки фахівців галузей знань 10 Природничі науки, 01 Освіта, галузей знань технічних наук.

Навчально-методичне видання відповідає чинним навчальним програм підготовки й рекомендовано здобувачам освіти спеціальностей 105 Прикладна фізика та наноматеріали, 014 Середня освіта (Фізика), 104 Фізика та астрономія, спеціальностей галузей технічних наук.

ББК 22.37  
УДК 539.2

© Кевшин А. Г. 2023  
© Волинський національний  
університет імені Лесі Українки, 2023

## ЗМІСТ

|   |    |
|---|----|
| ВСТУП   | 4  |
| ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ЩОДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ ТА<br>ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ  | 5  |
| Лабораторна робота №1.<br>ДОСЛІДЖЕННЯ ЛІНІЙНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА ЗМІННОГО<br>СТРУМУ З ПОСЛІДОВНИМ З'ЄДНАННЯМ ПРИЙМАЧІВ | 7  |
| Лабораторна робота №2.<br>ДОСЛІДЖЕННЯ КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ  | 14 |
| Лабораторна робота №3.<br>ДОСЛІДНА ПЕРЕВІРКА ЗАКОНІВ КІРХГОФА   | 18 |
| Лабораторна робота №4.<br>ДОСЛІДНА ПЕРЕВІРКА ПРИНЦИПУ НАКЛАДАННЯ СТРУМІВ  | 22 |
| Лабораторна робота №5.<br>ДОСЛІДНА ПЕРЕВІРКА ЕКВІВАЛЕНТНИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ У КОЛІ   | 27 |
| Лабораторна робота №6.<br>ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИФАЗНОГО КОЛА ПРИ ВМИКАННІ ФАЗ<br>СПОЖИВАЧА ЗА СХЕМОЮ ЗІРКИ І ТРИКУТНИКА        | 32 |
| Лабораторна робота №7.<br>ДОСЛІДЖЕННЯ БУДОВИ ТА РОБОТИ ОДНОФАЗНОГО<br>ТРАНСФОРМАТОРА                                    | 39 |
| Лабораторна робота №8.<br>ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З<br>КОРОТКОЗАМКНЕНОЮ ОБМОТКОЮ РОТОРА             | 45 |
| ЛІТЕРАТУРА  | 50 |

## ВСТУП

Курс електротехніки передбачає вивчення основ теорії електромагнетизму. Опанування навчального матеріалу сприятиме отриманню студентами цілісного уявлення про фізичні особливості і закони, яким підпорядковані електромагнітні явища і процеси, що супроводжують генерування, передавання і розподіл електроенергії, про енергетичні процеси у електричних колах, про аналітичні та чисельні методи розрахунки електромагнітного поля.

Предметом вивчення освітньої компоненти «Електротехніка» є електромагнітні явища і їх використання для генерування, передачі і розподілу електроенергії, вирішення проблем електромеханіки, електротехнології, електроенергетики тощо.

Метою даного курсу є вивчення основних законів теорії електричних кіл постійного та синусоїдного струму, ознайомлення з основами роботи електричних машин.

Основними завданнями вивчення дисципліни є ознайомлення студентів з основним законам електричних, магнітних і електромагнітних кіл із структурними елементами й фізичними величинами кіл, теорією і методологією аналізу електричних кіл постійного та змінного струмів.

Методичні вказівки щодо виконання лабораторних робіт з вивчення освітньої компоненти «Електротехніка» для студентів спеціальностей 105 «Прикладна фізика та наноматеріали», 014 «Середня освіта (фізика)», 104 «Фізика та астрономія» ВНУ імені Лесі Українки мають за мету поглибити знання під час виконання лабораторних робіт. Для підготовки до захисту після кожної лабораторної роботи наведені питання, на які здобувач освіти повинен дати вірні відповіді.

Лабораторні роботи з курсу «Електротехніка» є невід'ємною частиною курсу. Вони розроблені таким чином, щоб при виконанні робіт студенти максимально використовували набуті ними теоретичні знання.

## **ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ЩОДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ ТА ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ**

### **Виконання лабораторних робіт**

1. Виконання лабораторної роботи складається з роботи студента у лабораторії, а також самостійної роботи.
2. Самостійно робота студента передбачає:
  - а) теоретичну підготовку до роботи;
  - б) підготовку відповідей на контрольні запитання, що наведені у роботі;
  - в) аналіз результатів дослідів, що виконувались у лабораторії;
  - г) проведення математичних розрахунків та побудова графіків згідно отриманих експериментальних результатів.
3. Теоретична підготовка до наступної лабораторної роботи передбачає:
  - а) вивчення розділів теорії, що визначають зміст та методику досліджень;
  - б) вивчення методичних вказівок до лабораторної роботи з використанням рекомендованих підручників та посібників.
4. Робота студента у лабораторії передбачає наступні етапи:
  - а) отримання допуску до лабораторної роботи;
  - б) отримання дозволу на ввімкнення лабораторної установки;
  - в) проведення дослідів та запис результатів вимірів;
  - г) захист лабораторних робіт.

### **Техніка безпеки**

При виконанні лабораторних робіт з курсу „Електротехніка” використовується напруга змінного і постійного струму до 380 В. При недотриманні правил техніки безпеки така напруга становить серйозну небезпеку.

Опір тіла людини визначається головним чином опором шкірного покриву, що істотно залежить від ступеня зволоження, наявності ушкоджень і т.д. Тому цей опір може змінюватися в дуже широких межах. У розрахунках з техніки безпеки звичайний опір тіла людини беруть рівним 1 кОм.

Електричний струм, проходячи через тіло людини, виконує тепловий, хімічний і біологічний вплив. Хімічна дія струму веде до електролізу крові та інших розчинів, які містяться в організмі, що призводить до зміни їхнього хімічного складу. Біологічна дія електричного струму виявляється в небезпечному порушенні живих клітин організму, що може супроводжуватися судорогами, явищами паралічу.

Ступінь ураження людини і величина електричного удару залежать головним чином від значення струму, який проходить через тіло людини, а також шляху проходження струму в тілі людини і тривалості його проходження.

### **Основні правила з техніки безпеки**

1. Перед початком складання схеми необхідно переконатися в тому, що до робочого столу не подається напруга.
2. Вимірювальні прилади і досліджувані апарати необхідно розміщати таким чином, щоб у процесі виконання роботи була виключена можливість випадкового дотику до оголених струмоведучих частин.
3. Не допускається використання приладів та апаратів з несправними затискачами, провідників з ушкодженою ізоляцією, несправних реостатів, тумблерів та іншого устаткування.
4. Складання схеми необхідно виконувати за можливості без перехрещування провідників, не можна натягувати і згинати провідники. Використані провідники необхідно прибрати з робочого місця.

5. Категорично забороняється проводити будь-які операції на головних розподільних щитах, а також за межами робочого місця.

6. Напругу на схему подають тільки після дозволу викладача, попередивши про це всіх студентів, які працюють на даному робочому місці. При цьому рукоятки регуляторів напруги повинні знаходитися на нульовій позначці.

7. У випадку припинення досліду або перерви в роботі схему необхідно відключити від мережі живлення.

8. Під час лабораторної роботи забороняється: робити перекомутації провідників схеми, яка знаходиться під напругою; торкатися до оголених струмоведучих частин; вмикати схему після будь-яких змін у ній до перевірки викладачем; залишати без догляду схему, яка знаходиться під напругою.

10. У всіх випадках виявлення несправного устаткування, вимірювальних приладів, провідників, з появою специфічного запаху, диму, потрібно вимкнути напругу і негайно сказати про це викладачеві.

11. Після закінчення роботи необхідно вимкнути напругу, розібрати схему, упорядкувати робоче місце.

# Лабораторна робота №1

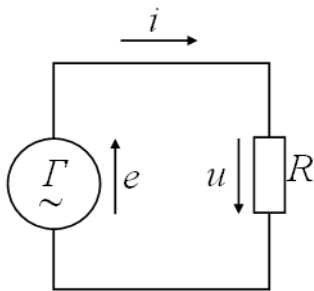
## ДОСЛІДЖЕННЯ ЛІНІЙНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА ЗМІННОГО СТРУМУ З ПОСЛІДОВНИМ З'ЄДНАННЯМ ПРИЙМАЧІВ

**Мета:** експериментально визначити електричні параметри кола з послідовним з'єднанням активних та реактивних елементів.

**Прилади і матеріали:** 1) джерело змінної напруги; 2) амперметр; 3) вольтметр; 4) стенд УТЛЕ01; 5) мультиметри для вимірювання струму та напруги; 6) ватметр; 7) з'єднувальні провідники.

### 1. Теоретичні відомості

На відміну від постійного струму, в колах змінного струму є три види опорів. Розглянемо найпростіший випадок: *електричне коло змінного струму з резистивним елементом* (рис. 1).



**Рис. 1.** Електричне коло змінного струму з активним елементом

Коло з активним опором мусить мати значний опір і дуже малу індуктивність та ємність. Припустимо, що в даному електричному колі на резистивному елементі напруга змінюється з часом за законом

$$u = U_m \sin(\omega t) \quad (1)$$

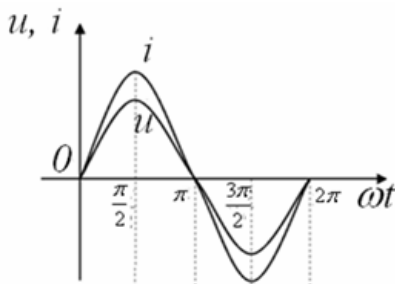
Тоді миттєве значення струму визначатиметься формулою  $i = \frac{u}{R}$ , тобто

$$i = \frac{U_m \sin(\omega t)}{R} = \frac{U_m}{R} \sin(\omega t)$$

Враховуючи, що  $\frac{U_m}{R} = I_m$  – амплітудне значення сили струму, отримаємо закон зміни струму в цьому ж колі

$$i = I_m \sin(\omega t) \quad (2)$$

Порівнюючи формули (1) та (2), можна зробити висновок що у *провіднику з активним опором коливання значення струму за фазою збігаються з коливаннями напруги* (рис. 2), або, як часто кажуть, *зміна струму і спаду напруги на резистивному елементі відбуваються синфазно*, а амплітуду струму визначають за формулою:



**Рис. 2.** Графіки миттєвих значень струму та напруги у колі з активним елементом

$$I_m = \frac{U_m}{R} \quad (3)$$

Розглянемо *електричне коло змінного струму з ємнісним елементом* (рис. 3). При розрахунку потрібно враховувати, що таке коло мусить мати велику ємність і порівняно дуже малу індуктивність.

Припустимо, що струм в колі змінюється за законом  $i = I_m \sin(\omega t)$ , напругу в колі можна означити як різницю потенціалів на обкладинках конденсатора, тобто

$u = u_c$ , де

$$u_c = \frac{q}{C} \quad (4)$$

Відомо, що  $i = \frac{dq}{dt}$ . Звідси:

$$dq = idt = I_m \sin(\omega t) dt$$

Для того, щоб визначити закон, за яким з часом змінюється заряд на обкладинках конденсатора, останню рівність потрібно проінтегрувати по часу:

$$q = \int I_m \sin(\omega t) dt = -\frac{I_m}{\omega} \cos(\omega t) + q'$$

$q'$  – стала величина, математично обумовлена тим, що ми маємо неозначений інтеграл.

Фізично це означає, що в початковий момент часу ( $t=0$ ) конденсатор був заряджений.

Будемо вважати, що в початковий момент часу (момент включення)  $q' = 0$ . Тоді:

$$q = -\frac{I_m}{\omega} \cos(\omega t) = \frac{I_m}{\omega} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

Підставимо це рівняння в (4):

$$u = u_c = \frac{q}{C} = \frac{I_m}{C\omega} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right), \text{ або}$$

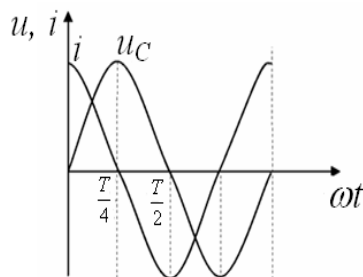
$$u = U_{cm} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \quad (5)$$

де  $\frac{I_m}{C\omega} = U_m$  – амплітудне значення напруги в досліджуваному колі. Величину

$$R_c = X_c = \frac{1}{C\omega} \quad (6)$$

називають *ємнісним опором*.

Порівнюючи закон зміни струму (2) та (5), можна зробити висновок що в колі з ємнісним елементом коливання сили струму випереджають коливання напруги на конденсаторі на  $\frac{\pi}{2}$  (рис. 4).



**Рис. 4.** Графіки миттєвих значень струму та напруги у колі з активним елементом

Електричним колом змінного струму з індуктивним елементом називається коло, яке має індуктивність і дуже малі активний та ємнісний опори (рис. 5). Нехай, струм в такому колі змінюється за гармонічним законом  $i = I_m \sin \omega t$ , який обумовить в котушці індуктивності появу електрорушійної сили самоіндукції

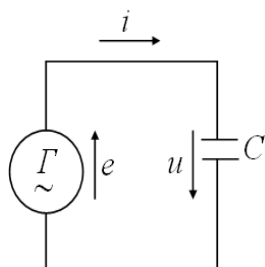
$$e_L = -L \frac{di}{dt} = -L \frac{d(I_m \sin \omega t)}{dt} = -\omega L I_m \cos \omega t = E_{Lm} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

де  $E_{Lm} = \omega L I_m$  – амплітудне значення електрорушійної сили самоіндукції.

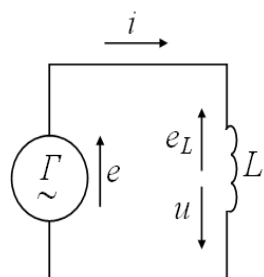
Застосовуючи до кола друге правило Кірхгофа з припущенням, що активний опір котушки дорівнює нулю, отримаємо:

$$u = -e_L = \omega L I_m \cos \omega t = U_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \quad (7)$$

де  $U_m = \omega L I_m$  – амплітудне значення падіння напруги на котушці індуктивності.



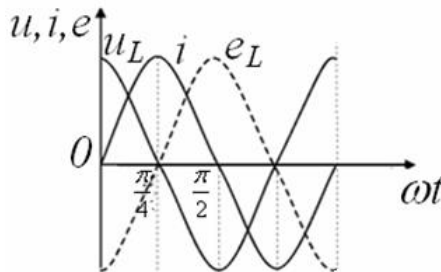
**Рис. 3.** Електричне коло змінного струму з ємнісним елементом



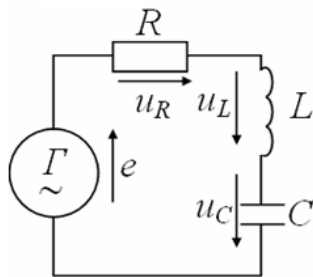
**Рис. 5.** Електричне коло змінного струму з індуктивним елементом



Величину  $R_L = X_L = L\omega$  називають індуктивним опором. Використовуючи це, та те, що  $\cos(\omega t) = \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$ , отримаємо, що напруга в досліджуваному колі змінюється за законом:



**Рис. 6.** Графіки миттєвих значень струму напруги та ЕРС самоіндукції у колі з індуктивним елементом



**Рис. 7.** Електричне коло змінного струму з активним, індуктивним та ємнісним елементом

значеннями цих величин, отримаємо

$$I_m = \frac{U_m}{Z} = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C} - \omega L\right)^2}}$$

При послідовному з'єднанні активного опору  $R$ , індуктивності  $L$  та ємності  $C$ , прикладена до кола напруга  $U$  складається з трьох складових: активної напруги  $U_R = IR$ , яка збігається по фазі із струмом  $I$ , індуктивної напруги  $U_L = I\omega L$ , яка випереджає струм на  $90^\circ$ , і ємнісної напруги  $U_C = I\frac{1}{\omega C}$ , яка відстає від струму на  $90^\circ$ .

Завдяки тому, що індуктивна та ємнісна напруги мають протилежні фази, їх геометричне додавання рівнозначне відніманню відповідних абсолютних величин, і якщо індуктивна напруга має більшу абсолютну величину, ніж ємнісна, то результуюча реактивна напруга

$$U_p = I\omega L - I\frac{1}{\omega C} = I\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)$$

Порівнюючи рівняння струму (2) та напруги (7), можна зробити висновок, що в колі з індуктивністю коливання напруги випереджають коливання сили струму на  $\frac{\pi}{2}$  (рис. 6).

Індуктивний та ємнісний опори залежать від частоти. Якщо електричне поле містить одночасно активний, ємнісний та індуктивний опори (рис. 7), то кажуть, що таке коло містить реактивний опір.

В цьому випадку повний опір буде обчислюватись за формулою:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$$

де  $R$  – активний опір,  $X$  – повний реактивний опір. Повний реактивний опір визначається формулою:

$$X = \frac{1}{\omega C} - \omega L$$

З останніх двох рівнянь можемо записати:

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C} - \omega L\right)^2}$$

Визначивши повний опір кола для змінного струму, можна записати закон Ома для ділянки кола змінного струму:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C} - \omega L\right)^2}}$$

де  $I$  та  $U$  – діючі значення струму та напруги. Використовуючи зв'язок між діючими та амплітудними

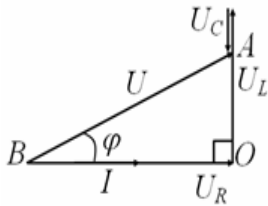
випереджає струм на  $90^\circ$ . Різниця  $\omega L - \frac{1}{\omega C}$  називається реактивним опором і позначається літерою  $X$ :

$$X = \omega L - \frac{1}{\omega C}$$

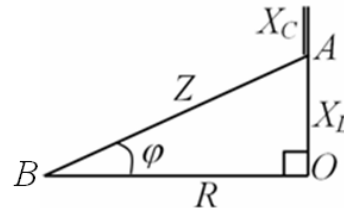
Прикладена до кола напруга  $U$  показана на векторній діаграмі гіпотенузою прямокутного трикутника  $OAB$  (рис. 8).

