

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

Методичні вказівки
до проведення лабораторних занять для здобувачів вищої
освіти першого (бакалаврського) рівня за спеціальностями
174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»,
175 «Інформаційно-вимірювальні технології»

Електронний ресурс

Рецензенти:

Д. А. Семенець – кандидат технічних наук, доцент кафедри електромеханічних та комп'ютерних систем Бахмутського навчально-наукового професійно-педагогічного інституту Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна;
К. Ю. Бровко – кандидат технічних наук, доцент кафедри електротехніки та електроенергетики ННІ «Українська інженерно-педагогічна академія».

*Затверджено до розміщення в мережі Інтернет рішенням Науково-методичної ради
Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна
(протокол № 6 від 28 лютого 2025 року)*

Електротехніка : методичні вказівки до проведення лабораторних занять для
Е 45 для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за спеціальностями
174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка», 175 «Інформаційно-вимірювальні технології» [Електронний ресурс] / уклад. А. І. Тарасенко, Г. М. Мосієнко. – Харків : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2025. – 57 с.

Методичні вказівки до проведення лабораторних занять з дисципліни «Електротехніка» містять загальні положення з кожної теми, порядок проведення експерименту та рекомендації щодо оброблення експериментальних даних.

Призначено для студентів, що навчаються за спеціальностями 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка», 175 «Інформаційно-вимірювальні технології».

УДК 621.3.01(075.7)

© Харківський національний університет
імені В. Н. Каразіна, 2025

© Тарасенко А. І., Мосієнко Г. М., уклад., 2025

ЗМІСТ

ВСТУП	4
Лабораторна робота № 1	
Дослідження лінійного розгалуженого електричного кола постійного струму . .	5
Лабораторна робота № 2	
Дослідження нерозгалуженого електричного кола синусоїдного струму.	20
Лабораторна робота № 3	
Дослідження трифазного електричного кола при з'єднанні фаз приймача «зіркою».	38
ДОДАТКИ	50
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	56

ВСТУП

Лабораторні заняття є важливим елементом навчального процесу з курсу «Електротехніка».

Метою лабораторного практикуму з курсу «Електротехніка» є закріплення теоретичних знань, експериментальна перевірка положень та законів електротехніки, а також здобуття навичок експериментального дослідження електричних кіл, визначення та вимірювання різноманітних електричних величин.

Виконання лабораторної роботи для кожного здобувача вищої освіти передбачає чотири етапи: підготовка до роботи, виконання експерименту, обробка експериментальних даних та оформлення результатів дослідів, захист роботи. Для виконання та оформлення кожної роботи відводиться 4 академічних години.

Перш ніж приступити до вивчення опису лабораторних робіт, необхідно детально ознайомитися з додатками:

1. Правила виконання лабораторних робіт.
2. Правила безпеки в електротехнічній лабораторії.
3. Правила оформлення звітів з лабораторних робіт.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

ДОСЛІДЖЕННЯ ЛІНІЙНОГО РОЗГАЛУЖЕНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

1. Мета роботи

Експериментальне дослідження різних методів розрахунку лінійних розгалужених кіл постійного струму.

2. Підготовка до роботи

Необхідно вивчити дані методичні вказівки, повторити теоретичні положення по літературі, що рекомендується, підготувати схеми і таблиці для запису результатів вимірювань.

Крім того, потрібно:

знати мету і зміст роботи, порядок її виконання; визначення понять вузол, вітка, контур; закон Ома та закони Кірхгофа; методи накладання та еквівалентного генератора;

вміти користуватися вимірювальними приладами; застосовувати закон Ома та закони Кірхгофа для аналізу та розрахунку електричних кіл постійного струму; розраховувати еквівалентні опори при різноманітних з'єднаннях приймачів енергії.

3. Загальні положення

Слід пам'ятати, що струми та напруги в електричному колі, в залежності від її ступеня складності, можна визначити аналітично, з застосуванням закону Ома або закону Ома та законів Кірхгофа. Однак є і інший спосіб дослідження кіл – експериментальний, який дозволяє отримати такі ж результати (звичайно з більшою похибкою), але, як правило, за менш короткий проміжок часу. При цьому вірогідність отриманих результатів може бути перевірена за допомогою рівнянь, що складені зі застосуванням закону Ома та законів Кірхгофа.

Закон Ома застосовується для одного елементу, однієї вітки або для одноконтурного замкнутого (такого, що не має розгалужень) електричного кола. Для одного елементу або пасивної вітки ab (рис. 1):

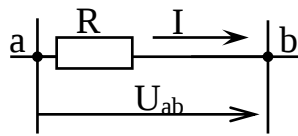


Рис. 1

$$I = \frac{U_{ab}}{R}, \quad (1)$$

де I – струм, що проходить через елемент кола [А];

U_{ab} – прикладена до елементу (вітки) напруга [В];

R – опір [Ом].

Для активної вітки ab (рис. 2):

$$I = \frac{U_{ab} + E_1 - E_2}{R_1 + R_2 + R_3}. \quad (2)$$

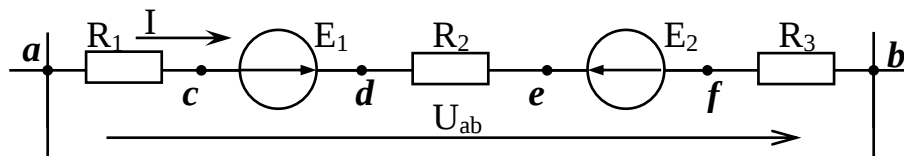


Рис. 2

У загальному випадку, коли між вузлами a і b ввімкнена активна резистивна вітка і струм направлений від вузла a до вузла b , формула (2) приймає вигляд:

$$I = \frac{U_{ab} + \sum E}{\sum R}, \quad (3)$$

де $\sum E$ - алгебраїчна сума ЕРС. При цьому ЕРС, напрями яких збігаються з напрямом струму, беруться зі знаком “+”, а якщо ці напрями не збігаються, то відповідні ЕРС беруться зі знаком “-”.

Вираз (3) є узагальнений закон Ома для ділянки кола, що містить джерело ЕРС. Для замкнутого одно контурного кола (рис. 3) закон Ома записується в такому вигляді:

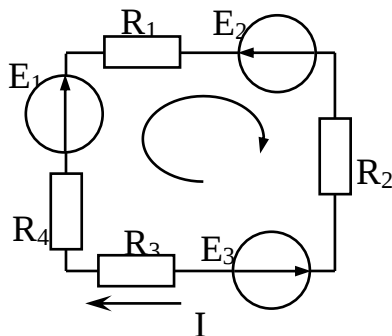


Рис. 3

$$I = \frac{\sum E}{\sum R}, \quad (4)$$

де $\sum E$ – алгебраїчна сума ЕРС контура; $\sum R$ – арифметична сума опорів контуру.

Перший закон Кірхгофа (закон струмів).