З рисунка видно, що

$$U^2 = U_R^2 + U_X^2 = I^2 R^2 + I^2 X^2 = I^2 (R^2 + X^2)$$



**Рис. 8.** „Трикутник” напруг для кола з послідовно з’єднаних  $R$ ,  $L$  і  $C$  елементів



**Рис. 9.** „Трикутник” опорів для кола з послідовно з’єднаних  $R$ ,  $L$  і  $C$  елементів

Звідки

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X^2}} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}$$

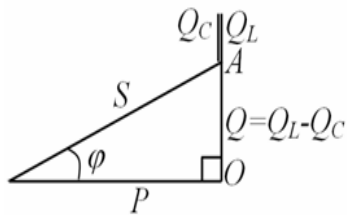
Останній вираз закон Ома для електричного кола з послідовно з’єднаними  $R$ ,  $L$ ,  $C$  елементами.

Ділячи всі сторони трикутника напруг  $OAB$  на струм  $I$ , одержимо трикутник опорів (рис. 9), з якого можна записати наступні співвідношення:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{X}{R}; \quad \cos \varphi = \frac{R}{Z}; \quad \sin \varphi = \frac{X}{Z}.$$

Помноживши сторони трикутника напруг на струм  $I$ , одержимо трикутник потужностей (рис. 10). Сторонами трикутника є:

$$P = U_R I = I^2 R \quad \text{— активна потужність;} \quad Q = Q_L - Q_C = U_L I - U_C I = I^2 (X_L - X_C) \quad \text{— реактивна потужність;}$$



**Рис. 10.** „Трикутник” потужностей для кола з послідовно з’єднаних  $R$ ,  $L$  і  $C$  елементів

$$S = IU = I^2 Z = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad \text{— повна потужність.}$$

З трикутника випливає, що  $P = UI \cos \varphi$ , де  $\cos \varphi$  — косинус кута зсуву фаз між струмом і напругою, який називається коефіцієнтом потужності. Він показує, яка частина повної потужності перетворюється в активну.

На основі проведеного аналізу кола, яке складається з послідовно з’єднаних  $R$ ,  $L$ ,  $C$ -елементів, можна зробити такі висновки:

1. Якщо  $X_L > X_C$ , то напруга мережі випереджає струм на кут  $\varphi$   
 $u = U_m \sin(\omega t + \varphi)$

Коло в цьому випадку має індуктивний характер,  $Q_L > Q_C$ .

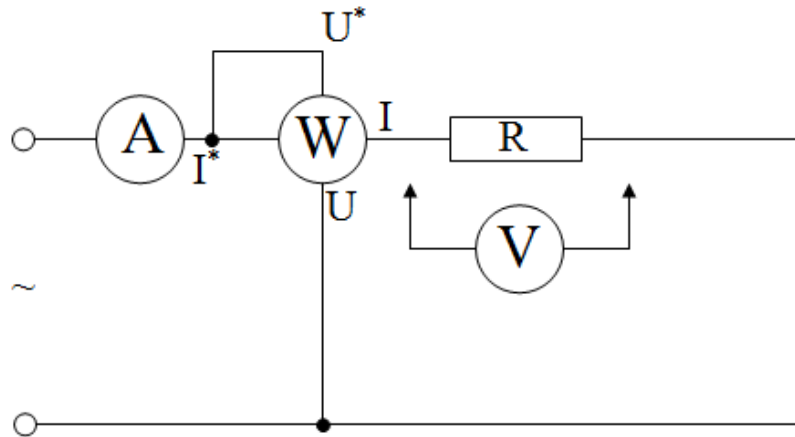
2. Якщо  $X_C > X_L$ , то напруга мережі відстає від струму на кут  $\varphi$   
 $u = U_m \sin(\omega t - \varphi)$

Коло має ємнісний характер,  $Q_C > Q_L$ .

3. У випадку, коли індуктивний та ємнісний опори однакові, тобто  $X = X_L - X_C = 0$ , кут зсуву фаз між напругою і струмом дорівнює нулю ( $\varphi = 0$ ). Такий режим роботи електричного кола має назву – резонанс напруг.

## 2. Хід роботи

1. Ознайомитися з обладнанням стенду УТЛЕ01.
2. Скласти електричне коло, що містить лише активний опір, величину якого визначає керівник занять.

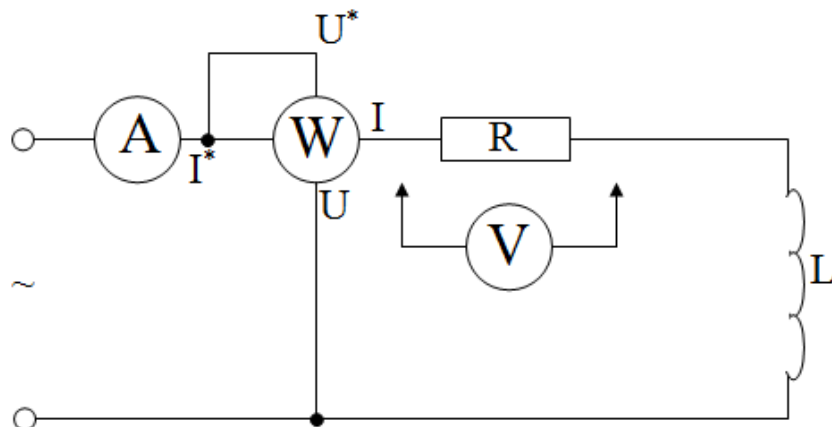


3. Подати в електричне коло напругу, величину якої визначає керівник занять та виміряти величини, наведені у таблиці 1. Коефіцієнт потужності визначити за формулою  $\cos \varphi = \frac{P}{IU}$ .

Таблиця 1

| I, А | U, В | P, Вт | R, Ом | U <sub>R</sub> , В | cosφ |
|------|------|-------|-------|--------------------|------|
|      |      |       |       |                    |      |

4. Намалювати в масштабі векторну діаграму.
5. Скласти електричне коло, що містить активний опір та котушку, індуктивність якої визначає керівник занять.



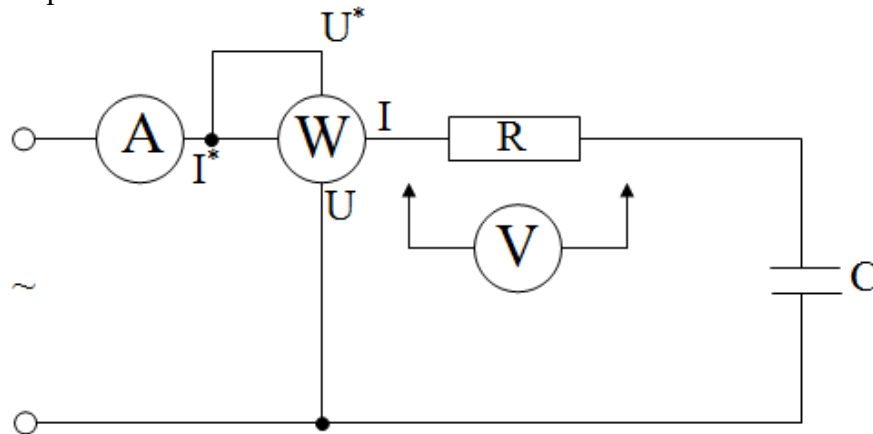
6. Подати в електричне коло напругу величиною, як у таблиці 1, та виміряти величини, наведені у таблиці 2. При визначенні індуктивного опору вважати, що частота змінного струму рівна 50 Гц.

Таблиця 2

| I, А | U, В | P, Вт | R, Ом | U <sub>R</sub> , В | X <sub>L</sub> , Ом | U <sub>L</sub> , В | cosφ |
|------|------|-------|-------|--------------------|---------------------|--------------------|------|
|      |      |       |       |                    |                     |                    |      |

7. Намалювати в масштабі векторну діаграму.

8. Скласти електричне коло, що містить активний опір та конденсатор, ємність якого визначає керівник занять.



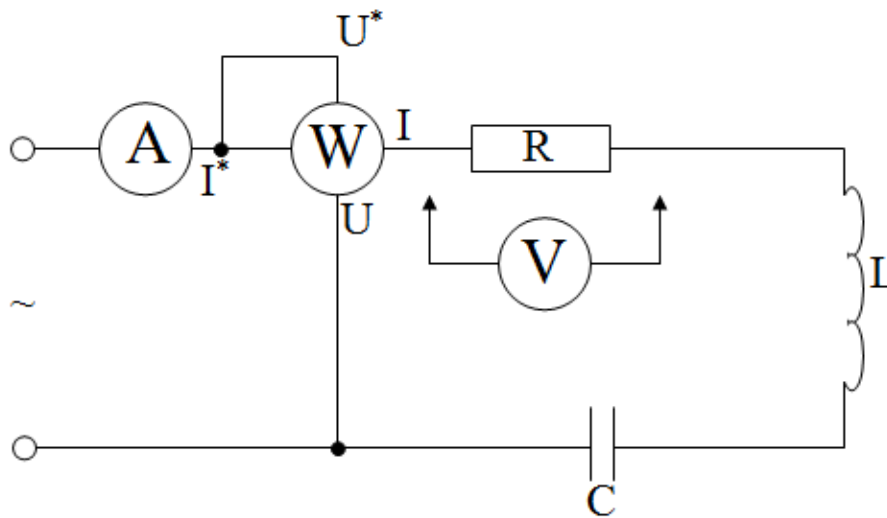
9. Подати в електричне коло напругу величиною, як у таблиці 1, та виміряти величини, наведені у таблиці 3.

Таблиця 3

| I, A | U, B | P, Вт | R, Ом | $U_R$ , B | $X_C$ , Ом | $U_C$ , B | $\cos\varphi$ |
|------|------|-------|-------|-----------|------------|-----------|---------------|
|      |      |       |       |           |            |           |               |

10. Намалювати в масштабі векторну діаграму.

11. Скласти електричне коло, що містить активний опір, котушку індуктивності та конденсатор. Значення опору, індуктивності та ємності залишити такі, як у попередніх дослідах.



12. Подати в електричне коло напругу величиною, як у таблиці 1, та виміряти величини, наведені у таблиці 4.

Таблиця 3

| I, A | U, B | P, Вт | R, Ом | $U_R$ , B | $U_L$ , B | $U_C$ , B | $X_L$ , Ом | $X_C$ , Ом | $\cos\varphi$ |
|------|------|-------|-------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|---------------|
|      |      |       |       |           |           |           |            |            |               |

13. За даними вимірювань і розрахунків для всього кола розрахувати реактивну та повну потужність.

15. Намалювати в масштабі векторні діаграми напруг і струмів, трикутники опорів і потужності.

16. Не змінюючи напругу джерела, активний опір та індуктивність котушки, зробити відповідні вимірювання для чотирьох різних значень ємності. За даними вимірювань побудувати залежності  $I=f(C)$ ;  $\cos\varphi=f(C)$ ;  $P=f(C)$ .

17. Не змінюючи напругу джерела, активний опір та ємність конденсатора, зробити відповідні вимірювання для чотирьох різних значень індуктивності. За даними вимірювань побудувати залежності  $I=f(L)$ ;  $\cos\varphi=f(L)$ ;  $P=f(L)$ .

18. Проаналізувати вплив ємності та індуктивності на значення коефіцієнту потужності всього кола. Дати аналіз кривих.

### 3. Контрольні запитання

1. Схематично зобразити „трикутник” напруг для кола з послідовно з’єднаних  $R$ ,  $L$  і  $C$  елементів.

2. Схематично зобразити „трикутник” опорів для кола з послідовно з’єднаних  $R$ ,  $L$  і  $C$  елементів.

3. Схематично зобразити „трикутник” потужностей для кола з послідовно з’єднаних  $R$ ,  $L$  і  $C$  елементів.

4. Як знайти повний опір кола при послідовному з’єднанні активного опору  $R$ , та індуктивності  $L$ ?

5. Як знайти повний опір кола при послідовному з’єднанні активного опору  $R$ , та ємності  $C$ ?

6. Як знайти повний опір кола при послідовному з’єднанні активного опору  $R$ , індуктивності  $L$  та ємності  $C$ ?

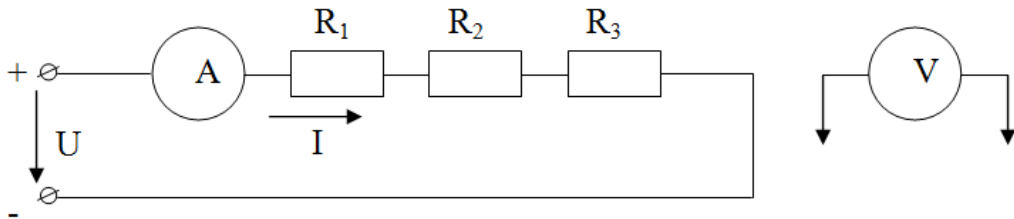
## Лабораторна робота №2 ДОСЛІДЖЕННЯ КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

**Мета:** дослідити загальні властивості електричних кіл з послідовним, паралельним і змішаним з'єднанням приймачів.

**Прилади і матеріали:** 1) джерело постійної напруги; 2) амперметр; 3) вольтметр; 4) стенд УТЛЕ01; 5) мультиметр; 6) з'єднувальні провідники.

### 1. Теоретичні відомості

Окремі приймачі електричної енергії можуть бути з'єднані між собою різними способами. Послідовним з'єднанням приймачів (рис. 1) називається таке з'єднання, коли кінець одного приймача з'єднується з початком другого, кінець другого – з початком третього і т.д.



**Рис 1.** Послідовне з'єднання приймачів

При цьому через всі приймачі проходить один і той же струм, тобто  $I=I_1=I_2=I_3$ . По закону Ома напруга на окремих ділянках пропорційна величині опорів цих ділянок, тобто:

$$U_1 = IR_1; U_2 = IR_2; U_3 = IR_3$$

При цьому напруга на затискачах кола рівна сумі напруг на окремих ділянках кола:

$$U = U_1 + U_2 + U_3$$

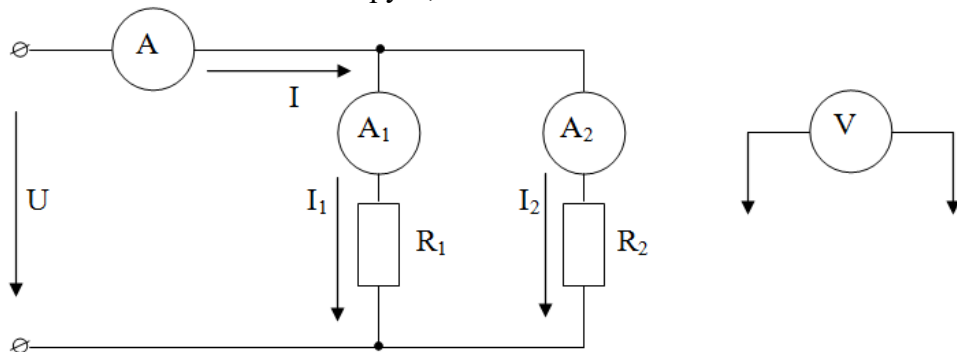
Загальний опір кола при послідовному з'єднанні приймачів дорівнює сумі опорів на окремих ділянках електричного кола:

$$R = R_1 + R_2 + R_3$$

Потужність всього кола дорівнює сумі потужностей окремих ділянок електричного кола (приймачів):

$$P = P_1 + P_2 + P_3 = IU_1 + IU_2 + IU_3 = I(U_1 + U_2 + U_3) = IU$$

Паралельним з'єднанням приймачів (рис.2) називається таке з'єднання, коли початки всіх приймачів з'єднані в одну точку, а кінець – в другу. При цьому до загальних вузлових точок підведена одна і та ж напруга, тобто  $U=U_1=U_2$ .



**Рис. 2.** Паралельне з'єднання приймачів

Приймачі, включені між двома точками (вузлами) електричного кола, створюють так звані паралельні вітки або відгалуження.

Струм в окремих відгалуженнях визначається за законом Ома, тобто

$$I_1 = \frac{U}{R_1}; I_2 = \frac{U}{R_2}$$

а загальний струм в колі рівний

$$I = I_1 + I_2$$

або

$$I = \frac{U}{R}$$

де  $R$  – загальний опір кола.

З двох останніх виразів можемо записати:

$$\frac{U}{R} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2}$$

Розділивши обидві частини рівняння на  $U$ , одержимо:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

Враховуючи, що  $G = \frac{1}{R}$  – загальна провідність кола, можемо записати:

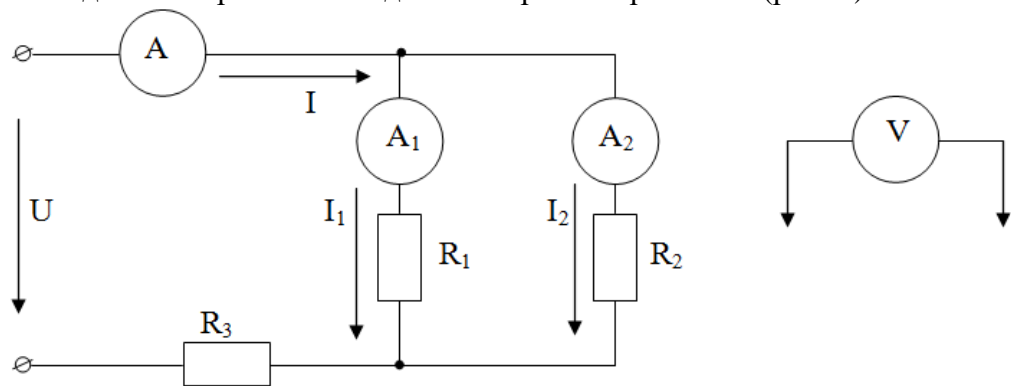
$$G = G_1 + G_2$$

Де  $G_1 = \frac{1}{R_1}$  і  $G_2 = \frac{1}{R_2}$  – відповідно провідності першої та другої ділянки кола.

Для паралельного з'єднання двох опорів їх загальний опір рівний:

$$R_{12} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

Змішаним з'єднанням приймачів називається таке з'єднання, при якому в різному поєднанні є і послідовне і паралельне з'єднання окремих приймачів (рис. 3).



**Рис 3.** Змішане з'єднання приймачів

Загальний опір такого кола дорівнює сумі еквівалентних опорів послідовних відрізків:

$$R = R_{12} + R_3 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + R_3$$

Загальний струм пропорційний напрузі кола і протилежно пропорційний його опору:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{U}{\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + R_3}$$

## 2. Хід роботи

1. Ознайомитися з обладнанням стенду УТЛЕ01.
2. Зібрати коло з послідовним з'єднанням приймачів (рис.1). Величину опорів задає викладач.
3. Виміряти струм, напругу на кожному резисторі і на затискачах кола. Результати вимірювань записати в таблицю 1.
4. За допомогою мультиметра виміряти загальний опір кола.