Алгебраїчна сума струмів в будь-якому вузлі електричного кола дорівнює нулю:

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0 \quad (5)$$

або арифметична сума струмів, що входять у вузол, дорівнює арифметичній сумі струмів, що виходять з вузла.

Для запису першого закону Кірхгофа у вигляді (5) доволіно приймається правило знаків, наприклад: струми, які входять у вузол, беруться зі знаком «+», а ті, які виходять, - зі знаком «-».

З точки зору фізики перший закон Кірхгофа описує той експериментально встановлений факт, що заряди у вузлі електричного кола не накопичуються.

Розглянемо вузол *a* на рис. 4. Вважатимемо струми, що входять у вузол, додатними, а що виходять - від'ємними. Тоді для вузла *a* перший закон Кірхгофа можна записати таким чином:

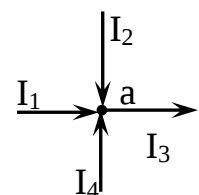


Рис. 4

$$I_1 + I_2 - I_3 + I_4 = 0 \text{ або } I_1 + I_2 + I_4 = I_3$$

Другий закон Кірхгофа (закон напруг). Алгебраїчна сума напруг на вітках (елементах) будь-якого замкнутого контуру дорівнює нулю:

$$\sum_{k=1}^m U_k = 0 \quad (6)$$

або алгебраїчна сума ЕРС у будь-якому замкнутому контурі дорівнює алгебраїчній сумі напруг на елементах цього контуру:

$$\sum_{k=1}^m E_k = \sum_{k=1}^n I_k R_k . \quad (7)$$

Для складання рівнянь за другим законом Кірхгофа спочатку задають (вказують) напрям струмів у всіх вітках електричного кола (якщо тільки струми не задані за умовою завдання). Потім для кожного контуру вибирають напрям обходу. Якщо при цьому напрям ЕРС збігається з напрямом обходу контуру, то таку ЕРС в рівнянні (7) беруть зі знаком “+”, якщо не збігаються – зі знаком “–”. Напруги в правій частині рівняння (7) беруть зі знаком “+”, якщо вибраний напрям струму вітки збігається з напрямом обходу контуру, та зі знаком “–”, якщо не збігається.

Для контура *abcd* (рис. 5), який складається з віток *ab*, *bc*, *cd*, *da*, рівняння (7) приймає вигляд:

$$E_1 - E_2 - E_3 = I_1 R_1 - I_2 R_2 - I_3 R_3 - I_4 R_4 ,$$

а рівняння (6), якщо позначити напруги на вітках контуру як U_{ab} , U_{bc} , U_{cd} , U_{ad} , другий закон Кірхгофа приймає вигляд:

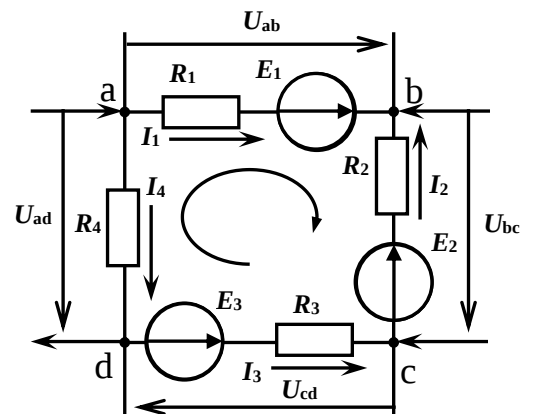


Рис. 5_

$$U_{ab} + U_{bc} + U_{cd} - U_{ad} = 0$$

Як приклад, розглянемо складну схему електричного кола постійного струму (рис. 6) у відповідності з другим законом Кірхгофа для першого та другого контуру

$$U = U_2 + U_3; \quad E = U_3 + U_4 \quad (8)$$

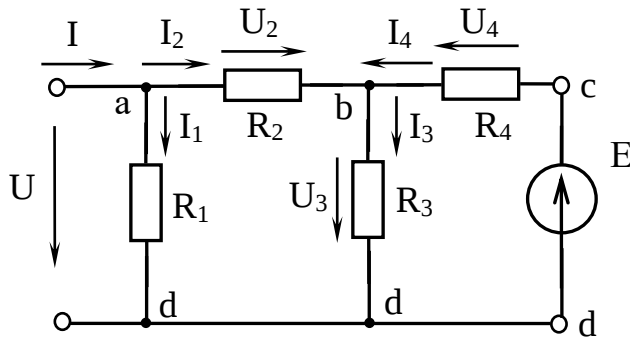


Рис. 6

Далі перевіряється виконання закону Ома, за допомогою підстановки в вирази вимірюваних значень напруг та відомих величин опорів і порівняння отриманих результатів з виміряними величинами відповідних струмів.

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{U}{R_1}; & I_2 &= \frac{U_2}{R_2}; \\ I_3 &= \frac{U_3}{R_3}; & I_4 &= \frac{U_4}{R_4}. \end{aligned} \quad (9)$$

Виконання першого закону Кірхгофа перевіряється шляхом підстановки в рівняння вимірянних струмів

$$\begin{aligned} I &= I_1 + I_2 && \text{вузол "a"} \\ I_3 &= I_2 + I_4 && \text{вузол "b"} \end{aligned} \quad (10)$$

Метод накладання

Метод накладання, застосовується при аналізі складного електричного кола з декількома ЕРС, засновано на принципі незалежності дій окремих ЕРС: струми у складному колі з декількома ЕРС можна представити як алгебраїчну суму струмів, які створюються окремо кожною ЕРС. Експериментальна перевірка методу накладання складається в вимірюванні часткових струмів у вітках кола з одним джерелом живлення з подальшим розрахунком дійсних струмів у вітках вихідного кола. Окремо виконується аналітичний розрахунок цього кола методом накладання. Результати обох способів визначення струмів повинен бути однаковим. Наприклад, треба провести дослідну перевірку метода накладання за схемою, яка наведена на рис. 7.

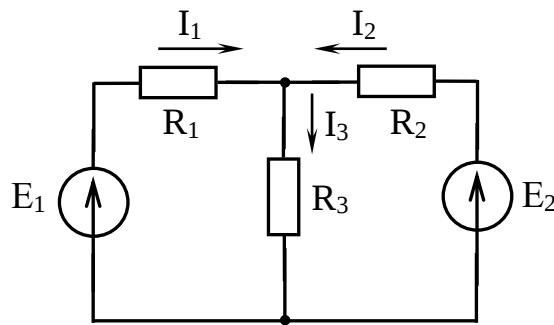


Рис. 7

Перевірка методу накладання проводиться за таким алгоритмом.

Спочатку необхідно скласти дві часткові схеми (за числом віток, які містять джерела електричної енергії), як наведено на рис. 8 а, б. Потім за складеними схемами збираються електричні кола, в яких вимірюються часткові струми. Дійсні значення струмів у вітках вихідної схеми визначаються шляхом підстановки вимірянних струмів у рівняння

$$I_1 = I'_1 - I''_1; \quad I_2 = I'_2 - I''_2; \quad I_3 = I'_3 + I''_3. \quad (11)$$

При цьому дійсне направлення струму в даній вітці вихідної схеми буде співпадати з направленням часткового струму в цієї вітці першої часткової схеми, якщо знак струму, який знаходиться – додатний. При від’ємному значенні струму його направлення потрібно змінити на протилежне.

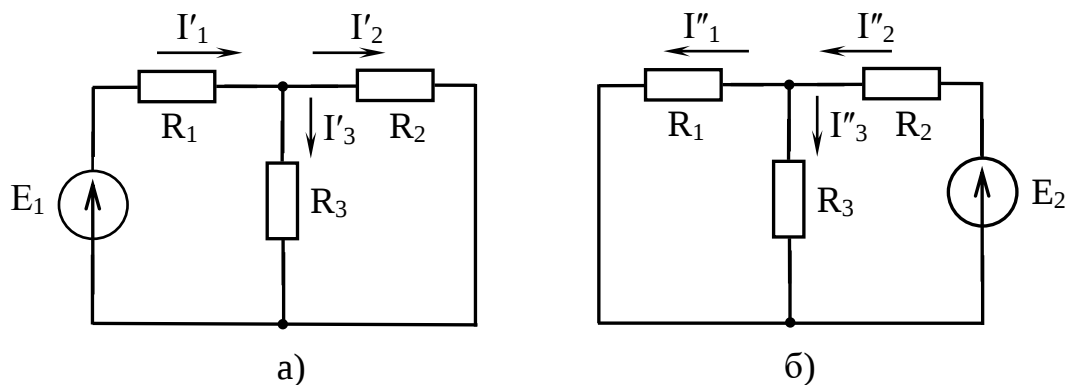


Рис. 8

Метод еквівалентного генератора

Цей метод зручно застосовувати при визначенні струму у який-небудь однієї вітки складного кола постійного струму. Згідно цьому методу, вплив усіх джерел електричного кола на вітку, що досліджується, можна замінити взаємодією послідовно з'єднаного з віткою еквівалентного генератора з ЕРС E_E та внутрішнім опором R_E . Метод еквівалентного генератора можна перевірити за допомогою дослідів холостого ходу та короткого замикання.

Дослід холостого ходу зводиться до вимірювання напруги $U_X = E_E$ між точками розриву кола вітки, що досліджується.

При досліді короткого замикання до точок розриву кола підключається амперметр або резистивний елемент $R = 1$ Ом для вимірювання струму I_K короткого замикання. При цьому опори, які підключені в відповідну вітку, видаляються, а замість них ставлять перемички.

Внутрішній опір еквівалентного генератора

$$R_E = \frac{U_X}{I_K}. \quad (12)$$

Струм, який визначається в відповідній вітки

$$I = \frac{E_E}{R_E + R}, \quad (13)$$

де R – опір цієї вітки.

Схеми дослідів холостого ходу, короткого замикання та схеми заміщення вихідного електричного кола показані на рис. 9 а, б, в.

При вимірюванні значення напруги U_{dc} визначається і його полярність за допомогою цифрового вольтметра для встановлення дійсного напрямлення струму в вітки, яка досліджується. Наприклад, для відміченої на рис. 9 а полярності, струм у вітки з опором R_3 буде спрямовано від точки d до точки c .

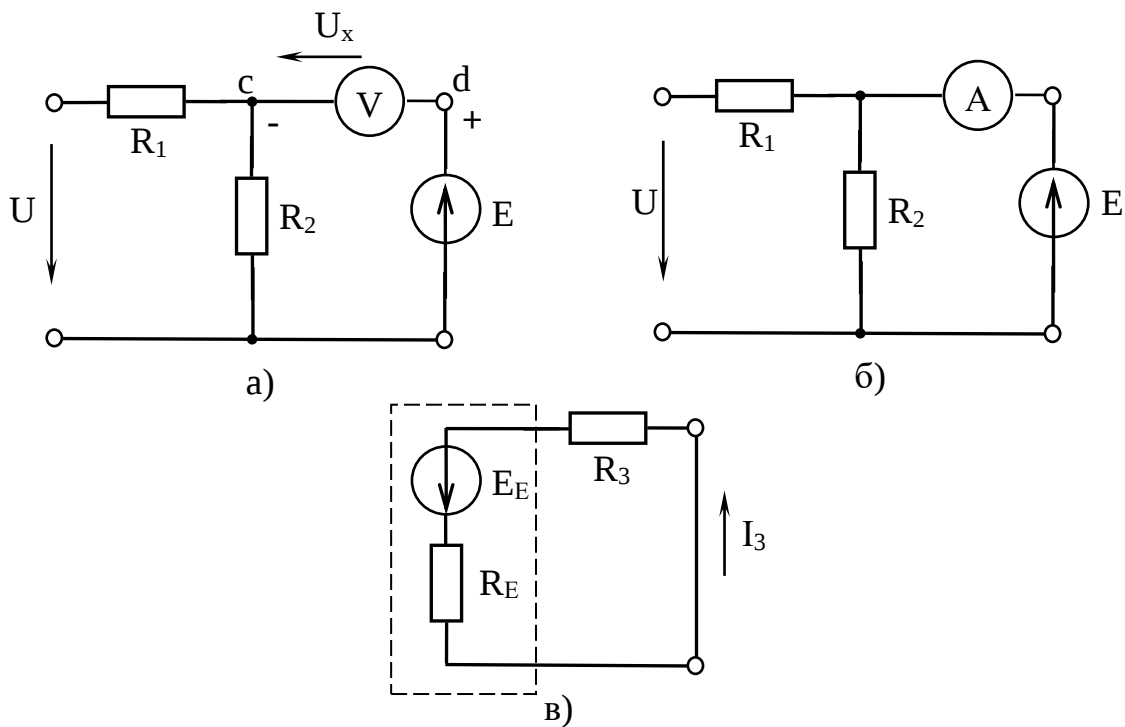


Рис. 9

4. Прилади та обладнання

Використовуються блок постійного живлення учбово-дослідницького стенда (УДЛС-1) з регульованою та нерегульованою напругою, універсальні цифрові вольтметри В7-22А (2 одиниці), комплект вимірювальних резисторів

($R = 1 \text{ Ом}$), комплект постійних резисторів, перемички та комплект проводів для з'єднання.

5. Міри безпеки

До виконання лабораторної роботи допускаються студенти, які пройшли інструктаж з техніки безпеки (відповідний запис в журналі з техніки безпеки).

При виконанні роботи необхідно дотримуватися наступних правил техніки безпеки:

- не доторкатися до труб водопроводу і опалювальної системи;
- не включати без дозволу вимірювальні прилади в мережу;
- не витягати блоки стенда;
- не залишати без нагляду підключені стенд і прилади;
- негайно відключати живлення при виникненні ушкоджень;
- виключати живлення блоків стенда і вимірювальних приладів по закінченню роботи за стендом.