Таблиця 1

| Виміряно |                |                |                |   |   | Обчислено      |                |                |   |                |                |                |   |                |                |                |   |  |
|----------|----------------|----------------|----------------|---|---|----------------|----------------|----------------|---|----------------|----------------|----------------|---|----------------|----------------|----------------|---|--|
| U        | U <sub>1</sub> | U <sub>2</sub> | U <sub>3</sub> | I | R | R <sub>1</sub> | R <sub>2</sub> | R <sub>3</sub> | R | G <sub>1</sub> | G <sub>2</sub> | G <sub>3</sub> | G | P <sub>1</sub> | P <sub>2</sub> | P <sub>3</sub> | P |  |
|          |                |                |                |   |   |                |                |                |   |                |                |                |   |                |                |                |   |  |

5. Знайти абсолютні та відносні похибки вимірювань опорів, вважаючи, що їх істинні значення відомі.
6. Зібрати коло з паралельним з'єднанням приймачів (рис. 3). Величину опорів задає викладач.
7. Виміряти напругу на кожному приймачеві і на затискачах кола, а також усі струми. Результати замірів записати в таблицю 2.
8. За допомогою мультиметра виміряти загальний опір кола.

Таблиця 2

| Виміряно |                |                |                |                |   | Обчислено |                |                |   |                |                |                |                |   |
|----------|----------------|----------------|----------------|----------------|---|-----------|----------------|----------------|---|----------------|----------------|----------------|----------------|---|
| U        | U <sub>1</sub> | U <sub>3</sub> | I <sub>1</sub> | I <sub>2</sub> | I | R         | R <sub>1</sub> | R <sub>2</sub> | R | G <sub>1</sub> | G <sub>2</sub> | P <sub>1</sub> | P <sub>2</sub> | P |
|          |                |                |                |                |   |           |                |                |   |                |                |                |                |   |

9. Знайти абсолютні та відносні похибки вимірювань опорів, вважаючи, що їх істинні значення відомі.
10. Зібрати коло зі змішаним з'єднанням приймачів (рис. 3). Величину опорів задає викладач.
11. Виміряти струм, напругу на кожному резисторі і на затискачах кола. Результати вимірювань записати в таблицю 3.
12. За допомогою мультиметра виміряти загальний опір кола.

Таблиця 3

| Виміряно |                                 |                |                |                |   | Обчислено      |                |                |   |                |                |                |   |                |                |                |   |  |
|----------|---------------------------------|----------------|----------------|----------------|---|----------------|----------------|----------------|---|----------------|----------------|----------------|---|----------------|----------------|----------------|---|--|
| U        | U <sub>1</sub> , U <sub>2</sub> | I <sub>1</sub> | I <sub>2</sub> | I <sub>3</sub> | R | R <sub>1</sub> | R <sub>2</sub> | R <sub>3</sub> | R | G <sub>1</sub> | G <sub>2</sub> | G <sub>3</sub> | G | P <sub>1</sub> | P <sub>2</sub> | P <sub>3</sub> | P |  |
|          |                                 |                |                |                |   |                |                |                |   |                |                |                |   |                |                |                |   |  |

13. Знайти абсолютні та відносні похибки вимірювань опорів, вважаючи, що їх істинні значення відомі.

## 3. Контрольні запитання

1. Записати закон Ома для ділянки кола.
2. Записати вираз для визначення загального опору розрахункової схеми згідно рис. 1.
3. Записати вираз для визначення загального опору розрахункової схеми згідно рис. 2.
4. Записати вираз для визначення загального опору розрахункової схеми згідно рис. 3.
5. Як зміниться величина струму в колі при включенні чи виключенні одного з резисторів при послідовному з'єднанні?



6. Як зміниться напруга на кожному приймачі, якщо змінити опір одного з трьох резисторів при послідовному сполученні?

### Лабораторна робота №3 ДОСЛІДНА ПЕРЕВІРКА ЗАКОНІВ КІРХГОФА

**Мета:** експериментально визначити ЕРС джерела живлення, його внутрішній опір; експериментально перевірити перший та другий закони Кірхгофа.

**Прилади і матеріали:** 1) джерело постійної напруги; 2) амперметри; 3) стенд УТЛЕ01; 4) мультиметр; 5) з'єднувальні провідники.

#### 1. Теоретичні відомості

*Електричним колом* називають сукупність пристроїв, що призначені для генерування, передачі, перетворення і використання електричної енергії. Окремий пристрій, що входить до складу електричного кола і виконує в ній визначену функцію, називається *елементом електричного кола*. Основними елементами найпростішого електричного кола є джерела і приймачі електричної енергії. Частина електричного кола, що містить виділені в ній елементи, називають *ділянкою кола*.

Елементи кола, що призначені для генерування електричної енергії, називають *джерелами живлення* або *джерелами електричної енергії*, а елементи, що використовують електричну енергію – *приймачами електричної енергії*.

Струм в електричному колі та напругу на його ділянках визначають за допомогою закону Ома, який можна використати як для усього кола, так і для окремих його ділянок. Закон Ома для ділянки кола:

$$I = \frac{U}{R}$$

Закон Ома для повного кола:

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}$$

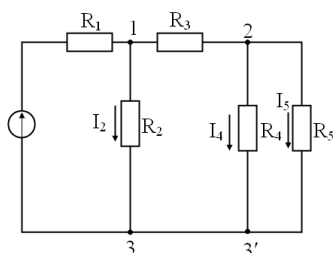
Де  $I$  – електричний струм, А;  $U$  – електрична напруга на споживачі, В;  $r$ ,  $R$  – опори джерела та споживача відповідно, Ом;  $\varepsilon$  – ЕРС джерела.

В режимі холостого ходу, коли  $I = 0$ , ЕРС джерела дорівнює напрузі  $U_{xx}$  на його розімкнених затискачах:

$$\varepsilon = U_{xx}$$

Простим називається коло, що складається з одного джерела електричної енергії та будь-якої кількості послідовно або паралельно з'єднаних споживачів енергії, які поступовим перетворенням можна звести до одного еквівалентного опору. Складним називають коло, в якому групи споживачів не можна звести до одного еквівалентного опору.

При аналізі роботи багатьох електротехнічних приладів приходиться мати справу зі складними електричними колами та їх схематичними зображеннями, схеми заміщення яких містять як пасивні, так і активні елементи. Основними топологічними поняттями теорії електричних кіл є вітка, вузол, контур.



**Рис. 1.** Схема електричного кола

*Віткою* називається ділянка електричного кола з одним і тим же струмом (ряд послідовно з'єднаних елементів електричного кола розташованих між двома вузлами). Вітка може складатися з одного пасивного або активного елемента, а також може бути послідовним з'єднанням кількох елементів. На рис. 1 наведена схема електричного кола з п'ятьма вітками.

*Вузлом* називають місце з'єднання трьох і більше віток. Розрізняють потенціальні та геометричні вузли. На рисунку маємо

чотири геометричні вузли: 1, 2, 3, 3'. Геометричні вузли 3, 3' мають однакові потенціали, тому їх при розрахунках можна об'єднати в один-потенціальний вузол.

*Контуром* називають замкнений шлях, що проходить через кілька віток і вузлів. На малюнку як приклад можна виділити контур 1-2-3-3'. Незалежним контуром називається контур, який відрізняється від попереднього хоч би однією віткою, незадіяною раніше. Контур характеризується сукупністю віток і напрямком обходу.

Електричні кола, в яких діє тільки одне джерело електричної енергії, називають простими колами. У свою чергу, електричні кола, що складаються тільки з однієї вітки і утворюють тільки один контур називаються нерозгалуженими колами.

У теорії електричних кіл важливе значення мають експериментально встановлені в 1847 р. німецьким фізиком Г. Р. Кірхгофом закони, що одержали назву 1-го й 2-го законів Кірхгофа.

*Перший закон Кірхгофа.* Цей закон відносять до вузлів кола й для випадку постійних струмів формулюють в такий спосіб: *алгебраїчна сума струмів, що сходяться у вузлі, дорівнює нулю*

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0$$

При записі рівнянь за першим законом Кірхгофа підсумовування струмів роблять алгебраїчно: струмам, що спрямовані до вузла, привласнюють один знак, наприклад позитивний, а струмам, що спрямовані від вузла – інший знак, наприклад, негативний. Тому часто зустрічається ще інше формулювання першого закону Кірхгофа: *сума струмів, що притікають до вузла, дорівнює сумі струмів, що виходять з нього.*

Перший закон Кірхгофа є наслідком закону збереження кількості електрики, відповідно до якого ні в якій точці заряди не можуть безмежно накопичуватися: *кількість електрики, що притікає до даної точки за певний проміжок часу, повинна дорівнювати кількості електрики, що відтікає від неї за той же час.*

Оскільки під час розрахунку розгалужених електричних кіл дійсні напрями струмів у вітках здебільшого невідомі, то для складання рівнянь Кірхгофа необхідно задатись умовно додатними напрями струмів у вітках, позначивши їх на схемі стрілками. Якщо у відповідній вітці є ЕРС, то найбільш доцільно, направляти струми за напрямом цієї ЕРС. Якщо в результаті розрахунку отримаємо для деякого струму від'ємне значення, це означає, що дійсний напрям струму протилежний до показаного на схемі стрілкою.

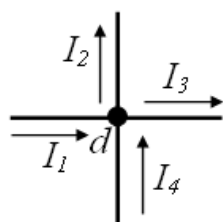


Рис. 2. Схема ділянки кола

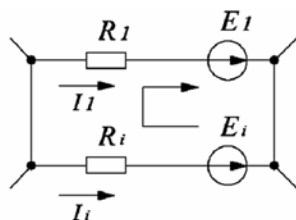


Рис. 3. Схема електричного кола з нанесеними позначеннями струмів і напрямків обходу контуру

Прийmemo для схеми на рис. 2 струми, що входять до вузла *d*, позитивними ( $I_1$  та  $I_4$ ), а струми, що виходять з вузла – негативними ( $I_2$  та  $I_3$ ). Тоді можемо записати наступне рівняння за першим законом Кірхгофа

$$I_4 + I_1 - I_2 - I_3 = 0$$

що відповідатиме 1-му формулюванню першого закону Кірхгофа, або у вигляді

$$I_4 + I_1 = I_2 + I_3$$

що відповідає 2-му формулюванню першого закону Кірхгофа.

*Другий закон Кірхгофа.* Другий закон Кірхгофа стосується електричного контуру: *в замкнутому контурі алгебраїчна сума спадів напруг на опорах всіх елементів контуру дорівнює алгебраїчній сумі ЕРС, що діють в цьому контурі.* Під час складання рівнянь за другим законом Кірхгофа необхідно правильно визначити знаки спадів напруг та ЕРС.

Варто відзначити, що напрями обходу кожного контуру вибирають довільно. Перед спадом напруги  $I_k R_k$  ставиться знак «+», якщо напрям обходу контуру співпадає з вибраним додатним напрямом струму в даному опорі, і знак «-», якщо ці напрями протилежні. Якщо напрям обходу контуру співпадає з напрямом ЕРС, то ця ЕРС входить до рівняння із знаком «+», і навпаки.

$$\sum_{k=1}^i \pm I_k R_k = \sum_{k=1}^i \pm E_k$$

Останнє рівняння є математичним записом другого закону Кірхгофа. Для схеми зображеної на рис. 3 другий закон Кірхгофа запишеться у вигляді:

$$I_1 R_1 - I_i R_i = E_1 - E_i.$$

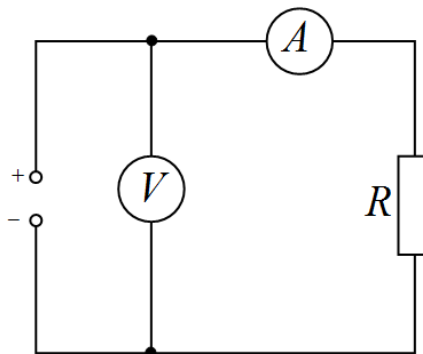
Інший математичний запис другого закону Кірхгофа:

*алгебраїчна сума напруг, які діють у будь-якому контурі електричного кола, дорівнює нулю:*

$$\sum U = 0$$

## 2. Хід роботи

1. Ознайомитися з обладнанням стенду УТЛЕ01.
2. Підключивши вольтметр до кожного із двох джерел, які використовуються в даній лабораторній роботі, виміряти їх ЕРС  $\varepsilon_1$  та  $\varepsilon_2$  і записати їх значення у таблицю 1.
3. Скласти коло з кожним із джерел, для визначення їх внутрішнього опору.



Виміряти струм у колі і напругу на затискачах джерела. Обчислити внутрішній опір джерела за формулою:

$$r = \frac{\varepsilon - U}{I}$$

Результати вимірювань записати у таблицю 1.

Таблиця 1

| $\varepsilon_1$ , В | $r_1$ , Ом | $\varepsilon_2$ , В | $r_2$ , Ом |
|---------------------|------------|---------------------|------------|
|                     |            |                     |            |

4. Для перевірки першого закону Кірхгофа, скласти електричне коло, зображене на рис. 4. На стенді стенд УТЛЕ01 в якості  $R_1$  взяти один із наступних опорів ( $R_{41}$ ,  $R_{42}$  або  $R_{43}$ ), в якості  $R_2$  взяти один із наступних опорів ( $R_{21}$ ,  $R_{22}$  або  $R_{23}$ ), в якості  $R_3$  взяти один із наступних опорів ( $R_{61}$ ,  $R_{62}$ ,  $R_{63}$  або  $R_{64}$ ). Конкретне значення опору задає викладач.

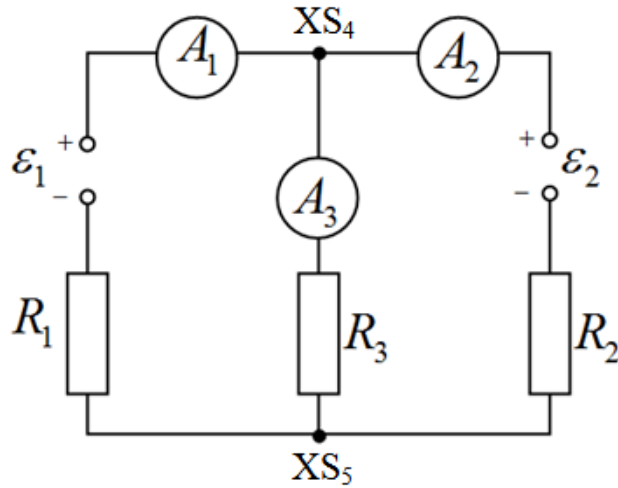


Рис. 4. Схема для перевірки першого та другого законів Кірхгофа

5. Результати вимірювань записати у таблицю 2.

Таблиця 2

| $I_1$ , мкА | $I_2$ , мкА | $I_3$ , мкА |
|-------------|-------------|-------------|
|-------------|-------------|-------------|

6. Перевірити виконання першого закону Кірхгофа.

7. Теоретично розрахувати значення струмів  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  та перевірити отримані значення з експериментальними даними.

8. Перевірити справедливість другого закону Кірхгофа. Для цього необхідно: позначити полярність напруг на всіх ділянках кола. Струм через резистор тече в напрямку зменшення потенціалу, тобто від точки з більшим потенціалом “+” до точки з меншим потенціалом “-“. Напряга завжди має напрям від “+” до “-“. Тому на резисторі напрями напруги і струму збігаються. Для джерел ЕРС спрямована від “-“ до “+”, тому напруга на затискачах джерела ЕРС спрямована назустріч ЕРС.

9. Виміряти напруги на кожній із ділянок кола, підключаючи вольтметр у відповідності з позначеною на схемі полярністю напруг (затискач вольтметра “V” підключати до точки “+”). Результати вимірювань занести до таблиці 3.

Таблиця 3

| $U_{\varepsilon_1}$ , В | $U_{R_1}$ , В | $U_{\varepsilon_2}$ , В | $U_{R_2}$ , В | $U_{R_3}$ , В |
|-------------------------|---------------|-------------------------|---------------|---------------|
|-------------------------|---------------|-------------------------|---------------|---------------|

10. За результатами вимірювань напруг на різних ділянках кола розрахувати алгебраїчну суму напруг  $\sum U$  в усіх можливих контурах і переконатися у справедливості другого закону Кірхгофа.

### 3. Контрольні запитання

1. Що називається електричним колом?
2. Що називається віткою, вузлом, контуром електричного кола?
3. Чим відрізняється складне електричне коло від простого?
4. Сформулювати та математично записати перший закон Кірхгофа.
5. Сформулювати та математично записати другий закон Кірхгофа.

## Лабораторна робота №4 ДОСЛІДНА ПЕРЕВІРКА ПРИНЦИПУ НАКЛАДАННЯ СТРУМІВ

**Мета:** експериментально визначити ЕРС джерела живлення, його внутрішній опір; експериментально перевірити положення про незалежність дії джерел енергії (принципу накладання).

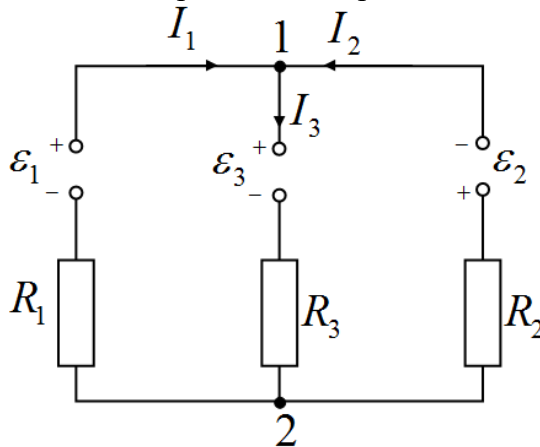
**Прилади і матеріали:** 1) джерело постійної напруги; 2) амперметр; 3) вольтметр; 4) стенд УТЛЕ01; 5) мультиметр; 6) з'єднувальні провідники.