Напруги, які застосовуються для живлення електричного кола, небезпеки для життя людини не представляють.

Всі джерела живлення забезпечені захистом від перенавантажень і короткого замикання. Однак слід враховувати, що тривалий вплив струму на елементі електричного кола, що досліджується, може привести до їх непридатності. Тому, вмикати блок живлення в мережу рекомендується тільки на той час, який необхідно для отримання показів з вимірювальних приладів і запису їх в лабораторний звіт.

Після закінчення роботи всі вимірювальні прилади і блок живлення стенду повинні бути вимкнені.

6. Порядок проведення роботи

Дослід 1. Перевірка виконання закону Ома та законів Кірхгофа.

На набірному полі стенда УДЛС-1 зібрати електричне коло за схемою, яка наведена на рис. 10. У зібраному колі обидва джерела напруги повинні працювати в генераторному режимі (струм повинен співпадати за напрямком з ЕРС). Вихідні дані для схеми наведено в табл. 1.

Струми електричного кола вимірюються опосередкованим методом, за допомогою вимірювальних резисторів, опір яких дорівнює 1 ($R_{ВИМ} = 1 \text{ Ом}$):

$$I = \frac{U_{ВИМ}}{R_{ВИМ}} = \frac{U_{ВИМ}}{1} = U_{ВИМ} \quad (14)$$

Падіння напруги $U_{ВИМ}$ вимірюється на вимірювальному опорі цифровим вольтметром В7-22А, при встановленні роду роботи «-V» - постійна напруга, та границі вимірювання – 1. При цьому діапазон вимірюваних напруг складатиме $0 \div 0,99 \text{ В}$.

Покази приладу в вольтах, яке переводимо у мілівольти, буде дорівнювати струму у колі (14), виражений у міліамперах.

Таблиця 1

Вихідні дані

Варіант	R_1 , №/Ом	R_2 , №/Ом	R_3 , №/Ом	E_1 , В	E_2 , В
1	$\frac{05}{200}$	$\frac{04}{150}$	$\frac{03}{100}$	20	10,1
2	$\frac{06}{300}$	$\frac{05}{200}$	$\frac{04}{150}$	20	15,1

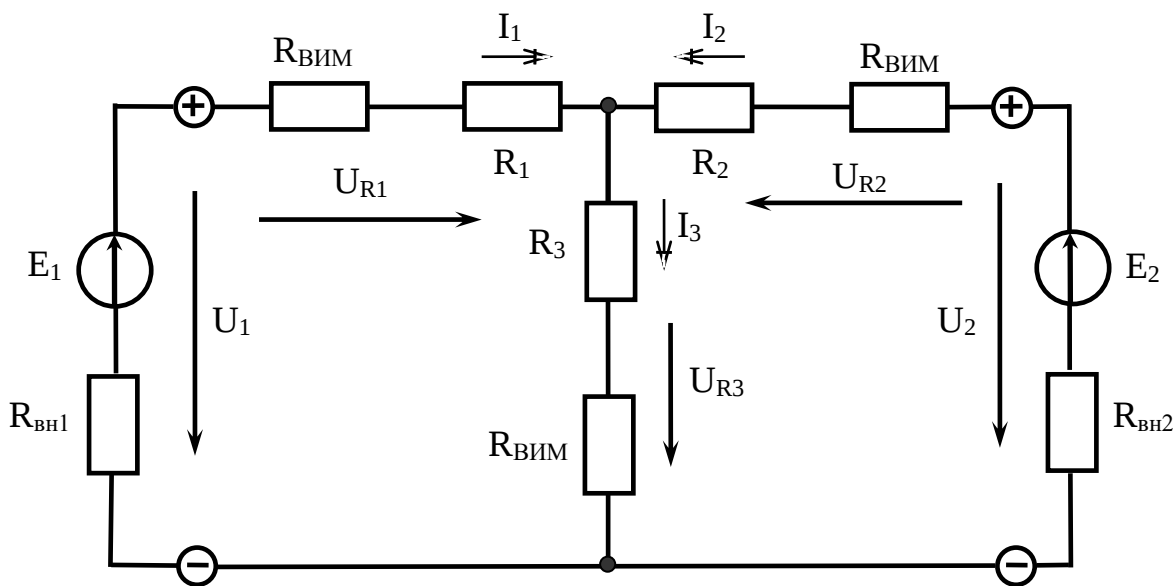


Рис. 10. Схема електричного кола

Беручи до уваги, що обидва джерела напруги будуть віддавати електричну енергію в коло, яке досліджується, (згідно умови), вказати на схемі (рис. 10) дійсні напрямлення струмів. Підключити блок постійних напруг УДЛС-1 до кола, що досліджується, та за допомогою регулятора напруги (ручка панелі блоку) встановити напругу по цифровому приладу E_2 у відповідності з варіантом. Після цього виміряти напруги та струми на всіх ділянках кола. За допомогою цифрового вольтметра експериментально визначення значення опорів резисторів R_1 , R_2 , R_3 . Результати вимірювань та розрахункові значення занести в табл. 2 і 3.

Таблиця 2

Експериментальні значення

E_1 , В	U_1 , В	E_2 , В	U_2 , В	U_{R1} , В	U_{R2} , В	U_{R3} , В	I_1 , мА	I_2 , мА	I_3 , мА

$R_1, \text{ Ом}$	$R_2, \text{ Ом}$	$R_3, \text{ Ом}$

Таблиця 3

Розрахункові значення

$R_1, \text{ Ом}$	$R_2, \text{ Ом}$	$R_3, \text{ Ом}$	$R_{BH1}, \text{ Ом}$	$R_{BH2}, \text{ Ом}$

Дослід 2. Дослідження методу накладання.

Для вихідної схеми, яка представлена на рис. 10, зобразити часткові схеми та вказати на них напрямлення струмів (рис. 11).

Виміряти струми в вітках часткових схем. Отримані дані вимірювань занести в табл. 4.

Таблиця 4

Схема а			Схема б		
$I'_1, \text{ мА}$	$I'_2, \text{ мА}$	$I'_3, \text{ мА}$	$I''_1, \text{ мА}$	$I''_2, \text{ мА}$	$I''_3, \text{ мА}$

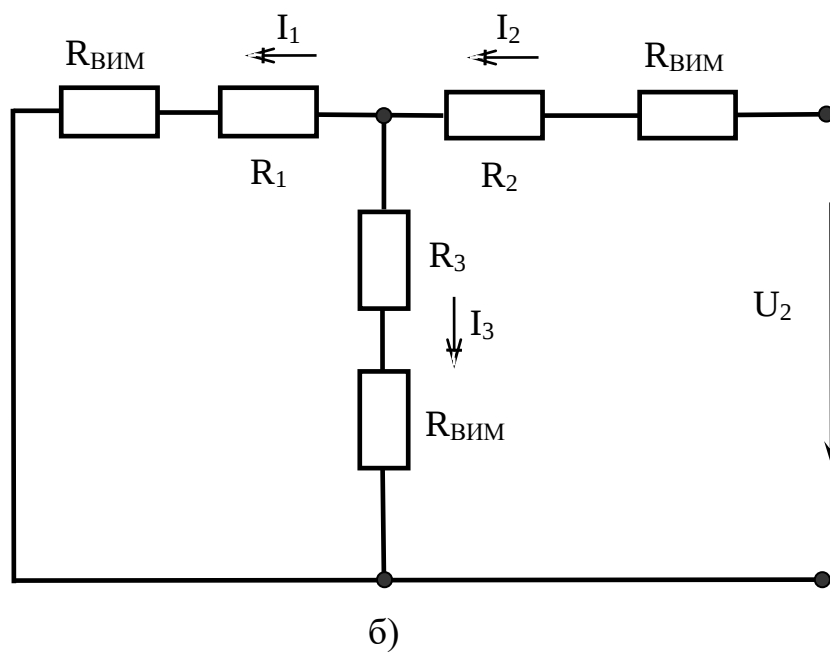
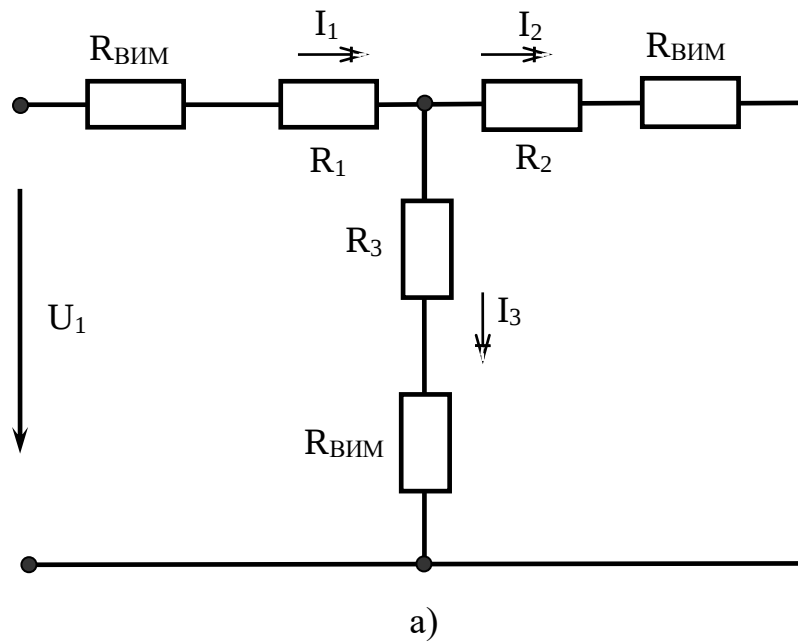


Рис. 11. Схеми електричного кола за методом накладання

Дослід 3. Дослідження методу еквівалентного генератора.

Для схеми, яка представлена на рис. 10, зобразити схеми дослідів холостого ходу та короткого замикання (для вітки з R_2).

Виміряти напругу U_X та струм I_K .

7. Обробка результатів експерименту

7.1. Для схеми на рис. 10 скласти рівняння за першим та другим законом Кірхгофа.

7.2. У відповідності з законом Ома, визначити R_1 , R_2 , R_3 , R_{BH1} , R_{BH2} , результати занести у табл. 3.

$$R_{1,2,3} = \frac{U_{R_{1,2,3}}}{I_{1,2,3}}$$
$$R_{BH1,2} = \frac{E_{1,2} - U_{1,2}}{I_{1,2}}$$

7.3. За експериментальними даними (табл. 2, 3) перевірити виконання законів Кірхгофа.

7.4. У відповідності з законом Ома для ділянки кола розрахувати струми в вітках схеми, що досліджується та перевірити виконання закону Ома шляхом порівняння розрахованих струмів по даним табл. 2, 3.

7.5. За даними табл. 4 розрахувати струми I_1 , I_2 , I_3 вихідної схеми (рис. 10) та порівняти їх з результатами аналітичного розрахунку.

7.6. За даними досліду 3 розрахувати опір R_E та I_3 .

7.7. Застосувавши метод еквівалентного генератора, аналітично визначити струм I_3 та порівняти отримані результати.

8. Висновки

За даними виконаної роботи зробити висновки:

- щодо застосування законів Кірхгофа та закону Ома для аналізу кіл експериментальним шляхом;
- застосування методів накладання та еквівалентного генератора для визначення струмів у вітках кола експериментальним шляхом;
- перевагах та недоліках експериментального способу аналізу електричних кіл.

9. Вказівки щодо оформлення звіту

Звіт повинний містити: номер і назву лабораторної роботи, її ціль, докладний опис вимірювальних приладів та обладнання, які були використані у роботі.

У звіті необхідно привести схеми, таблиці, графіки, основні розрахункові формули і короткі висновки по кожному досліді.

Схеми і графіки повинні бути виконані з дотриманням ЕСКД і ДСТУ.

10. Питання для самоперевірки

1. Що називається електричним колом і з яких елементів воно може складатися?
2. Що називається віткою, вузлом, контуром електричного кола?
3. Сформулюйте та запишіть закон Ома для пасивної й активної ділянок електричного кола.
4. Сформулюйте перший і другий закони Кірхгофа для електричних кіл та наведіть приклади їхнього застосування.
5. Яка кількість рівнянь, які необхідно скласти для розрахунку складного кола постійного струму за законами Кірхгофа. Скільки з них треба скласти за першим, а скільки за другим законами Кірхгофа?
6. Назвіть режими роботи електричного кола та поясніть їхні особливості.
7. Напишіть приклад рівняння балансу потужностей електричного кола постійного струму.
8. Поясніть сутність методу розрахунку розгалужених електричних кіл з одним джерелом ЕРС.
9. У чому суть методу накладання і які практичні аспекти застосування цього методу для розрахунку електричних кіл?
10. У якому випадку для розрахунку кола доцільно застосовувати метод еквівалентного генератора і в чому суть цього методу?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

ДОСЛІДЖЕННЯ НЕРОЗГАЛУЖЕНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА СИНУСОЇДНОГО СТРУМУ

1. Мета роботи

Експериментальне дослідження електричного стану лінійного нерозгалуженого кола синусоїдного струму, оволодіння методом векторних діаграм, розрахунок параметрів електричного кола за результатами вимірювань, дослідження процесів в електричному колі при регулюванні частоти джерела живлення, явище резонансу напруг.

2. Підготовка до роботи

Необхідно вивчити дані методичні вказівки, повторити теоретичні положення по літературі, що рекомендується, підготувати схеми і таблиці для запису результатів вимірювань.