### 1. Теоретичні відомості

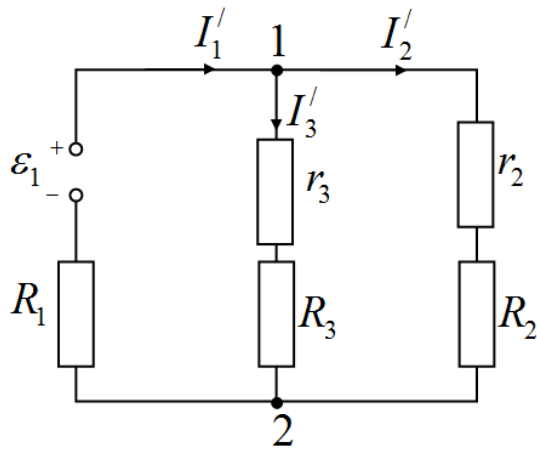
Для лінійних електричних кіл завжди справедливий принцип накладання: *струм у будь-якій вітці кола, створюваний кількома джерелами, які діють у даному колі, дорівнює алгебраїчній сумі струмів, створюваних кожним з цих джерел окремо.*

Цей принцип безпосередньо використовують при розрахунку кола методом накладання, який полягає у наступному. Нехай є коло з кількома джерелами енергії. На першому кроці розрахунку залишимо в колі будь-яке одне з цих джерел, а інші джерела видалимо таким чином: ідеальні джерела напруги замінимо на перемички з нульовим опором, а ідеальні джерела струму замінимо розривами кола. Після таких заміन обчислимо так звані часткові струми у вітках, створені залишеним джерелом. На другому кроці розрахунку залишимо в колі друге джерело, а перше та всі інші джерела видалимо вищевказаним способом. Обчислимо другий набір часткових струмів, створених другим із залишених джерел. Такі кроки робимо по черзі для всіх джерел. Наприкінці знаходимо повний струм у вітці, яка нас цікавить, як алгебраїчну суму обчислених часткових струмів. Частковий струм входить до цієї суми із знаком “плюс”, якщо він збігається за напрямком з повним струмом, а із знаком “мінус” – у протилежному випадку.

Розглянемо метод накладання на прикладі кола рис. 1.



1. Залишаємо в схемі ЕРС  $\varepsilon_1$ , замінюючи джерела  $\varepsilon_2, \varepsilon_3$  їх внутрішніми опорами  $r_2, r_3$ .

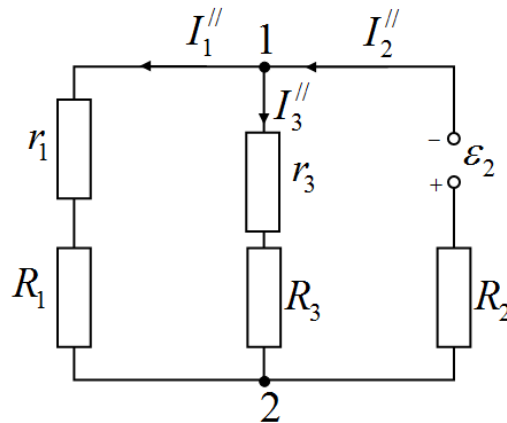


Користуючись законом Ома, розраховуємо часткові струми  $I'_1$ ,  $I'_2$ ,  $I'_3$  від дії  $\varepsilon_1$ :

$$R_e = (R_1 + r_1) + \frac{(R_2 + r_2)(R_3 + r_3)}{(R_2 + r_2) + (R_3 + r_3)}; I'_1 = \frac{\varepsilon_1}{R_e}; U_{12} = \varepsilon_1 - I'_1(R_1 + r_1); I'_2 = \frac{U_{12}}{(R_2 + r_2)};$$

$$I'_3 = \frac{U_{12}}{(R_3 + r_3)}$$

2. Залишаємо в схемі ЕРС  $\varepsilon_2$ , замінюючи джерела  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_3$  їх внутрішніми опорами  $r_1$ ,  $r_3$ .

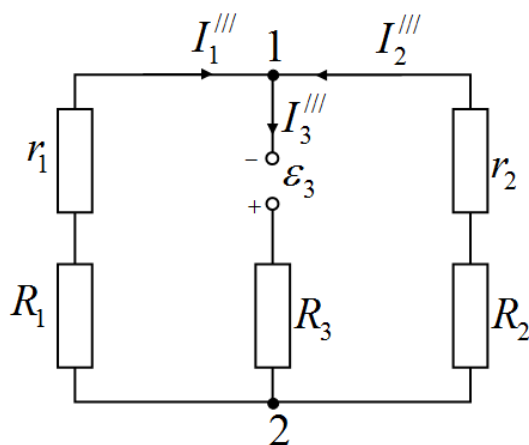


Користуючись законом Ома, розраховуємо часткові струми  $I''_1$ ,  $I''_2$ ,  $I''_3$  від дії  $\varepsilon_2$ :

$$R_e = (R_2 + r_1) + \frac{(R_1 + r_1)(R_3 + r_3)}{(R_1 + r_1) + (R_3 + r_3)}; I''_2 = \frac{\varepsilon_2}{R_e}; U_{12} = \varepsilon_2 - I''_2(R_2 + r_2); I''_1 = \frac{U_{12}}{(R_1 + r_1)};$$

$$I''_3 = \frac{U_{12}}{(R_3 + r_3)}$$

3. Залишаємо в схемі ЕРС  $\varepsilon_3$ , замінюючи джерела  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  їх внутрішніми опорами  $r_1$ ,  $r_2$ .



Користуючись законом Ома, розраховуємо часткові струми  $I_1''$ ,  $I_2''$ ,  $I_3''$  від дії  $\varepsilon_2$ :

$$R_e = (R_3 + r_3) + \frac{(R_1 + r_1)(R_2 + r_2)}{(R_1 + r_1) + (R_2 + r_2)}; I_3''' = \frac{\varepsilon_3}{R_e}; U_{12} = \varepsilon_3 - I_3'''(R_3 + r_3); I_1''' = \frac{U_{12}}{(R_1 + r_1)};$$

$$I_2''' = \frac{U_{12}}{(R_2 + r_2)}$$

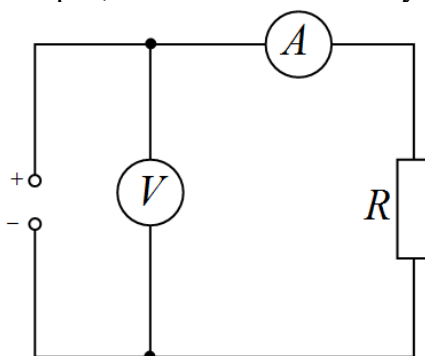
4. Визначаємо дійсні струми  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ , як алгебраїчну суму струмів, спричинених дією кожної ЕРС окремо. Вибираємо позитивним напрям струму  $I_1$ . Розраховуючи  $I_1$  часткові струми  $I_1'$  і  $I_1'''$  враховуємо зі знаком «+», оскільки їх напрям збігається з обраним позитивним напрямом струму  $I_1$ , а частковий струм  $I_1''$  – із знаком «-», оскільки його напрям протилежний обраному:

$$I_1 = I_1' - I_1'' + I_1'''; I_2 = -I_2' + I_2'' + I_2'''; I_3 = I_3' + I_3'' + I_3'''$$

Принцип накладання не може бути використаний для розрахунку потужностей, оскільки потужність є квадратичною функцією від струму або напруги.

## 2. Хід роботи

1. Ознайомитися з обладнанням стенду УТЛЕ01.
2. Підключивши вольтметр до кожного із двох джерел, які використовуються в даній лабораторній роботі, виміряти їх ЕРС  $\varepsilon_1$  та  $\varepsilon_2$  і записати їх значення у таблицю 1.
3. Скласти коло з кожним із джерел, для визначення їх внутрішнього опору.



Виміряти струм у колі і напругу на затискачах джерела. Обчислити внутрішній опір джерела за формулою:

$$r = \frac{\varepsilon - U}{I}$$

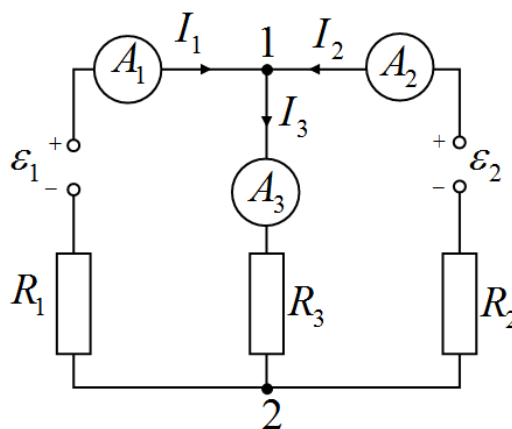
Результати вимірювань записати у таблицю 1.



Таблиця 1

|                           |                  |                           |                  |
|---------------------------|------------------|---------------------------|------------------|
| $\varepsilon_1, \text{В}$ | $r_1, \text{Ом}$ | $\varepsilon_2, \text{В}$ | $r_2, \text{Ом}$ |
|                           |                  |                           |                  |

4. Скласти коло зображене на рисунку нижче.

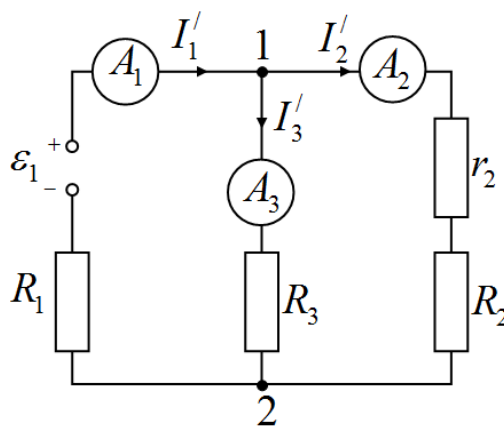


5. Виміряти струми  $I_1$ ,  $I_2$  та  $I_3$ . Результати експерименту занести до таблиці 2.

Таблиця 2

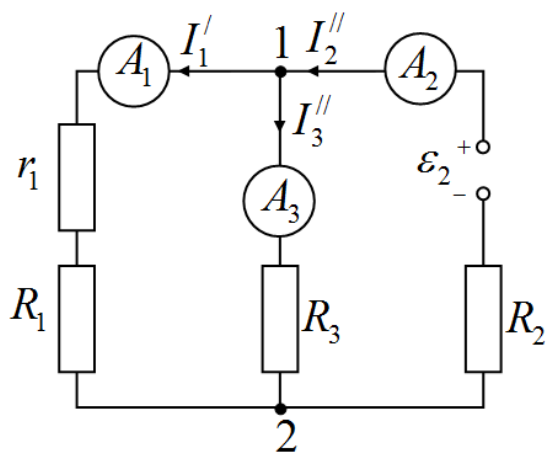
|                 |                 |                 |
|-----------------|-----------------|-----------------|
| $I_1, \text{А}$ | $I_2, \text{А}$ | $I_3, \text{А}$ |
|                 |                 |                 |

6. Замість джерела  $\varepsilon_2$  ввімкнути резистор  $r_2$ , величина опору якого дорівнює величині внутрішнього опору джерела  $\varepsilon_2$ .



7. Виміряти струми у кожній гілці, дотримуючись однакового підключення амперметра. Перевірити правильність вимірювань за першим законом Кірхгофа. Дані вимірювань занести до таблиці 3.

8. Замість джерела  $\varepsilon_1$  ввімкнути резистор  $r_1$ , величина опору якого дорівнює величині внутрішнього опору джерела  $\varepsilon_1$ .



Виміряти струми у кожній гілці, дотримуючись однакового підключення амперметру. Перевірити правильність вимірювань за першим законом Кірхгофа. Дані вимірювань занести до таблиці 3.

Таблиця 3

| Режим роботи електричного кола            | Результати вимірювань |                  |                  |                   |                   |                   |
|---|-----------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|   | $I'_1, \text{A}$      | $I'_2, \text{A}$ | $I'_3, \text{A}$ | $I''_1, \text{A}$ | $I''_2, \text{A}$ | $I''_3, \text{A}$ |
| $\varepsilon_1 \neq 0, \varepsilon_2 = 0$ |                       |                  |                  | —                 | —                 | —                 |
| $\varepsilon_1 = 0, \varepsilon_2 \neq 0$ | —                     | —                | —                |                   |                   |                   |

9. Розрахувати дійсні струми  $I_1, I_2, I_3$  у кожній гілці, як алгебраїчну суму струмів, спричинених дією  $\varepsilon_1$  і  $\varepsilon_2$  окремо.

10. Порівняти розраховані струми  $I_1, I_2, I_3$  із значеннями, виміряними в досліді з одночасною дією  $\varepsilon_1$  і  $\varepsilon_2$  (таблиця 2). Переконайтеся у справедливості принципу накладання.

### 3. Контрольні запитання

1. Сформулюйте принцип накладання струмів.
2. Які величини можна знаходити за принципом накладання?
3. Поясніть сутність методу накладання і яка його основна перевага?
4. Для розрахунку яких кіл можна і доцільно використовувати метод накладання?
5. Як слід представити реальні та ідеалізовані джерела енергії, що підлягають вилученню з часткової схеми?

## Лабораторна робота №5 ДОСЛІДНА ПЕРЕВІРКА ЕКВІВАЛЕНТНИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ У КОЛІ

**Мета:** перевірити справедливості співвідношень, що використовують для розрахунку еквівалентних опорів для послідовно, паралельно і мішано увімкнених резисторів.

**Прилади і матеріали:** 1) джерело постійної напруги; 2) амперметр; 3) вольтметр; 4) магазин опорів; 5) мультиметр; 6) з'єднувальні провідники.

### 1. Теоретичні відомості

Розрахунок електричного кола у багатьох випадках можна значно полегшити, якщо застосувати еквівалентні перетворення. Еквівалентним перетворенням називають заміну будь-якої частини кола на іншу схему реалізацію з відмінною структурою і параметрами елементів за умови, що така заміна не призводить до зміни струмів та напруг у тій частині кола, яка не перетворюється. Еквівалентні перетворення зменшують кількість віток або(і) вузлів схеми, а отже, і кількість рівнянь, що визначають її електричний стан. Особливу значущість набувають еквівалентні перетворення під час аналізу простих кіл, до складу яких входить лише одне джерело енергії й елементи, що з'єднані між собою послідовно, паралельно, зіркою або трикутником. Розрахунок струмів і напруг на ділянках простих кіл найчастіше виконують методом еквівалентних перетворень (згортки). На першому етапі схему заміщення кола спрощують до одного контуру з ідеальним джерелом напруги або до двоконтурної схеми з ідеальним джерелом струму, а на другому етапі розгортають спрощену схему до вихідної структури.

Основними видами еквівалентних перетворень пасивних ділянок електричних кіл є заміна одним еквівалентним опором послідовно або паралельно увімкнених резисторів та взаємозаміна сполучення трьох резисторів «трикутником» на з'єднання трьох резисторів «зіркою».

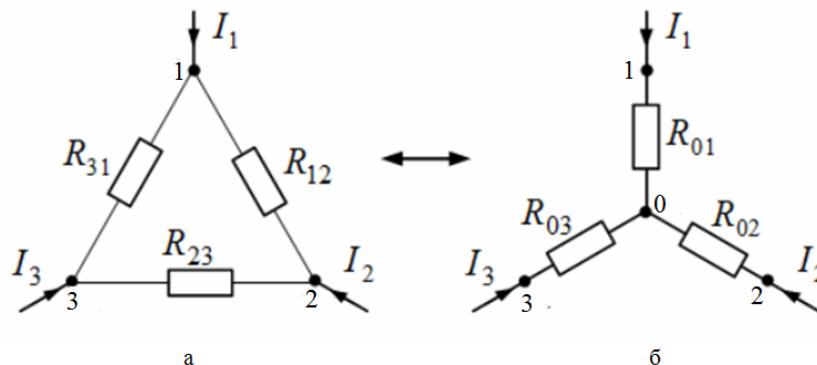
Резистори з'єднані послідовно, якщо через всі елементи проходить один і той самий струм. При послідовному з'єднанні елементів їх опори додаються арифметично:

$$R_{екв} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots$$

Якщо до пари вузлів паралельно приєднані тільки два опори, формула для розрахунку еквівалентного опору набуває вигляду:

$$R_{екв} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

Сполучення трьох резисторів, які утворюють сторони трикутника, називають «трикутником» (рис. 1, а). «Зірка» – це з'єднання трьох резисторів, яке має вигляд трипроменевої зірки (рис. 1, б). У вузлах 1, 2, 3 «зірка» і «трикутник» зв'язані з рештою схеми.



**Рис. 1.** Схема заміщення частини кола: сполучення трьох резисторів «трикутником» (а), «зіркою» (б)

*Правило еквівалентного перетворення «трикутника» опорів на «зірку»:* опір променя зірки, приєднаного до вузла  $a$ , визначається як добуток двох опорів віток трикутника, прилеглих до вузла  $a$ , поділений на суму опорів усіх трьох віток трикутника:

$$R_1 = \frac{R_{12}R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}, R_2 = \frac{R_{12}R_{23}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}, R_3 = \frac{R_{23}R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} \quad (1)$$

*Правило еквівалентного перетворення «зірки» опорів на «трикутник»:* опір сторони трикутника між вузлами  $a$  і  $b$  дорівнює сумі опорів променів зірки, прилеглих до вузлів  $a$  і  $b$ , та їхнього добутку, поділеному на опір третього променя зірки:

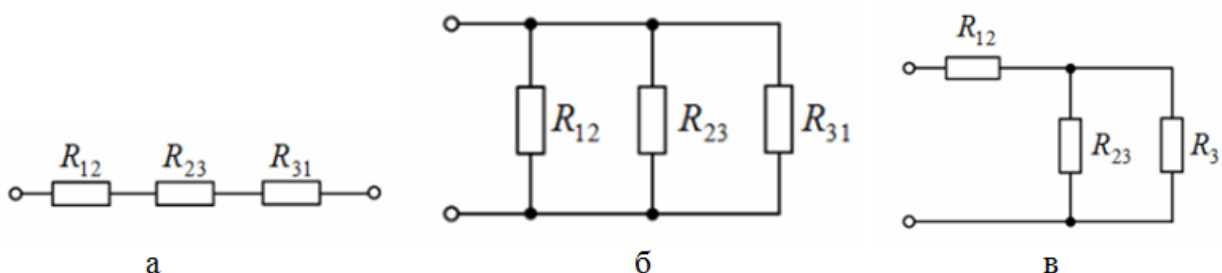
$$R_{12} = R_1 + R_2 + \frac{R_1R_2}{R_3}, R_{23} = R_2 + R_3 + \frac{R_2R_3}{R_1}, R_{31} = R_1 + R_3 + \frac{R_1R_3}{R_2}$$

Резистори з'єднані мішано, якщо деякі із сукупності резисторів з'єднані послідовно, деякі паралельно, а деякі, можливо, «трикутником» або «зіркою». Еквівалентний опір кола з мішаним з'єднанням резисторів відносно вхідних затискачів розраховується поетапно – схема нібито згортається до одного еквівалентного елемента. Розпочинати згортання слід з еквівалентних перетворень елементів, увімкнених якнайдалі від вхідних затискачів.

## 2. Хід роботи

1. Записати у таблицю 1 значення опорів резисторів  $R_{12}$ ,  $R_{23}$ ,  $R_{31}$ , величини яких задає викладач. В якості резисторів з номіналами  $R_{12}$ ,  $R_{23}$ ,  $R_{31}$  використати магазини опорів.

2. З'єднати резистори  $R_{12}$ ,  $R_{23}$ ,  $R_{31}$  послідовно (рис. 2, а), паралельно (рис. 2, б) та мішано (рис. 2, в). За допомогою мультиметра виміряти еквівалентний опір кожного сполучення. Одержані дані записати у таблицю 1.



**Рис. 2.** З'єднання резисторів: послідовне (а), паралельне (б), мішане (в)

**Таблиця 1**

| Тип сполучення резисторів | Еквівалентний опір сполучення резисторів |                      |                      |
|---------------------------|--|----------------------|----------------------|
|                           | показ мультиметра                        | розрахункова формула | результат обчислення |
| послідовно                |  |                      |                      |
| паралельно                |  |                      |                      |
| мішано                    |  |                      |                      |

3. Скласти електричне коло, в якому три резистори  $R_{12}$ ,  $R_{23}$ ,  $R_{31}$  сполучені «трикутником» (рис. 3). Значення напруги  $U_{14}$  між затискачами регульованого джерела напруги, навантаженого на пасивне коло, задає викладач.

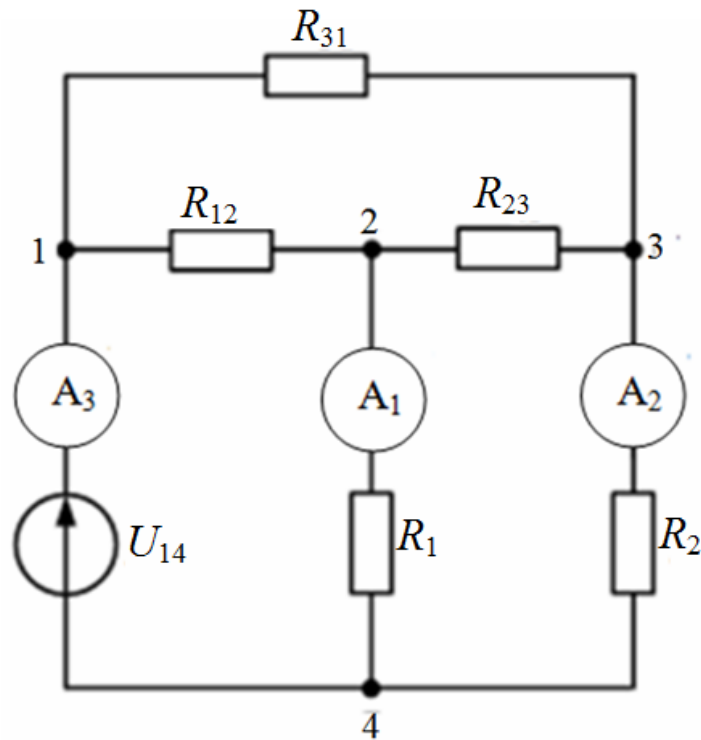


Рис. 3. З'єднання резисторів  $R_{12}$ ,  $R_{23}$ ,  $R_{31}$  «трикутником»

4. Виміряти мультиметром значення опорів резисторів  $R_1$ ,  $R_2$  і записати разом з величиною  $U_{14}$  у таблицю 2.

Таблиця 2

| $U_{14}$ , Ом | $R_1$ , В | $R_2$ , В |
|---------------|-----------|-----------|
|               |           |           |

5. Виміряти напруги  $U_{12}$ ,  $U_{23}$ ,  $U_{31}$  між вершинами трикутника, та вхідні щодо «трикутника» струми  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ . Результати вимірювань записати у перший рядок таблиці 3.

Таблиця 3

| Тип сполучення резисторів                            | $U_{12}$ , В | $U_{23}$ , В | $U_{31}$ , В | $I_1$ , А | $I_2$ , А | $I_3$ , А |
|--|--------------|--------------|--------------|-----------|-----------|-----------|
| Трикутник:<br>$R_{12} =$<br>$R_{23} =$<br>$R_{31} =$ |              |              |              |           |           |           |
| Зірка:<br>$R_{01} =$<br>$R_{02} =$<br>$R_{03} =$     |              |              |              |           |           |           |

6. Здійснити еквівалентне перетворення сполучення резисторів  $R_{12}$ ,  $R_{23}$ ,  $R_{31}$  «трикутником» на сполучення «зіркою» резисторів  $R_{01}$ ,  $R_{02}$ ,  $R_{03}$ , значення опорів яких потрібно розрахувати і записати у перший стовпець таблиці 3.

7. Скласти електричне коло, в якому три резистори  $R_{01}$ ,  $R_{02}$ ,  $R_{03}$  сполучені «зіркою» (рис. 4). Виміряти напруги  $U_{12}$ ,  $U_{23}$ ,  $U_{31}$  між вузлами 1, 2, 3 та вхідні щодо «зірки» струми  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ . Результати вимірювань записати у другий рядок таблиці 3 та порівняти з результатами вимірів у схемі на рис. 3. Упевнитись в тому, що здійснено еквівалентне перетворення.

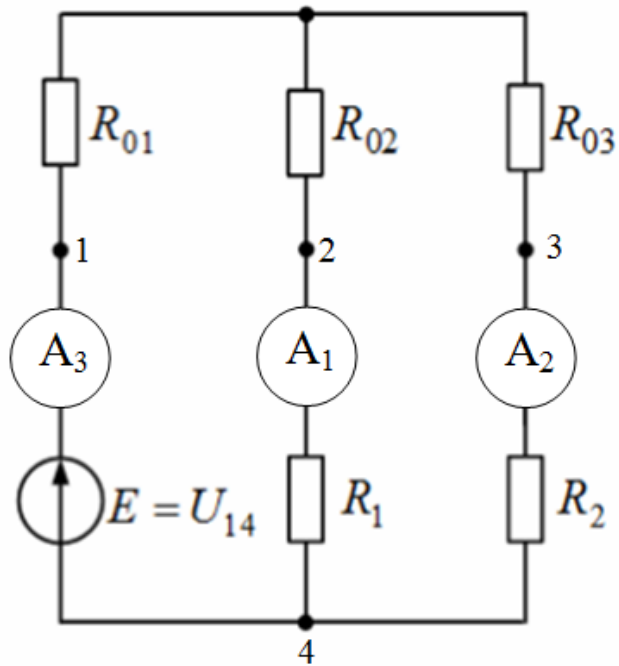


Рис. 4. З'єднання резисторів  $R_{01}$ ,  $R_{02}$ ,  $R_{03}$  «зіркою»

8. Отримати у викладача інформацію щодо значень опорів резисторів  $R_{01}$ ,  $R_{02}$ ,  $R_{03}$ , сполучених на симетричну «зірку» (рис. 4), і записати ці значення у перший стовпчик таблиці 4.

Таблиця 4

| Тип сполучення резисторів  | $U_{12}$ , В | $U_{23}$ , В | $U_{31}$ , В | $I_1$ , А | $I_2$ , А | $I_3$ , А |
|--|--------------|--------------|--------------|-----------|-----------|-----------|
| Симетрична зірка:<br>$R_{01} =$<br>$R_{02} =$<br>$R_{03} =$      |              |              |              |           |           |           |
| Симетричний трикутник:<br>$R_{12} =$<br>$R_{23} =$<br>$R_{31} =$ |              |              |              |           |           |           |

9. Виміряти напруги  $U_{12}$ ,  $U_{23}$ ,  $U_{31}$  між кінцями «променів зірки» 1, 2, 3, та вхідні струми  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ . Результати вимірювань записати у перший рядок таблиці 5.

10. Здійснити еквівалентне перетворення симетричної «зірки» на симетричний «трикутник» (рис. 3) із резисторів з опороми  $R_{12}$ ,  $R_{23}$ ,  $R_{31}$ , значення яких треба обчислити та записати у перший стовпець таблиці 4.

11. Скласти електричне коло, в якому три резистори  $R_{12}$ ,  $R_{23}$ ,  $R_{31}$  сполучені симетричним «трикутником» (рис. 3). Виміряти напруги  $U_{12}$ ,  $U_{23}$ ,  $U_{31}$  між вершинами трикутника 1, 2, 3, та вхідні струми  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ . Результати вимірювань записати у другий рядок таблиці 4 та упевнитись, що здійснено еквівалентне перетворення.

### 3. Контрольні запитання

1. Яку дію називають еквівалентним перетворенням електричного кола?

2. Які види еквівалентних перетворень ви знаєте?
3. Як замінити два послідовно увімкнених опори одним еквівалентним? Два паралельно увімкнених?
4. Яке сполучення опорів електричного кола називається «зіркою»? «трикутником»?
5. Як замінити з'єднання опорів «зіркою» на еквівалентний «трикутник»? «трикутник» на еквівалентну «зірку»?
6. Яким чином можна упевнитись в еквівалентності перетворення частини електричного кола?

## Лабораторна робота №6 ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИФАЗНОГО КОЛА ПРИ ВМИКАННІ ФАЗ СПОЖИВАЧА ЗА СХЕМОЮ ЗІРКИ І ТРИКУТНИКА

**Мета:** дослідити розподіл напруг і струмів в колі з рівномірним і нерівномірним навантаженням при вмиканні фаз споживача за схемою зірки і трикутника.

**Прилади і матеріали:** 1) трифазний трансформатор; 2) амперметри; 3) вольтметр; 4) споживач електричної енергії; 5) набір з'єднувальних проводів.

### 1. Теоретичні відомості

Об'єднання в одне коло декількох подібних за структурою кіл синусоїдального струму однієї частоти з незалежними джерелами енергії широко застосовується в техніці. Об'єднані кола синусоїдального струму прийнято називати *фазами*, а всю об'єднану систему кіл – *багатофазною системою*. Таким чином, в електротехніці термін „фаза” застосовується у двох різних значеннях: по-перше, це *параметр періодичного процесу*, а по-друге – *найменування складової частини багатофазної системи кіл синусоїдного струму*.

Найбільше розповсюдження дістала трифазна система. Остання була винайдена й розроблена у всіх деталях, включаючи трифазні трансформатор і асинхронний двигун, М.О. Доливо-Добровольським у 1891 р. У даний час для передачі й розподілу енергії в переважній більшості випадків застосовуються трифазні системи. Важливою перевагою трифазної системи є також простота й дешевизна трифазних асинхронних двигунів. Крім трифазної системи практичне значення має шестифазна система, наприклад у пристроях випрямлення змінного струму, а в деяких пристроях автоматики застосовують двофазну систему.

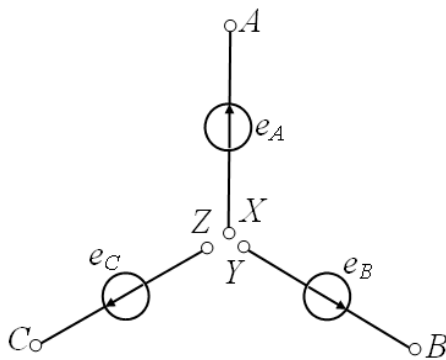
*Причини широкого розповсюдження трифазних систем:*

а) значна економія металу проводів порівняно з трьома однофазними лініями;

б) низькі вартість, маса і висока економічність трифазного генератора порівняно з трьома однофазними;

в) можливість отримання обертового магнітного поля трьома нерухожими котушками.

Для позначення фаз трифазної системи застосовують літери латинського алфавіту. Перша фаза має позначення *A* або *a* – початок фази, *X* або *x* – кінець фази (великі літери відносяться до джерела, а малі – до навантаження). Всю фазу називають фазою *A*, дві інші – фаза *B* і фаза *C*. Позначення трифазного генератора показано на рис. 1. За початок фази приймають затискач, через який струм надходить у зовнішнє коло при



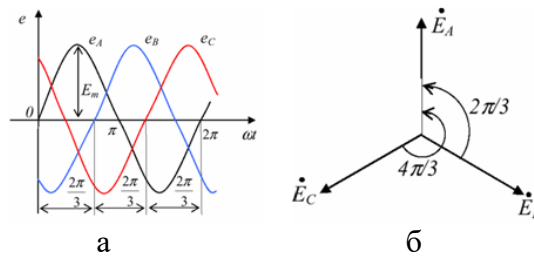
**Рис. 1.** Позначення трифазного генератора

позитивному його значенні.

Кінці фаз джерела можна з'єднати один з одним, тоді в зовнішньому колі буде діяти сумарна ЕРС. Така система називається зв'язаною.

*Трифазну систему ЕРС називають симетричною*, якщо частоти й амплітуди ЕРС кожної з фаз однакові, синусоїдальні й зміщені одна відносно одна одної на кут  $\frac{2\pi}{3}$ , тобто на  $120^\circ$  (рис. 2). На рис. 2 показано графічне (а) і векторне (б) подання трифазної симетричної системи ЕРС.





**Рис. 2.** Часова (а) та векторна (б) діаграми ЕРС трифазного генератора

В аналітичній формі миттєві й діючі значення ЕРС, що наводяться у фазах, записують в наступному вигляді:

$$\begin{cases} e_A = E_{mA} \sin \omega t; & \dot{E}_A = E; \\ e_B = E_{mB} \sin \left( \omega t - \frac{2\pi}{3} \right); & \dot{E}_B = E \cdot e^{-j\frac{2\pi}{3}}; \\ e_C = E_{mC} \sin \left( \omega t - \frac{4\pi}{3} \right); & \dot{E}_C = E \cdot e^{-j\frac{4\pi}{3}} = E \cdot e^{j\frac{2\pi}{3}} \end{cases} \quad (1)$$

Як видно з рис. 2, у симетричній трифазній системі сума миттєвих значень фазних ЕРС у будь-який момент часу дорівнює нулю:

$$e_A + e_B + e_C = 0 \quad (2)$$

За аналогією можна записати й для діючих значень векторів:

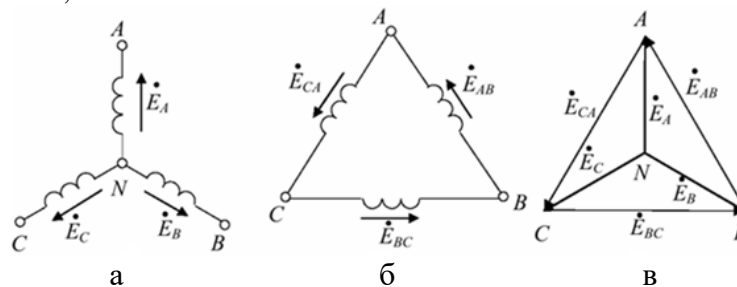
$$\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0 \quad (3)$$

На векторній діаграмі (рис. 2, б) фаза *B* відстає від фази *A*, а фаза *C* – від фази *B*. Таке чергування фаз *ABC* називають *прямою послідовністю*, а чергування фаз *ACB* – *зворотною послідовністю*. Послідовність фаз визначають спеціальним приладом – фазопоказчиком.

### Схеми з'єднання обмоток трифазного генератора.

Фази обмотки трифазного генератора можуть бути з'єднані в „зірку” (рис. 3, а) або в „трикутник” (рис. 3, б).

При з'єднанні в „зірку” кінці фаз об'єднують в одну точку *N* рис. 7.2.1, а), що називається *нульовою* або *нейтраллю*. Навантаження можна підключати до затискачів *N-A*, *N-B*, *N-C* або *A-B*, *B-C*, *C-A*.



**Рис. 3.** Схеми з'єднання обмоток трифазного генератора: а – „зірка”, б – „трикутник”, в – векторна діаграма

Розрізняють *фазні*  $E_A, E_B$  і  $E_C$  і *лінійні*  $E_{AB}, E_{BC}$  і  $E_{CA}$  ЕРС, які, як видно з векторної діаграми зображеної на рис. 7.2.1, в, зв'язані між собою виразами:

$$\begin{cases} \dot{E}_{AB} = \dot{E}_A - \dot{E}_B; \\ \dot{E}_{BC} = \dot{E}_B - \dot{E}_C; \\ \dot{E}_{CA} = \dot{E}_C - \dot{E}_A; \end{cases} \quad (4)$$

У симетричній системі система лінійних ЕРС симетрична  $\dot{E}_{AB} + \dot{E}_{BC} + \dot{E}_{CA} = 0$ . При цьому співвідношення між фазними і лінійними ЕРС має вигляд

$$E_L = \sqrt{3}E_\phi \quad (5)$$

При з'єднанні фаз джерела в „трикутник” навантаження підключають до його вершин (рис. 3, б). При цьому лінійні й фазні ЕРС і напруги будуть рівними між собою:  $E_\phi = E_L$ ;  $U_\phi = U_L$ . Таке з'єднання можливе тільки при симетричному джерелі. У цьому випадку фази утворюють замкнутий контур, струм в якому відсутній.

#### З'єднання трифазних споживачів „зіркою”.

При з'єднанні фаз трифазного джерела живлення електроенергії „зіркою” (рис. 4) кінці його фаз  $X, Y, Z$  з'єднують в спільну нейтральну точку  $N$ , а початки фаз  $A, B, C$  підключають до відповідних лінійних проводів  $Aa, Bb, Cc$ . Аналогічно при з'єднанні трифазних споживачів „зіркою” з'єднують в нейтральну точку  $n$  кінці їхніх фаз  $x, y, z$ , при цьому початки фаз  $a, b, c$  підключають до лінійних проводів електричної мережі (рис. 4).