Крім того, потрібно:

знати мету і зміст роботи, порядок її виконання; визначення понять миттєвого значення, амплітуди, фази, початкової фази та частоти синусоїдної функції; визначення понять комплексної амплітуди, комплексного дійсного значення, зображень цих величин на комплексній площині, побудова векторних діаграм; визначення комплексного, повного, активного та реактивного (індуктивного та ємнісного) опорів; трикутник опорів; визначення миттєвої, активної, реактивної та повної потужностей; трикутник потужностей; умова резонансу в послідовному контурі, резонансну частоту, резонансні криві та частотні характеристики;

вміти користуватися вимірювальними приладами (вольтметром, фазометром); застосовувати закон Ома та закони Кірхгофа для аналізу та розрахунку електричних кіл змінного струму; визначати комплексні напруги та струми за заданим миттєвим значенням синусоїдної функції (і навпаки);

розраховувати кут зсуву фаз φ , комплексні опори за заданими параметрами R , L , C у схемі, комплексну, повну, активну та реактивну потужності, резонансну частоту; будувати векторну діаграму методом засічок та резонансні характеристики.

3. Загальні положення

Синусоїдним (гармонічним) називають струм, миттєве значення якого визначається рівнянням

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \psi_i), \quad (1)$$

де I_m – амплітуда струму [А];

$(\omega t + \psi_i)$ – фаза струму [рад];

t – час, с;

ω – кутова частота [рад/с];

ψ_i – початкова фаза [рад];

Частота f [Гц] джерела живлення пов'язана з кутовою частотою ω співвідношенням

$$\omega = 2\pi f, \quad (2)$$

причому

$$f = \frac{1}{T}, \quad (3)$$

де T – період, [с].

Розрахунок електричних кіл синусоїдного струму значно спрощується, якщо тригонометричну форму представлення синусоїдних напруги, струму та інших величин замінити комплексною, тобто використати показову, алгебраїчну або тригонометричну форму запису комплексних величин. Наприклад, діюча напруга та струм у комплексній формі відповідно мають вигляд:

$$\underline{U} = Ue^{j\psi_u} = U' + jU'' = U \cos \psi_u + jU \sin \psi_u, \quad (4)$$

$$\underline{I} = Ie^{j\psi_i} = I' + jI'' = I \cos \psi_i + jI \sin \psi_i,$$

де $U = U_m / \sqrt{2}$, $I = I_m / \sqrt{2}$ – діючі напруга і струм;

U', I' – дійсні частини комплексних величин;

U'', I'' – уявні частини комплексних величин;

e – основа натурального логарифма;

j – уявна одиниця ($j = \sqrt{-1}$).

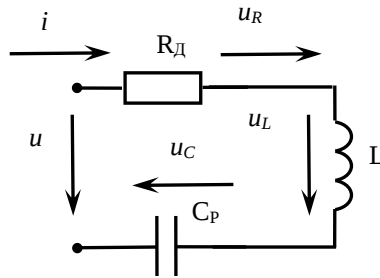


Рис. 1. Схема заміщення електричного кола з послідовним з'єднанням R, L, C

Опір електричного кола з послідовним з'єднанням резистивного R , індуктивного L та ємнісного C елементів (рис. 1), записаний у комплексній формі називають комплексним опором

$$\underline{Z} = R + j(X_L - X_C) = R + jX = Ze^{j\varphi}, \quad (5)$$

де R – активний опір, Ом;

$X_L = \omega L$ – індуктивний опір, Ом;

$X_C = \frac{1}{\omega C}$ – ємнісний опір, Ом;

$X = X_L - X_C$ – реактивний опір, Ом;

$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$ – повний опір кола, Ом;

$\varphi = \arctg \frac{X}{R}$ – зсув фаз між напругою на затискачах джерела живлення та

струмом (див. формулу 8).

Вірогідно, тригонометрична форма запису комплексного опору даного кола має вигляд:

$$\underline{Z} = Z \cos \varphi + jZ \sin \varphi. \quad (6)$$

Враховуючи вище викладене, схему заміщення електричного кола (рис. 1) можна представити у вигляді еквівалентної схеми (рис. 2).

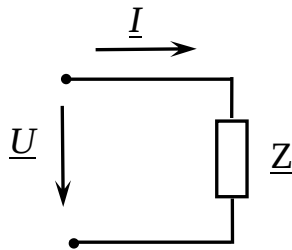


Рис. 2. Еквівалентна схема заміщення електричного кола з послідовним з'єднанням R, L, C

Таким чином, струм у колі

$$\underline{I} = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}} \quad (7)$$

Це співвідношення отримало назву закону Ома у комплексній формі.

Звідси комплексний опір $\underline{Z}$:

$$\underline{Z} = \frac{\underline{U}}{\underline{I}} = \frac{Ue^{j\psi_u}}{Ie^{j\psi_i}} = Ze^{j(\psi_u - \psi_i)} = Ze^{j\varphi}, \quad (8)$$

де $\varphi = (\omega t + \psi_u) - (\omega t + \psi_i) = \psi_u - \psi_i$ – різниця фаз напруги та струму.

Згідно з другим законом Кірхгофа для електричного кола (рис. 1) запишемо рівняння

$$u = u_R + u_L + u_C, \quad (9)$$

або в комплексній формі

$$\underline{U} = \underline{U}_R + \underline{U}_L + \underline{U}_C \quad (10)$$

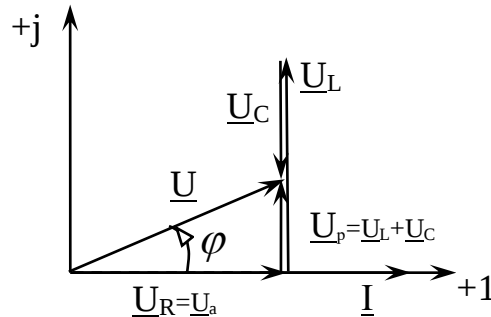


Рис. 3. Векторна діаграма напруг електричного кола з послідовним з'єднанням R, L, C

Цьому рівнянню відповідає топографічна діаграма напруг, побудована на рис. 3 разом з вектором струму $\underline{I}$ (для початкової фази $\psi_i = 0$) у випадку $X_L > X_C$, тобто при $U_L > U_C$, оскільки напруги на елементах кола:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_R &= R\underline{I} = U_R e^{j0^\circ} \\ \underline{U}_L &= jX_L \underline{I} = U_L e^{j90^\circ} \\ \underline{U}_C &= -jX_C \underline{I} = U_C e^{-j90^\circ} \end{aligned} \right\}, \quad (11)$$

що витікає зі співвідношень (5) та (7).