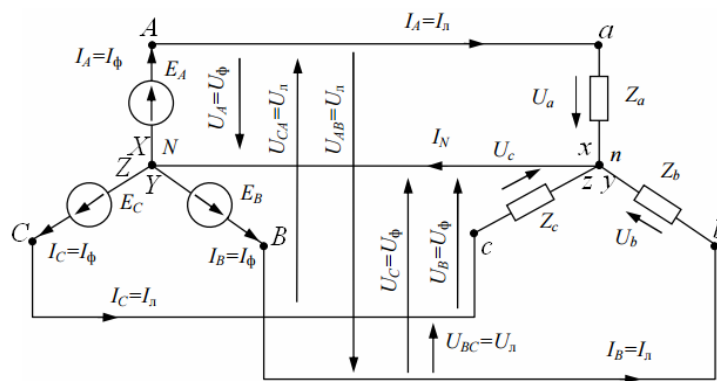


Рис. 4. З'єднання джерел і споживачів за схемою „зірка-зірка”

Напруги  $U_A, U_B, U_C$ , що діють між початками й кінцями фаз джерела живлення, є його фазними напругами, а напруги  $U_a, U_b, U_c$ , що діють між початками й кінцями фаз споживача є фазними напругами споживача. Напруги  $U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}$ , що діють між початками фаз джерела й напруги  $U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}$ , що діють між початками фаз споживача, є лінійними напругами.

Проводи  $Aa, Bb, Cc$  називаються *лінійними*. Струм у обмотках фаз або фазних навантаженнях, називається *фазним струмом*, а струм у лінійних провадах називається *лінійним струмом*.

На схемі рис. 4 наведені умовні позитивні напрямки фазних і лінійних напруг. Лінійні струми  $I_L$  у лініях живлення ( $I_A, I_B, I_C$ ) при з'єднанні трифазного джерела живлення й трифазного споживача електроенергії „зіркою”, умовний позитивний напрямок яких показаний на схемі рис. 4, одночасно є і фазними струмами  $I_\phi$ , що протікають по фазах споживача. Тому, в розглянутому випадку, при наявності симетричної трифазної системи при з'єднанні фаз споживача „зіркою” лінійні струми дорівнюватимуть фазним струмам:

$$I_L = I_\phi. \quad (6)$$

Фазні струми споживача визначають за законом Ома:

$$\dot{I}_a = \frac{\dot{U}_a}{Z}; \dot{I}_b = \frac{\dot{U}_b}{Z}; \dot{I}_c = \frac{\dot{U}_c}{Z} \quad (7)$$

Згідно з першим законом Кірхгофа струм в нейтральному проводі дорівнює:

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C$$

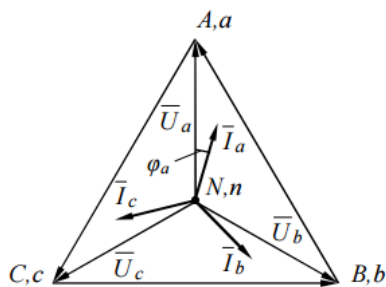
При рівномірному навантаженні  $\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$ , тобто струму в нульовому проводі не буде (звідси й назва „нульовий” провід), і нульовий провід є зайвим. Знявши нульовий

провід, ми одержуємо трипровідне коло трифазного струму, з'єднане зіркою. Таке коло може нормально працювати лише в тому випадку, якщо забезпечений рівномірний розподіл навантаження між фазами. У протилежному разі напруги фаз приймача перестануть бути однаковими і рівними фазній напрузі генератора.

При з'єднанні споживача зіркою, незалежно від величини й характеру опорів його фаз, а також від того, є або відсутній нейтральний провід, між лінійними й фазними напругами споживача існують наступні співвідношення, отримані згідно з другим законом Кірхгофа:

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

Оскільки трифазні кола є різновидом складних електричних кіл, то їх можна розрахувати, застосовуючи відомі методи розрахунку складних кіл. Найбільш простіше виконується розрахунок симетричних трифазних кіл. Для цього достатньо провести розрахунок однієї фази. В інших фазах струми й напруги перебувають в умовах симетрії. Зазвичай, окремо кожна фаза становить просте коло. На рис. 5 зображено векторну діаграму для симетричного трифазного кола, з'єданого зіркою, у випадку коли споживач має активно-індуктивний характер.

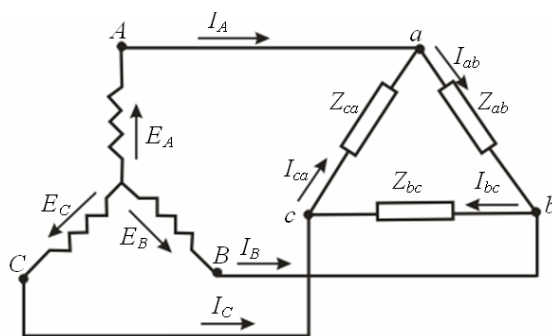


**Рис. 5.** Векторна діаграма струмів і напруг при з'єднанні споживача „трикутником”, коли він має активно-індуктивний характер

З векторної діаграми видно, що лінійні напруги більші від фазних у  $\sqrt{3}$  раз, тобто  $U_L = \sqrt{3}U_\phi$ .

Застосовують трипровідну та чотирипровідну схему з'єднання приймачів зіркою. Трифазні приймачі електричної енергії, що мають гарантоване симетричне навантаження, вмикають за *трипровідною схемою* (тобто без нульового провода). Це обумовлено тим, що в такому колі струм у нейтральному проводі, визначений як векторна сума фазних струмів, буде рівним нулю. Отже в цьому випадку цей провід стає непотрібним і застосовувати його нема рації. Типовим навантаженням такого типу є трифазні асинхронні двигуни, що мають симетричне навантаження фаз.

Отже в цьому випадку цей провід стає непотрібним і застосовувати його нема рації. Типовим навантаженням такого типу є трифазні асинхронні двигуни, що мають симетричне навантаження фаз.



**Рис. 6.** З'єднання електроспоживачів „трикутником”

Звичайні однофазні приймачі електричної енергії (побутові прилади, лампи, електричні інструменти тощо) вмикаються за чотирипровідною схемою (тобто з нульовим проводом). Нульовий провід забезпечує однакові фазні напруги на приймачах при несиметричному навантаженні. Крім того, можна застосовувати як лінійну, так і фазну напругу на приймачах.

### З'єднання трифазних споживачів „трикутником”.

Якщо увімкнути три приймачі  $Z_{ab}$ ,  $Z_{bc}$  та  $Z_{ca}$  безпосередньо між проводами трипровідної лінії, що йде від затискачів трифазного генератора, не користуючись нульовим проводом, ми одержимо з'єднання приймачів трикутником (рис. 6).

Кожна фаза споживача приєднується відповідно до двох лінійних проводів. Тому при з'єднанні споживачів трикутником фазні напруги дорівнюють відповідним лінійним напругам:

$$U_{ЛЛ} = U_{\phi} \quad (8)$$

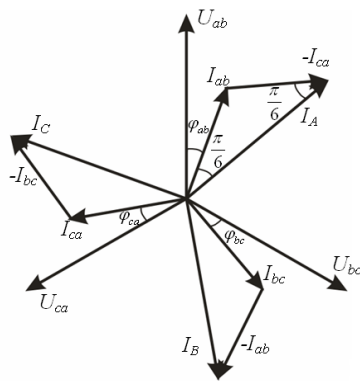
Зате з'являється різниця між фазними струмами приймача  $I_{ab}$ ,  $I_{bc}$ ,  $I_{ca}$ , позитивні напрями яких вважаються від  $A$  до  $B$ , від  $B$  до  $C$ , від  $C$  до  $A$ , і лінійними струмами  $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$ , які як і раніше вважаються позитивними у напрямі від генератора до приймачів. За першим законом Кірхгофа можемо записати наступні співвідношення:  $\dot{I}_A + \dot{I}_{ca} = \dot{I}_{ab}$ ,  $\dot{I}_B + \dot{I}_{ab} = \dot{I}_{bc}$ ,  $\dot{I}_C + \dot{I}_{bc} = \dot{I}_{ca}$ , або

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}, \dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}, \dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc} \quad (9)$$

Із співвідношень (9) випливає, що

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0 \quad (10)$$

Особливістю з'єднання фаз споживача трикутником є те, що зміна режиму однієї з фаз споживача не впливає на режими інших фаз, оскільки вони підключені до незмінних лінійних напруг генератора. Змінюватись будуть лише лінійні струми в проводах, з'єднаних з даною фазою.



**Рис. 7.** Векторна діаграма рівномірного навантаження, з'єданого в „трикутник”

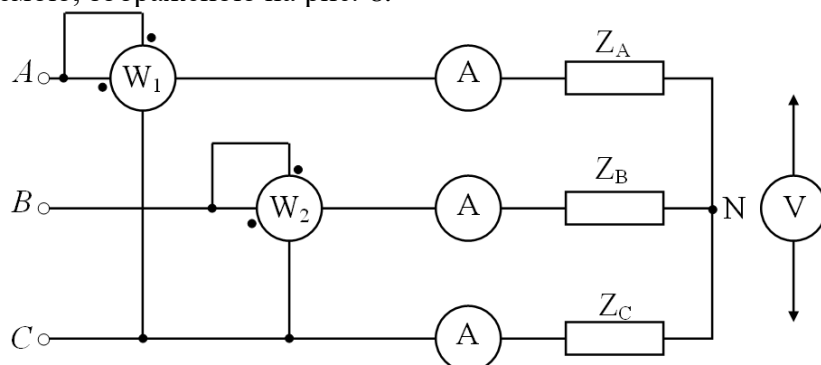
При симетричному навантаженні, тобто при однакових за величиною і характером фазних опорах  $Z_{ab}$ ,  $Z_{bc}$  та  $Z_{ca}$ , коли фазні струми  $I_{ab}$ ,  $I_{bc}$  та  $I_{ca}$  дорівнюють за величиною і зсунуті на однакові кути відносно своїх напруг, утворюючи симетричну трипроменеву зірку, лінійні струми  $I_A$ ,  $I_B$  та  $I_C$  також будуть рівними і симетрично розміщеними. За рівнянням (9) на рис. (7) побудовані вектори лінійних струмів.

Кожний із лінійних струмів буде як основа рівнобедреного трикутника з кутом  $120^\circ$  при вершині, а тому між значеннями лінійного і фазного струмів при симетричному навантаженні буде наступне співвідношення:

$$I_{Л} = I_{\phi} \sqrt{3} \quad (11)$$

Можливість двоякого вмикання одних і тих же приймачів зіркою або трикутником розширює галузь застосування цих приймачів. Так, наприклад, якщо обмотка трифазного електродвигуна розрахована на фазну напругу 220 В, то при з'єднанні трикутником такий електродвигун можна увімкнути у сітку з лінійною напругою 220 В, а при з'єднанні зіркою – у сітку з лінійною напругою  $220\sqrt{3} = 380$  В.

У трипровідному трифазному електричному колі активну потужність, що споживається трифазним приймачем визначають як суму показів двох ватметрів, підключених за схемою, зображеною на рис. 8.



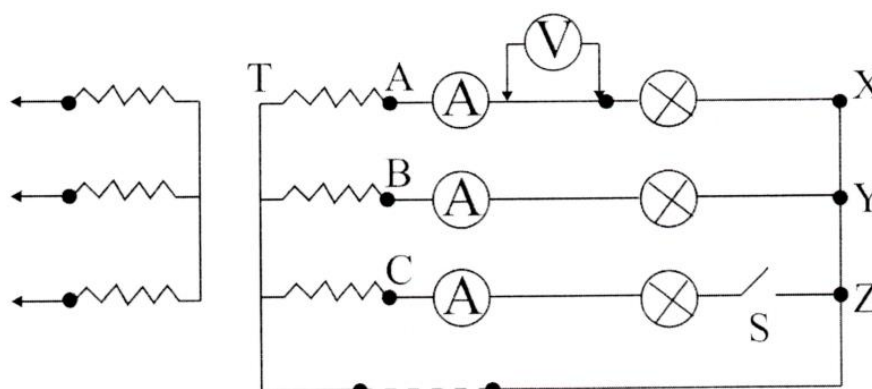
**Рис. 8.** Вимірювання потужності методом двох ватметрів

## 2. Хід роботи

1. Скласти коло типу зірка-зірка з нульовим проводом (рис. 9). Виміряти лінійні струми, а також фазні та лінійні напруги споживача один раз при рівномірному навантаженні, другий раз – при нерівномірному. Результати вимірювань занести до таблиці 1.

**Таблиця 1.**

| Коло типу зірка-зірка з нульовим проводом |          |          |             |             |             |          |          |          |              |
|---|----------|----------|-------------|-------------|-------------|----------|----------|----------|--------------|
| $U_a, B$                                  | $U_b, B$ | $U_c, B$ | $U_{ab}, B$ | $U_{bc}, B$ | $U_{ca}, B$ | $I_a, A$ | $I_b, A$ | $I_c, A$ | навантаження |
|   |          |          |             |             |             |          |          |          | Рівномірне   |
|   |          |          |             |             |             |          |          |          | Нерівномірне |



**Рис. 9.** Коло типу зірка-зірка з нульовим проводом

2. Обравши належним чином масштаби вимірювання напруг і сили струмів, побудувати векторні діаграми величини для обох випадків. Оцінити наскільки порушується симетрія напруг споживача при рівномірному навантаженні. Перевірити виконання формули  $I_n = I_\phi \sqrt{3}$  при рівномірному навантаженні.

3. Скласти коло типу зірка-зірка без нульового проводу. Виконати аналогічні вимірювання для обох навантажень. Результати вимірювання занести до таблиці 2. Побудувати векторні діаграми величин для рівномірного і нерівномірного навантажень. Перевірити виконання формули  $U_n = U_\phi \sqrt{3}$  при рівномірному навантаженні. Здійснити перевірку методу двох ватметрів.

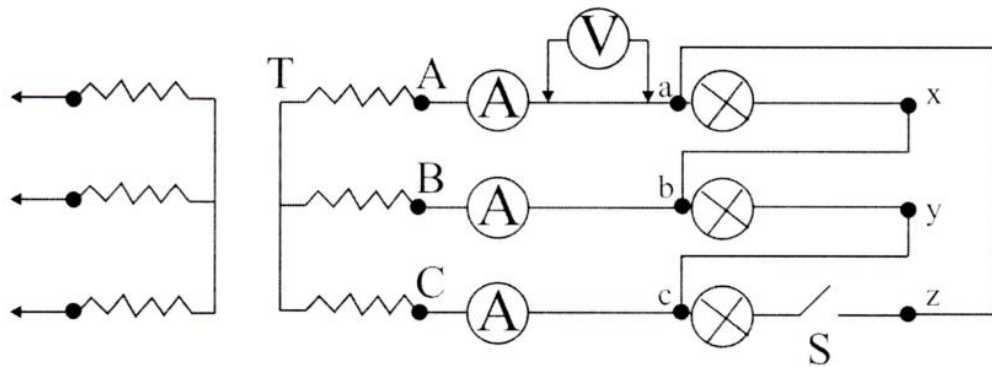
**Таблиця 2.**

| Коло типу зірка-зірка без нульового проводу |          |          |             |             |             |          |          |          |              |
|---|----------|----------|-------------|-------------|-------------|----------|----------|----------|--------------|
| $U_a, B$                                    | $U_b, B$ | $U_c, B$ | $U_{ab}, B$ | $U_{bc}, B$ | $U_{ca}, B$ | $I_a, A$ | $I_b, A$ | $I_c, A$ | навантаження |
|   |          |          |             |             |             |          |          |          | Рівномірне   |
|   |          |          |             |             |             |          |          |          | Нерівномірне |

4. Скласти коло типу зірка-трикутник (рис. 10). Виміряти лінійні та фазні струми споживача. Результати занести до таблиці 3. Здійснити перевірку методу двох ватметрів.

**Таблиця 3.**

| Коло типу зірка-трикутник |          |          |             |             |             |             |             |             |              |
|---------------------------|----------|----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| $I_a, B$                  | $I_b, B$ | $I_c, B$ | $I_{ab}, B$ | $I_{bc}, B$ | $I_{ca}, B$ | $U_{ab}, B$ | $U_{bc}, B$ | $U_{ca}, B$ | навантаження |
|                           |          |          |             |             |             |             |             |             | Рівномірне   |
|                           |          |          |             |             |             |             |             |             | Нерівномірне |



**Рис. 10.** Коло типу зірка-трикутник

5. Побудувати векторні діаграми величин для рівномірного і нерівномірного навантаження. Перевірити виконання формули  $I_n = I_\phi \sqrt{3}$ .

### 3. Контрольні запитання

1. Що називається симетричною системою трифазних ЕРС, напруг, струмів?
2. Що розуміють під фазою трифазного кола ?
3. Які переваги мають трифазні системи порівняно з однофазними?
4. Який зв'язок між фазною та лінійною напругою у випадку з'єднання трифазних споживачів „трикутником”?
5. Який зв'язок між фазним та лінійним струмом у випадку з'єднання трифазних споживачів „трикутником”?
6. Навіщо передбачається вмикання одних і тих же споживачів „зіркою” або „трикутником”?

## Лабораторна робота №7 ДОСЛІДЖЕННЯ БУДОВИ ТА РОБОТИ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

**Мета:** вивчити будову однофазного трансформатора, визначити коефіцієнт трансформації та напругу короткого замикання. Побудувати характеристики трансформатора.

**Прилади і матеріали:** 1) однофазний трансформатор; 2) амперметри; 3) вольтметри; 4) ватметр; 5) реостат; 5) набір з'єднувальних проводів.

### 1. Теоретичні відомості

*Трансформатор* – це електротехнічний пристрій, призначений для перетворення змінного струму однієї напруги на змінний струм іншої напруги тієї ж частоти. Трансформатор складається із сталевого осердя і обмоток. Осердя зібране з тонких листів електротехнічної сталі, ізольованих один від одного з метою зниження втрат потужності на гістерезис і вихрові струми.

Трансформатор вперше був сконструйований у 1876 році П. Н. Яблочковим. У 1892 р. він був удосконалений іншим винахідником П. Ф. Усагіним, а в 1890 році М. О. Доліво-Добровольський сконструював трифазний трансформатор. Сучасні трансформатори мають різноманітну конструкцію і призначення.

Перетворення напруги в трансформаторах здійснюється змінним магнітним потоком індуктивно зв'язаних між собою обмоток. Обмотка, що підключається до джерела електричної енергії, називається *первинною*, а обмотка, до якої підключене навантаження – *вторинною*. Параметри трансформатора, що належать до первинної обмотки (число витків, напруга, струм і т.д.), називаються первинними і в їхніх літерних позначеннях використовується індекс 1. Відповідно параметри вторинної обмотки називаються вторинними й записуються з індексом 2.

*Основними частинами трансформатора є:*

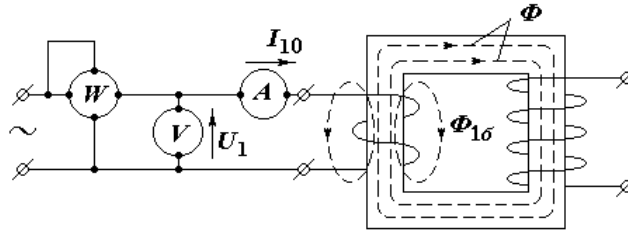
- магнітна система (магнітопровід або осердя);
- обмотки;
- система охолодження.

Магнітна система трансформатора являє собою комплект пластин або інших елементів, виготовлених з електротехнічної сталі або іншого феромагнітного матеріалу і зібраних у якійсь геометричній формі. Вона призначена для локалізації у ній основного магнітного поля трансформатора. Магнітна система в цілком зібраному виді спільно з усіма вузлами і деталями, призначеними для скріплення її окремих частин у єдину конструкцію, називається *остовом трансформатора*.

*Обмоткою* називається сукупність витків, що утворюють електричне коло, у якому додаються ЕРС, наведені у витках. Основним елементом обмотки є виток, тобто деталь з електричного провідника, або ряд паралельно з'єднаних таких деталей, які однократно охоплюють частину магнітної системи трансформатора. Електричний струм, що протікає через виток, разом із струмами в інших витках створює магнітне поле трансформатора, під дією якого виникає електрорушійна сила. Обмотки, як правило, виконуються з мідного або алюмінієвого проводу у виді кругових циліндрів.

Розглянемо фізичні процеси, що проходять в однофазному трансформаторі.

### Холостий хід трансформатора



В цьому режимі первинна обмотка трансформатора приєднана до джерела змінного струму з напругою  $U_1$ , а вторинна обмотка залишається розімкнутою.

Під дією прикладеної напруги  $U_1$  в первинній обмотці протікає струм  $I_{10}$ , що має назву струм х.х.. Трансформатор конструюється так, щоб струм х.х. був невеликим і складав  $2,5 \div 10\%$  від первинного струму  $I_{1н}$ , що виникає при роботі трансформатора з повним (номінальним) навантаженням. Струм  $I_{10}$  збуджує магнітний потік, який як і струм змінюється синусоїдально. Цей потік доцільно уявити як суму двох потоків:

*Головний магнітний потік  $\Phi$* , що замикається по сталевому магнітопроводу і пронизує витки первинної і вторинної обмоток;

*Потік розсіювання  $\Phi_{1\sigma}$* , що замикається по повітрю, пронизує *тільки* витки первинної обмотки і створює індуктивний опір первинної обмотки.

Дія трансформатора ґрунтується на явищі електромагнітної індукції. При підключенні первинної обмотки до джерела змінної напруги у витках цієї обмотки протікає змінний струм  $i_1$ , який створює в магнітопроводі змінний магнітний потік  $\Phi$ . Замикаючись в магнітопроводі, цей потік зчіплюється з обома витками (первинною і вторинною) і індукує в них ЕРС: у первинній обмотці ЕРС самоіндукції

$$e_1 = -N_1 \left( \frac{d\Phi}{dt} \right) \quad (1)$$

У вторинній обмотці ЕРС взаємоіндукції:

$$e_2 = -N_2 \left( \frac{d\Phi}{dt} \right) \quad (2)$$

де  $N_1$  та  $N_2$  – число витків у первинній і вторинній обмотках трансформатора.

Припустимо, що магнітний потік  $\Phi$  є синусоїдальною функцією від часу, тобто:

$$\Phi = \Phi_{\max} \sin \omega t \quad (3)$$

де  $\Phi_{\max}$  – максимальне значення потоку. Підставивши (3) у (1) одержимо:

$$e_1 = -\omega N_1 \Phi_{\max} \cos \omega t$$

Оскільки  $\cos \omega t = -\sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right)$ , то

$$e_1 = \omega N_1 \Phi_{\max} \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right) \quad (4)$$

Аналогічно

$$e_2 = \omega N_2 \Phi_{\max} \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right) \quad (5)$$

З формул (4) та (5) бачимо, що ЕРС  $e_1$  і  $e_2$  відстають по фазі від потоку  $\Phi$  на кут  $\frac{\pi}{2}$ . Максимальне значення ЕРС

$$E_{1\max} = \omega N_1 \Phi_{\max} \quad (6)$$

Поділивши  $E_{1\max}$  на  $\sqrt{2}$  і підставивши  $\omega = 2\pi\nu$ , одержимо діюче значення первинної ЕРС (В):



$$E_1 = \frac{E_{1\max}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \nu N_1 \Phi_{\max} = 4,44 N_1 \nu \Phi_{\max}$$

Аналогічно, для другої ЕРС

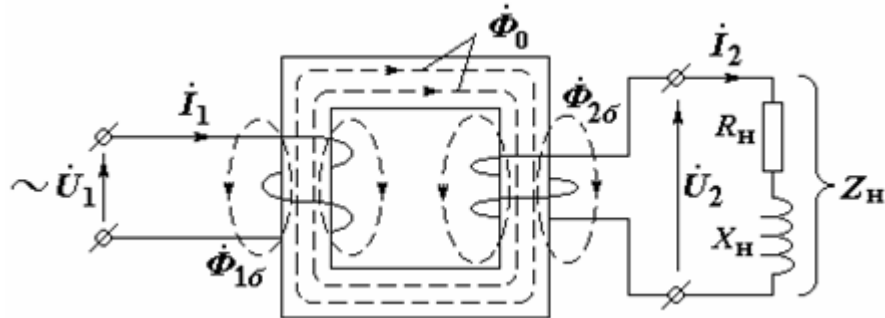
$$E_2 = 4,44 N_2 \nu \Phi_{\max}$$

Так як струм у вторинній обмотці відсутній, то напруга на клеммах цієї обмотки  $U_{20}$  в режимі х.х. дорівнює індукованій ЕРС  $E_{20}$ .

Відзначимо, що в реальних трансформаторах з достатньою точністю можна вважати  $U_1 \approx E_1$ . Відношення ЕРС, індукованих головним магнітним потоком в первинній і вторинній обмотках, називають *коефіцієнтом трансформації*.

$$k = \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{U_1}{U_2}$$

*Навантажений режим трансформатора.*



Припустимо, що до первинної обмотки трансформатора підключена напруга  $U_1$  і по ній протікає струм  $I_1$ . Він утворює магнітний потік, більша частина якого  $\Phi_0$  буде замикатись через сердечник, а менша частина  $\Phi_{1\sigma}$  буде замикатись через повітря:

$\Phi_0$  – головний магнітний потік;

$\Phi_{1\sigma}$  – потік розсіювання первинної обмотки.

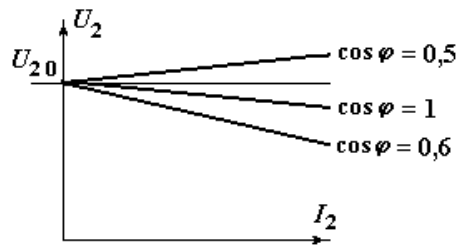
Головний магнітний потік пронизує витки первинної та вторинної обмотки і наводить в них ЕРС. ЕРС первинної обмотки врівноважується напругою живлення, а ЕРС вторинної обмотки живить навантаження, утворюючи струм у вторинному колі, тобто потужність.

Струм, що протікає через вторинну обмотку в свою чергу утворить магнітний потік, частина якого  $\Phi_{2\sigma}$  буде замикатись через повітря, а інша частина буде проходити через магнітопровід-сердечник – зустрічно потоку  $\Phi_0$ , зменшуючи його і, зменшуючи, відповідно, утворену ним ЕРС первинної обмотки ( $e_1 = -w_1 \cdot \frac{d\Phi_0}{dt}$ ).

Отже порушується баланс між напругою живлення і індукованою в первинній обмотці ЕРС. В результаті здійснюється зміна струму в первинній обмотці (струм збільшиться) при якому відновиться попередня величина магнітного потоку  $\Phi_0$ .

Інакше кажучи, через самовідновлення магнітного потоку  $\Phi_0$  здійснюється зміна струму в первинній обмотці в залежності від зміни струму у вторинній обмотці, тобто при зміні навантаження головний магнітний потік залишається незмінним для даного трансформатора.

Залежність напруги  $U_2$  від струму навантаження  $I_2$  називається *зовнішньою характеристикою трансформатора*.



Зовнішні характеристики трансформатора в залежності від  $\cos \varphi$  можуть мати вигляд:

Відзначимо, що при ємкісному навантаженні напруга  $U_2$  навантаженого трансформатора може бути вищою за напругу  $U_{20}$  при холостому ході.

Коефіцієнт корисної дії трансформатора, як і будь-якої машини, є відношення потужності  $P_2$ , яку віддає трансформатор, до потужності  $P_1$ , яку він споживає, тобто

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

При роботі трансформатора під навантаженням мають місце втрати потужності в сталі на гістерезис і вихрові струми  $P_{cm}$  та втрати в обмотках на нагрівання (втрати в міді)  $P_m$ . З врахуванням цих втрат формулу (1) можна представити у вигляді

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{cm} + P_m} \quad (2)$$

Визначити втрати  $P_{cm}$  і  $P_m$  аналітичним шляхом неможливо із-за складності електромагнітних процесів, які мають місце в трансформаторі. Тому їх визначають на підставі дослідів холостого ходу і короткого замикання.

Дослід холостого ходу проводить при розімкненій вторинній обмотці і при номінальній напрузі  $U_{1n} = 127 \text{ В}$  на первинній). За цих умов в первинній обмотці протікає струм холостого ходу  $I_0$ , який в сучасних трансформаторах не перевищує  $2 \dots 10\%$  номінального струму. При такому струмі втратою потужності в міді первинної обмотки ( $P_{m1} = I_0^2 r_1$ ) можна знехтувати, так як вона не перевищує  $2\%$  від втрат холостого ходу. Тому вважають, що втрати холостого ходу  $p_0$  приблизно дорівнюють втратам в сталі  $p_{cm}$ . При холостому ході струм  $I_0$  малий і падіння напруги  $U_{1x}$  в первинній обмотці не перевищує  $0,5\%$  від прикладеної напруги  $U_{1n}$ . Тому при холостому ході приймають, що  $U_{1n} = E_1$ ,  $U_{2x} = E_2$  і коефіцієнт трансформації

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{U_{1n}}{U_{2x}} \quad (3)$$

Де  $U_{2x}$  – напруга у вторинній обмотці при холостому ході.

Отже, з дослідів холостого ходу експериментальним шляхом визначають струм холостого ходу  $I_0$ , втрати в сталі  $p_0$  і напругу  $U_{2x}$ . На підставі цих даних обчислюють коефіцієнт трансформації.

При досліді короткого замикання вторинну обмотку замикають накоротко, а на первинну подають таку напругу  $U_k$ , при якій струм у первинній обмотці буде дорівнювати номінальному ( $I_{1n} = 0,94 \text{ А}$ ). За цих умов ЕРС первинної обмотки мала і струм намагнічування не перевищує  $0,1I_0$ . Тому втратами в сталі можна знехтувати і вважати, що підведена потужність витрачається на нагрівання обмоток і приблизно дорівнює втратам в міді:

$$P_k = P_{M_1} + P_{M_2} = I_{1n}^2 r_1 + I_{2n}^2 r_2 = I_{1n}^2 r_k = I_{1k}^2 r_k \quad (4)$$

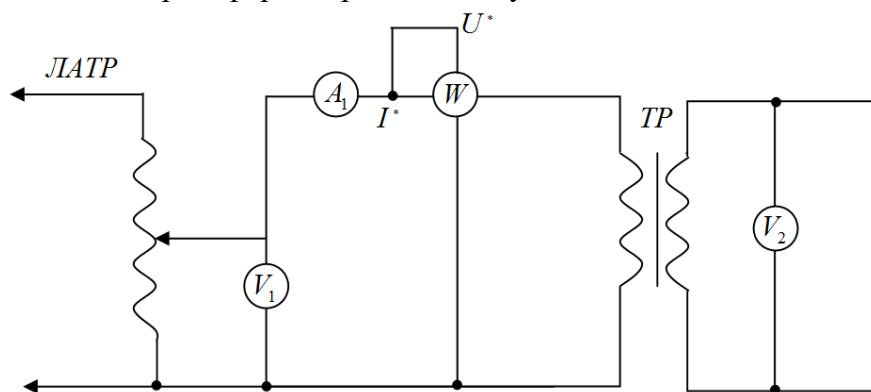
При навантаженні трансформатора, яке відрізняється від номінального, потужність  $P_2 = P_{2n} \beta$ , де  $\beta = \frac{I_2}{I_{2n}}$  – коефіцієнт навантаження трансформатора, і формулу (2) можна представити у загальному вигляді:

$$\eta = \frac{S_n \beta \cos \varphi_2}{S_n \beta \cos \varphi_2 + p_0 + \beta^2 p_k} \quad (5)$$

Номінальна потужність  $S_n$  досліджуваного трансформатора рівна 120 Вт.

## 2. Хід роботи

1. Зібрати установку для дослідження однофазного трансформатора. Поставити ручку регульованого автотрансформатора ЛАТР в нульове положення.



2. Після перевірки керівником правильності з'єднань встановити регульованим автотрансформатором ЛАТР номінальну напругу  $U_{1n} = 127 \text{ В}$  на первинній обмотці трансформатора. Зняти покази  $U_{2x}$ ,  $I_{1x}$  та  $p_0$  і записати покази усіх приладів в таблицю 1.

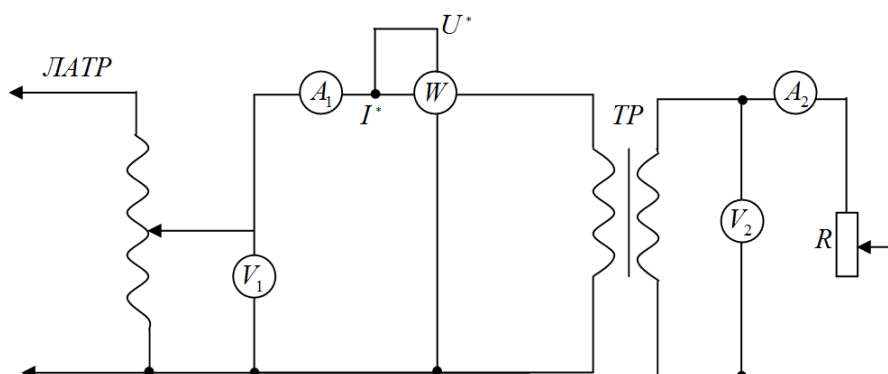
Таблиця 1. Дані дослідження холостого ходу

| $U_{1n}, \text{В}$ | $U_{2x}, \text{В}$ | $p_0, \text{Вт}$ |
|--------------------|--------------------|------------------|
| 127                |                    |                  |

3. За допомогою формули (3) визначити коефіцієнт трансформації.

4. Тимчасово вимкнути живлення в схемі. З дозволу викладача закортити (коротке замикання) вторинну обмотку. Подати напругу на схему, і повільно підвищуючи значення живлячої напруги за допомогою ЛАТРа, встановити номінальний струм первинної обмотки ( $I_{1n} = 0,94 \text{ А}$ ). Зняти з амперметра  $A_2$  покази  $I_{2n}$  у вторинній обмотці.

5. Зібрати установку для дослідження режиму навантаження.



6. Змінюючи за допомогою реостата  $R$  навантаження у вторинному колі, зняти 5-7 різних значень показів приладів та занести ці значення у таблицю 2. При цьому напругу  $U_1$  підтримувати постійною  $U_1 = 127 \text{ В}$ .

Таблиця 2. Дані дослідження навантаження

| №   | $U_1, \text{В}$ | $I_1, \text{А}$ | $p_1, \text{Вт}$ | $\cos \varphi_1$ | $U_2, \text{В}$ | $I_2, \text{А}$ | $p_2, \text{Вт}$ | $\beta$ | $\eta$ |
|-----|-----------------|-----------------|------------------|------------------|-----------------|-----------------|------------------|---------|--------|
| 1   | 127             |                 |                  |                  |                 |                 |                  |         |        |
| ... |                 |                 |                  |                  |                 |                 |                  |         |        |

6. Заповнити таблицю 2. Для цього скористатися формулами:

$$\cos \varphi_1 = \frac{p_1}{I_1 U_1}$$

$$p_2 = I_2 U_2$$

$$\beta = \frac{I_2}{I_{2n}}$$

Значення  $\eta$  розрахувати за формулою 5.

7. Побудувати в спільній системі координат характеристики  $U_2(I_2)$ ,  $I_1(I_2)$ ,  $\cos \varphi_1(I_2)$ ,  $\eta(I_2)$  при  $U_1 = \text{const}$ .

### 3. Контрольні запитання

1. Що таке трансформатор?
2. Назвіть основні частини однофазного трансформатора.
3. Що таке холостий хід трансформатора?
4. Що таке навантажений режим трансформатора.
5. Як знайти коефіцієнт трансформації?
6. Як знайти ККД трансформатора?
7. В чому полягає та для чого проводити режим короткого замикання?

## Лабораторна робота №8 ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З КОРОТКОЗАМКНЕНОЮ ОБМОТКОЮ РОТОРА

**Мета:** дослідити залежність швидкості обертання ротора, струмів у фазах обмотки статора і енергетичних показників роботи двигуна від гальмівного моменту. Зняти робочі характеристики двигуна.

**Прилади і матеріали:** 1) трифазний асинхронний двигун; 2) електродинамічне гальмо; 3) електричний тахометр; 4) ламповий реостат; 5) частотомір; 6) комплект вимірювальних приладів К-50.

### 1. Теоретичні відомості

Якщо статорну обмотку двигуна підключити до електричної мережі, то в ній виникають струми, які збуджують магнітне поле. Поле обертається з швидкістю, рівною:

$$n = \frac{60f}{p} \quad (1)$$

де  $f$  – частота струму,  $p$  – кількість пар полюсів магнітного поля, яка залежить від способу виготовлення обмотки.

Обертове магнітне поле, перетинаючи стержні роторної обмотки, індукує в них струми. Від взаємодії цих струмів з полем статора виникає обертальний момент, який діє на ротор в напрямі обертання поля.

Швидкість обертання ротора  $n_2$  завжди менша від швидкості поля. Величину

$$S = \frac{n - n_2}{n} \quad (2)$$

називають коефіцієнтом ковзання двигуна.

Асинхронний двигун, який працює з коефіцієнтом ковзання  $S$  можна перетворити в еквівалентний трансформатор. Для цього потрібно зупинити ротор і одночасно ввімкнути у кожну фазу роторної обмотки додатковий резистивний елемент з опором

$$\Delta R_2 = R_2 \frac{1 - S}{S} \quad (3)$$

де  $R_2$  – активний опір фази ротора. Двигун і трансформатор споживають від мережі однакову потужність. В обох випадках вона частково витрачається на нагрівання статорної і роторної обмоток та осердя машини (в однакових кількостях), а частина, яка залишається в двигуні витрачається на механічну роботу (по перемаганню гальмівного моменту), а в еквівалентному трансформаторі – на нагрівання додаткових резистивних елементів. На цій основі можна визначити механічну потужність двигуна:

$$P_2 = m I_2^2 R_2 \frac{1 - S}{S} \quad (4)$$

де  $I_2$  – струм у фазі роторної обмотки,  $m$  – число фаз обмотки. За потужністю можна визначити обертальний момент:

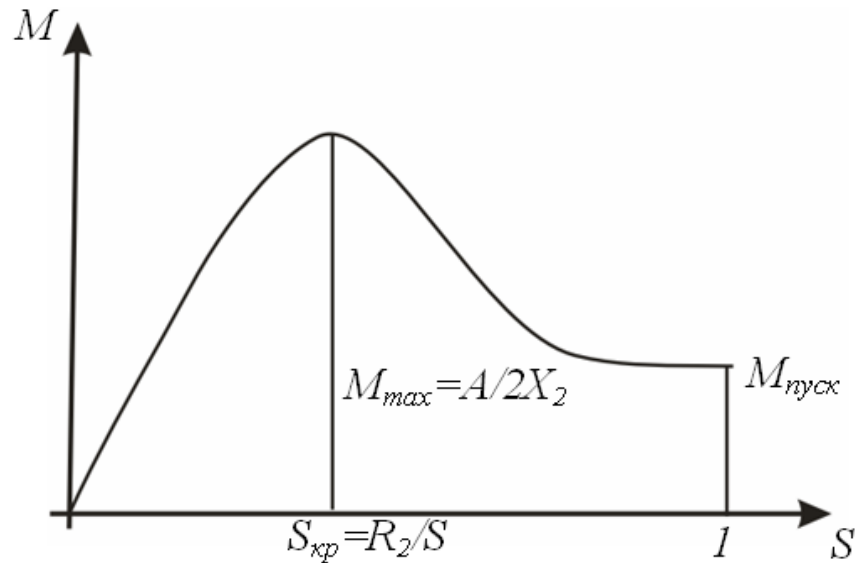
$$M = c U_1^2 \frac{S R_2}{R_2^2 + S^2 X_2^2} \quad (5)$$

де  $X_2$  – індуктивний опір фази ротора в еквівалентному трансформаторі,  $U_1$  – напруга мережі,  $c$  – сталий для даного двигуна множник. Якщо напруга  $U_1$  підтримується сталою, то

$$M = A \frac{S R_2}{R_2^2 + S^2 X_2^2} \quad (6)$$

де  $A$  – сталий коефіцієнт.

Графік залежності  $M = M(S)$ , побудований на основі цієї формули, має такий вигляд:



Стька робота двигуна можлива тільки на відрізьку  $[0; S_{кр}]$ , оскільки тут автоматично встановлюється таке значення  $S$ , при якому обертальний момент зрівноважує гальмівний. Якщо при збільшенні навантаження  $S$  стає більшим від  $S_{кр}$ , то двигун зупиняється і система захисту відключає його від мережі.

Рівняння напруг і струмів асинхронного двигуна (еквівалентного трансформатора) записується у вигляді:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1(R_1 + jX_1);$$

$$\dot{E}_1 = \dot{I}_2 \left( \frac{R_2}{S} + jX_2 \right);$$

$$\dot{I}_1 = I_0 + \left( -\dot{I}_2 \frac{W_2}{W_1} \right)$$

На основі цих рівнянь будується векторна діаграма двигуна.

Важливими характеристиками асинхронного двигуна є:

а) механічна характеристика

$$n_2 = f(M);$$

б) робочі характеристики

$$n_2 = f(P_2), S = f(P_2), I_1 = f(P_2), M = f(P_2), \eta = f(P_2), \cos \varphi_1 = f(P_2)$$

при  $U_1 = const$ .

#### Електродинамічне гальмо

Під час досліджень асинхронний двигун навантажують за допомогою вимірювального гальма. Найчастіше застосовують стрічкове, електромагнітне та електродинамічне гальмо. У цій роботі використовується гальмо другого типу.

Електродинамічне гальмо – це генератор постійного струму з незалежним збудженням, у якому, на відміну від типової машини постійного струму статор (індуктор) збалансований на валу якоря, і, крім того, він може вільно обертатися навколо осі машини. Якір генератора жорстко з'єднують з валом досліджуваного двигуна, а індуктор зв'язують за допомогою м'якої стрічки з пружинним динамометром, підвішеним на нерухомому кронштейні. При повороті індуктора навколо осі машини стрічка намотується на його

барабан і деформує пружину динамометра. Динамометр показує силу, з якою стрічка протидіє повороту індуктора.

Обмотку збудження індуктора за допомогою м'яких проводів підключають до джерела постійного струму. В коло збудження вмикають реостат, за допомогою якого можна регулювати силу струму, а отже, змінювати магнітний потік індуктора  $\Phi$ . До затискачів якоря також за допомогою м'яких проводів підключають ламповий реостат.

При обертанні ротора досліджуваного двигуна з швидкістю  $n$  об/хв, у якійній обмотці гальма індуктується ЕРС, чисельно рівна

$$E_{\text{я}} = C_1 \Phi n \quad (7)$$

де  $C_1$  – сталий множник. У колі якоря виникає струм силою

$$I_{\text{я}} = \frac{E_{\text{я}}}{R + R_{\text{я}}} \quad (8)$$

де  $R_{\text{я}}$  – опір якійної обмотки,  $R$  – опір лампового реостата.

Внаслідок взаємодії струмів якійної обмотки з магнітним полем індуктора на якій і зв'язаний з ним ротор досліджуваного двигуна діє гальмівний момент, рівний:

$$M = C_2 \Phi I_{\text{я}} = \frac{C_1 C_2}{R + R_{\text{я}}} n \Phi^2 \quad (9)$$

де  $C_2$  – сталий множник. Такий самий за величиною момент, але у протилежному напрямі діє на індуктор. Він зрівноважується моментом пружної сили динамометра, який можна обчислити за формулою

$$M = fR \quad (10)$$

де  $f$  – показ динамометра,  $R$  – радіус барабана, на який намотується стрічка. У даній роботі  $R = 9,3$  см.

Змінюючи величини  $\Phi$  та  $R$ , можна одержати різні значення гальмівного момента. Механічну потужність двигуна обчислюють за формулою

$$P_2 = 1,027 n_2 M \quad (11)$$

Тут швидкість  $n_2$  виражена об/хв, момент  $M$  у кгс-м, потужність  $P_2$  – у Вт.

#### *Електричний тахометр*

Швидкість обертання ротора досліджуваного двигуна вимірюють за допомогою тахометра. У цій роботі використовується електричний тахометр, який складається з тахогенератора і електронного частотоміра. Тахогенератором служить малогабаритна синхронна машина з постійним магнітом на роторі. При вимірюваннях наконечник вала тахогенератора вставляється в осьовий отвір прямокутної форми у корпусі двигуна, чим забезпечується жорстке з'єднання валів і їх синхронного обертання.

Якщо ротор двигуна обертається з швидкістю  $n$  об/хв, то в статорній обмотці тахогенератора індуктується змінна ЕРС, частота якої рівна

$$f = \frac{pn}{60} \quad (12)$$

де  $p$  – число пар полюсів постійного магніта. Змінна напруга від тахогенератора подається на синхронний частотомір з цифровою індикацією. Вимірявши частоту напруги  $f_0$  та знаючи число пар полюсів  $p$ , швидкість обертання ротора обчислюють за формулою:

$$n = \frac{60 f_0}{p} \quad (13)$$

### Комплект вимірювальних приладів

Комплект К-50 призначений для вимірювання фазних напруг, лінійних струмів і потужностей у трифазних, чотири- та трипровідних колах. Він складається з вольтметра, амперметра і однофазного ватметра, які по чергово включаються у коло відповідної фази з використанням нульового провода (якщо коло чотирипровідне) або штучної нульової точки (якщо коло трипровідне). Штучна нульова точка одержується шляхом вмикання за схемою зірки трьох елементів з рівними опорами паралельної вітки ватметра і вольтметра, з'єднаних паралельно, і двох резисторів, встановлених на корпусі приладу.

Границі вимірювання сили струму: 1; 2,5; 5; 10; 25; 50 А і їх встановлюють перемикачем А. Границі вимірювання напруг: 150; 300; 450; 600 В. Їх встановлюють перемикачем В. По чергово вмикання приладів у фази А, В, С здійснюється за допомогою перемикача Ф. При встановленні цього перемикача у положення „0” послідовні вітки приладів закорочуються, а паралельні відключаються від мережі.

У цій роботі комплект К-50 використовується для вимірювання лінійної напруги і сили струму у колі статорної обмотки, а також споживані двигуном електричної потужності. Ці величини обчислюють за формулами:

$$U_1 = \sqrt{3} \frac{U_A + U_B + U_C}{3}; I_1 = \frac{I_A + I_B + I_C}{3}; P = P_A + P_B + P_C.$$

## 2. Хід роботи

1. Ознайомитися з паспортом досліджуваного двигуна. Визначити синхронну швидкість і номінальні значення величин:  $U_1$ ,  $I_2$ ,  $\cos \varphi_1$ ,  $n_2$ ,  $S$ ,  $p_2$ ,  $\eta$ . Напругу і силу струму вказати для обох способів вмикання статорної обмотки.

2. Ознайомитися з вимірювальним гальмом. Скласти коло обмоток збудження індуктора, увімкнувши у нього регулювальний реостат і амперметр на 10 А. прийняти до уваги, що струм збудження не може перевищувати 8 А. До затискачів якоря підключити ламповий реостат.

3. Ознайомитися з комплектом приладів К-50. Включити прилад у коло статорної обмотки двигуна. Встановити границі вимірювання, які відповідали б номінальним значенням напруги і сили струму двигуна.

4. Ознайомитися з електричним тахометром. Підключити кабель тахогенератора до частотоміра. Перевірити можливість з'єднання тахогенератора з валом досліджуваного двигуна. Прийняти до уваги такі правила користування тахометром:

а) при вимірюваннях вал тахогенератора потрібно встановлювати вздовж осі ротора досліджуваного двигуна і утримувати його у такому положенні протягом усього сеансу вимірювання;

б) результат вимірювання частоти періодично висвітлюється на цифровому табло частотоміра. Перший показ приладу не достовірний. Приймають до уваги наступні результати висвічування;

в) у даній установці використовується тахогенератор, для якого  $p = 2$ . Тому швидкість обертання ротора двигуна потрібно обчислювати за формулою:

$$n_2 = 30 f_0$$

5. Встановивши перемикач фаз приладу К-50 у нульове положення та утримуючи індуктор гальма (взявши рукою за балансир) в положенні, коли стрічка динамометра не натягнута, підключити двигун до електричної мережі. Замкнути коло збудження індуктора, ввівши попередньо регулювальний реостат на повний опір. У ламповому реостаті включити одну лампу, обережно відпустити індуктор, дбаючи про те, щоб динамометр прийняв навантаження без удару. Збільшуючи струм збудження, домогтися навантаження, коли показ динамометра рівний 1 кгс. Виміряти при цьому навантаженні величини:  $U_A$ ,  $U_B$ ,  $U_C$ ,  $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$ ,  $P_A$ ,  $P_B$ ,  $P_C$ ,  $f_0$ .



6. Здійснити аналогічні вимірювання, коли показ динамометра складає 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 кгс. Для збільшення гальмівного моменту потрібно у ламповому реостаті додатково включити відповідне число ламп і регулювати струм збудження індуктора. При вмиканні ламп потрібно захищати динамометр від ударних навантажень і перемикач фаз у приладі К-50 ставити у нульове положення.

7. Результати вимірювань занести до таблиці 1. На основі відповідних розрахунків заповнити таблицю 2. Побудувати робочі характеристики двигуна:

$$n_2 = f(P_2), S = f(P_2), I_1 = f(P_2), M = f(P_2), \eta = f(P_2), \cos \varphi_1 = f(P_2).$$

**Таблиця 1**

| №   | $U_A, B$ | $U_B, B$ | $U_C, B$ | $I_A, A$ | $I_B, A$ | $I_C, A$ | $P_A, Bm$ | $P_B, Bm$ | $P_C, Bm$ | $F, кгс\cdot c$ | $f_0, Гц$ |
|-----|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------------|-----------|
| 1   |          |          |          |          |          |          |           |           |           |                 |           |
| ... |          |          |          |          |          |          |           |           |           |                 |           |

**Таблиця 2**

| №   | $U_1, B$ | $I_1, A$ | $P_1, Bm$ | $M, кгс\cdot m$ | $n_2$ | $S$ | $P_2, Bm$ | $\eta$ | $\cos \alpha$ |
|-----|----------|----------|-----------|-----------------|-------|-----|-----------|--------|---------------|
| 1   |          |          |           |                 |       |     |           |        |               |
| ... |          |          |           |                 |       |     |           |        |               |

#### УВАГА!

1. Перед вмиканням установки у мережу корпус двигуна і корпус приладу К-50 потрібно заземлити.

2. Включати двигун і змінювати його навантаження можна тільки за умов, що перемикач фаз у приладі К-50 знаходиться у нульовій позиції.

3. Під час пуску двигуна, а також при зміні його навантаження не допускайте ударних взаємодій між індуктором гальма і динамометра.

4. При увімкнутій установці не можна доторкатися руками до генераторних затискачів і затискачів навантаження у приладі К-50.

### 3. Контрольні запитання

1. Що називається трифазним асинхронним двигуном?
2. Яка будова трифазного асинхронного двигуна?
3. За якою формулою можна обчислити швидкість обертання магнітного поля?
4. За якою формулою можна обчислити швидкість обертання ротора трифазного асинхронного двигуна?
5. Для чого у цій роботі використовується електродинамічне гальмо?
6. Поясніть принцип роботи електричного тахометра.
7. Розкажіть принцип роботи з комплектом вимірювальних приладів К-50.

## Література

1. Кевшин А. Г. Електротехніка : конспект лекцій. Луцьк : Вежа-Друк, 2016. 69 с. (<https://evnuir.vnu.edu.ua/handle/123456789/19595>).
2. Кевшин А. Г., Галян В. В., Федосов С. А. Електротехніка : задачі у 2 ч. Ч. 1 : Кола постійного струму. Лінійні кола змінного струму. Трифазні кола електричного струму. Луцьк : Вежа-Друк, 2020. 39 с. (<https://evnuir.vnu.edu.ua/handle/123456789/19596>).
3. Кевшин А. Г., Галян В. В., Федосов С. А. Електротехніка: задачі у 2-х ч. Ч. 2: Трансформатори. Комплексний метод розрахунку електричних кіл синусоїдного струму. Луцьк : Вежа-Друк, 2020. 39 с. (<https://evnuir.vnu.edu.ua/handle/123456789/19594>).
4. Кевшин А. Г., Новосад О. В., Федосов С. А. Електротехніка : навчальний посібник. Луцьк : Вежа-Друк, 127 с. (<https://evnuir.vnu.edu.ua/handle/123456789/19575>).
5. Кевшин А., Галян В., Третьяк А., Артюх Ю., Шафарчук В., Никифоров О., Куршель Д. Використання практичних та лабораторних занять під час вивчення складних лінійних електричних кіл постійного струму в курсі електротехніки. Фізика та освітні технології. 2022. №1. С. 27–33.
6. Кевшин А.Г., Галян В.В., Куршель Д.С. Особливості викладання курсу «Електротехніка» для студентів спеціальності «Прикладна фізика та наноматеріали» Волинського національного університету імені Лесі Українки // Релаксаційні, нелінійні й акустооптичні процеси та матеріали РНАОПМ'2022 : матеріали XI-ої Міжнар. наук. конф., 1-5 трав. 2022 р., м. Луцьк, Україна: тези доп. Луцьк : РВВ „Вежа” Волин. нац. ун-ту ім. Лесі Українки, 2022. С. 90–91.
7. Титаренко М. В. Електротехніка: Навчальний посібник для студентів інженерно-технічних спеціальностей вузів. К. : Кондор, 2004. 240 с.
8. Шегедін О. І., Маляр В. С. Теоретичні основи електротехніки. Частина 1: Навчальний посібник для студентів дистанційної форми навчання електротехнічних та електромеханічних спеціальностей вищих навчальних закладів. Львів: Новий Світ, 2004. 168 с.
9. Болюх В. Ф., Данько В. Г., Гончаров Є. В. Основи електротехніки, електроніки та мікропроцесорної техніки : навч. Посібник. Харків : Планета-Прінт, 2019. 248 с.
10. Гуржій А. М., Мещанінов С. К., Нельга А. Т., Співак В. М. Електротехніка та основи електроніки : підручник для здобувачів професійної (професійно-технічної) освіти. Київ : Літера ЛТД, 2020. 288 с.
11. Левченко Т. В. Хоменко В. В., Оверчук М. П., Стефанішин М. В. Загальна електротехніка з основами автоматики: Навчальний посібник. К., 2010. 358 с.

Навчально-методичне видання

**Кевшин Андрій Григорович**

## **Електротехніка**

методичні рекомендації  
до виконання лабораторних робіт

Друкується в авторській редакції