Активна складова напруги джерела живлення $\underline{U}_a$, що співпадає за фазою зі струмом, визначається сумою напруг на усіх резисторах нерозгалуженого кола. У даному випадку

$$\underline{U}_a = \underline{U}_R. \quad (12)$$

Реактивна складова напруги джерела живлення $\underline{U}_p$ перпендикулярна вектору струму (у даному випадку випереджає струм за фазою на 90°) і

визначається векторною сумою напруг на індуктивних та ємнісних елементах. Зокрема, у нашому прикладі

$$\underline{U}_p = \underline{U}_L + \underline{U}_C. \quad (13)$$

Отже, реактивна напруга дорівнює різниці на індуктивних та ємнісних елементах (див. рис. 3)

$$U_p = U_L - U_C. \quad (14)$$

Відповідно, зсув фаз φ можна також визначити з трикутника, сторонами якого є напруги U , U_a та U_p :

$$\varphi = \arctg \frac{U_p}{U_a} = \arcsin \frac{U_p}{U}. \quad (15)$$

Трикутник, сторонами якого є вказані напруги називають *трикутником напруг* (рис. 4 а).

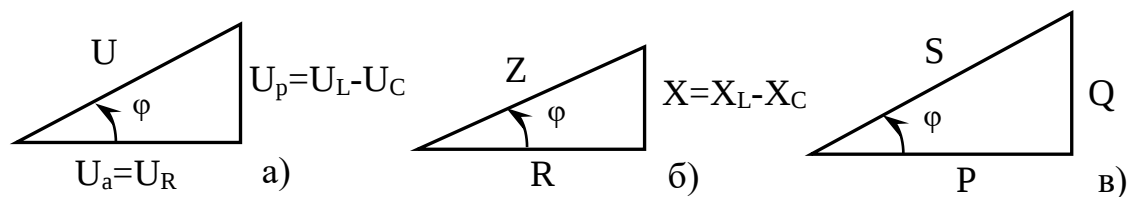


Рис. 4. Трикутники електричних величин:
а – напруг, б – опорів, в – потужностей

Якщо поділити сторони трикутника напруг на струм I , то отримаємо трикутник опорів (рис. 4 б) зі сторонами

$$R = \frac{U_a}{I}; \quad X = \frac{U_p}{I}; \quad Z = \frac{U}{I}. \quad (16)$$

Якщо помножити сторони трикутника напруг U на струм I або сторони трикутника опорів на квадрат струму I^2 , то отримаємо трикутник потужностей (рис. 4 в) зі сторонами

$$\left. \begin{aligned} P &= U_a I = RI^2, \\ Q &= U_p I = XI^2, \\ S &= UI = ZI^2. \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

де P – активна потужність кола, Вт;

Q – реактивна потужність кола, вар.;

S – повна потужність кола, В·А.

Комплексна потужність $\underline{S}$ кола:

$$\underline{S} = \underline{U} \underline{I}^* = \underline{Z} \underline{I} \underline{I}^* = \underline{Z} I^2 = S e^{j\varphi} = P + jQ, \quad (18)$$

$$\text{де } \varphi = \arctg \frac{Q}{P} = \arccos \frac{P}{S}.$$

В залежності від співвідношення індуктивного та ємнісного опорів коло з послідовним з'єднанням R, L, C може мати один з трьох режимів роботи:

$X > 0, 0^\circ < \varphi < 90^\circ$ (активно-індуктивний характер кола);

$X < 0, -90^\circ < \varphi < 0^\circ$ (активно-ємнісний характер кола);

$X = 0, \varphi = 0^\circ$ (чисто активний характер кола).

Останній режим, при якому струм у нерозгалуженому колі співпадає за фазою з напругою на затискачах кола, тобто напругою джерела живлення, отримав назву резонансу напруг, оскільки для нього характерне співвідношення $U_L = U_C$ (напруги на індуктивному та ємнісному елементах однакові).

Реалізувати режим резонансу напруг можна шляхом відповідної зміни параметрів реактивних елементів L і C (при $f = \text{const}$) або плавного регулювання частоти джерела живлення (при незмінних L та C).

Оскільки при резонансі напруг реактивний опір:

$$X_P = X_{LP} - X_{CP} = \omega_P L - \frac{1}{\omega_P C} = 2\pi f_P L - \frac{1}{2\pi f_P C} = 0, \quad (19)$$

то кутова резонансна частота

$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad (20)$$

резонансна частота

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (21)$$

За цими ж формулами визначається відповідно кутова частота ω_0 та частота f_0 власних коливань електричного кола з послідовним з'єднанням R , L і C . Отже, для досягнення резонансу у будь-якому нерозгалуженому колі з котушкою індуктивності та конденсатором ємнісним елементами при синусоїдній напрузі джерела живлення частота останнього повинна бути близькою до частоти власних коливань цього кола.

Властивості нерозгалуженого кола з елементами R , L , C оцінюють за допомогою резонансної та фазочастотної характеристик. Резонансна характеристика – це залежність діючого струму I від частоти f джерела живлення при постійній діючій напрузі цього джерела

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(2\pi fL - \frac{1}{2\pi fC}\right)^2}}. \quad (22)$$

Фазочастотна характеристика – це залежність зсуву фаз φ між напругою та струмом від частоти f при постійній діючій напрузі джерела живлення.

Графіки цих характеристик наведені на рис. 5. При розрахунку графіків прийнято: $U=10$ В; $R=60$ Ом; $L=5$ мГн; $C=0,5$ мкФ.

При збільшенні частоти на інтервалі $0 < f < f_p$ мають місце співвідношення $X_L < X_C$; $-90^\circ \leq \varphi < 0^\circ$ (коло має активно-ємнісний характер) і діючий струм збільшується від 0 до $I < I_p$, досягаючи при частоті резонансу $f = f_p$ значення I_p , яке згідно з формулою (22) має максимальне значення:

$$I_p = \frac{U}{R} = I_{\max}, \quad (23)$$

звідки виходить, що при резонансі напруга на резисторі:

$$U_R = U. \quad (24)$$

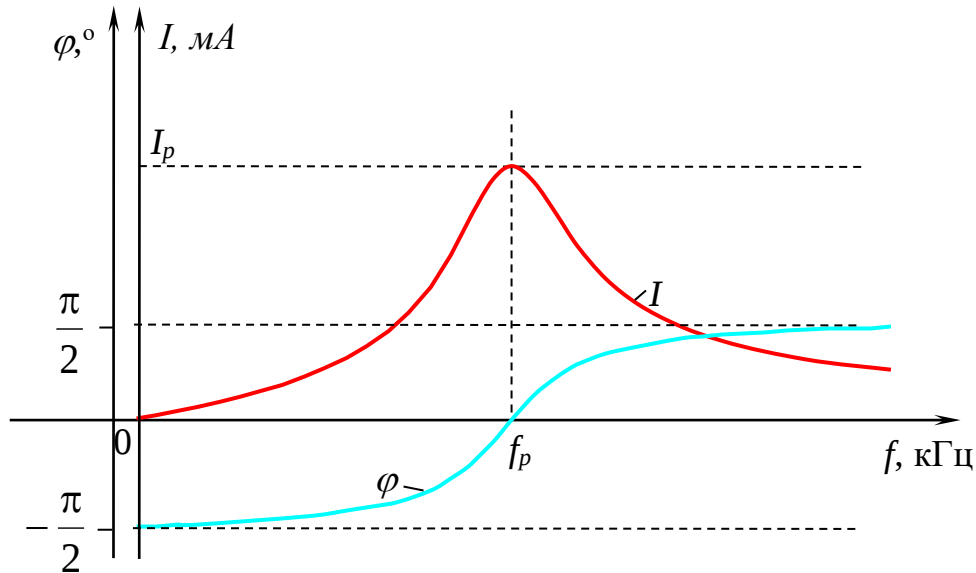


Рис. 5. Резонансна та фазочастотна характеристики послідовного контуру

При подальшому підвищенні частоти $f > f_p$ струм зменшується, а коло має активно-індуктивний характер ($X_L > X_C, \varphi > 0^\circ$). Теоретично при частоті $f \rightarrow \infty$, струм $I \rightarrow 0$, а кут $\varphi \rightarrow 90^\circ$.

Якщо при резонансі $X_L = X_C > R$, то згідно з формулами (11) і (24) $U_L = U_C > U_R = U$, тобто напруга на кожному з реактивних елементів більше напруги джерела живлення. Таким чином, у даному випадку має місце явище «підсилення» напруги, яке широко використовується у техніці. Ступінь підсилення напруги характеризують за допомогою добротності Q контуру з R, L, C елементами:

$$Q = \frac{\omega_p L}{R} = \frac{\sqrt{\frac{L}{C}}}{R} = \frac{\rho}{R}, \quad (25)$$

де $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$ – хвильовий опір.

4. Прилади та обладнання

Використовуються блок змінного живлення учбово-дослідницького стенда (УДЛС-1) з регульованою частотою та напругою, універсальні цифрові вольтметри В7-22А (2 одиниці), фазометр Ф2-16, комплект вимірювальних резисторів ($R = 1 \text{ Ом}$), комплект набірних елементів, перемичок та проводів для з'єднання.

5. Міри безпеки

До виконання лабораторної роботи допускаються студенти, які пройшли інструктаж з техніки безпеки (відповідний запис в журналі з техніки безпеки).

При виконанні роботи необхідно дотримуватися наступних правил техніки безпеки:

- не доторкатися до труб водопроводу і опалювальної системи;
- не включати без дозволу вимірювальні прилади в мережу;
- не витягати блоки стенда;
- не залишати без нагляду підключені стенд і прилади;
- негайно відключати живлення при виникненні ушкоджень;
- виключати живлення блоків стенда і вимірювальних приладів по закінченню роботи за стендом.

Напруги, які застосовуються для живлення електричного кола, небезпеки для життя людини не представляють.

Всі джерела живлення забезпечені захистом від перенавантажень і короткого замикання. Однак слід враховувати, що тривалий вплив струму на елементі електричного кола, що досліджується, може привести до їх непридатності. Тому, вмикати блок живлення в мережу рекомендується тільки

на той час, який необхідно для отримання показів з вимірювальних приладів і запису їх в лабораторний звіт.

Після закінчення роботи всі вимірювальні прилади і блок живлення стенду повинні бути вимкнені.

6. Порядок проведення роботи

Дослід 1. Визначення параметрів нерозгалуженого кола змінного струму за допомогою векторної діаграми.

В цьому досліді, схема заміщення якого наведена на рис. 6, за допомогою вольтметрів вимірюють напруги U_{R1} , U_C , U_K на елементах і струм I у колі, а фазометром вимірюють φ – кут зсуву фаз між напругою джерела живлення і струмом.

Згідно зі схемою, наведеною на рис. 6, зібрати електричне коло на стенді УДЛС-1, використавши його блок з джерелом змінного (синусоїдного) струму та пасивні елементи, параметри яких наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Вихідні дані дослідів 1

$R_{\text{ВІМ}}$, Ом	R_L , Ом	C , мкФ	L_K , мГн	U , В	f , кГц
1	51	0,5	5	10	5

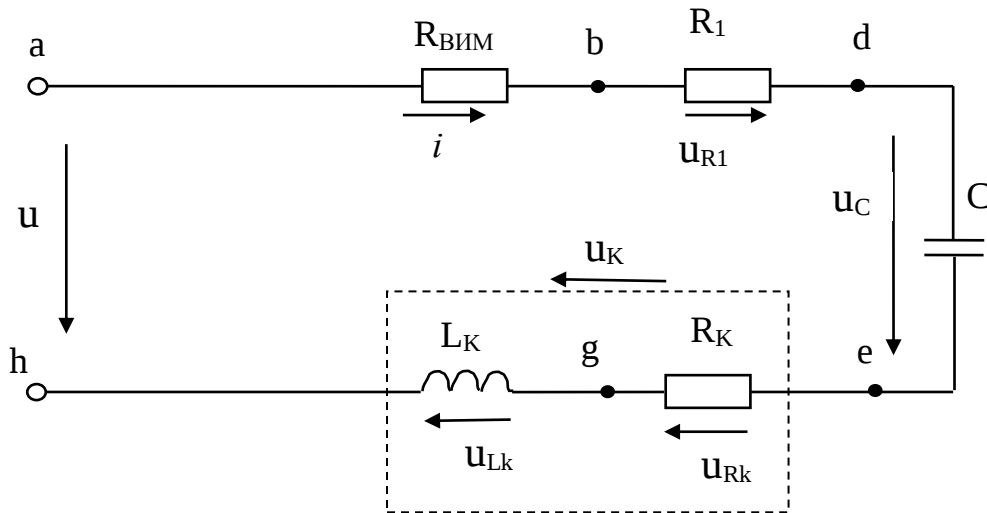


Рис. 6. Схема заміщення нерозгалуженого електричного кола синусоїдного струму

Необхідно мати на увазі, що реальна котушка індуктивності характеризується як індуктивністю L_K , так і активним опором R_K . Для вимірювання напруги на резисторі R_1 , конденсаторі C та котушці індуктивності (L_K , R_K) затискачі вольтметра сполучають відповідно з парами точок: b,d ; d,e ; e,h . Струм у колі визначають опосередкованим методом, за допомогою закону Ома, для чого необхідно виміряти напругу на вимірювальному резисторі $R_{\text{ВИМ}} = 1 \text{ Ом}$ (між парою точок a,b).

Для вимірювання різниці фаз φ напруги джерела живлення та струму необхідно корпусні затискачі (клеми) фазометра (позначені значками $\perp$ або $\equiv$) з'єднати з точкою „а” кола (див. рис. 6), затискач опорного входу фазометра з точкою „d”, а затискач сигнального входу – з точкою „h”.

Після ввімкнення джерела живлення встановити згідно з табл. 1 відповідну напругу U (за допомогою регулятора на блоці цього джерела) та його частоту f (за допомогою перемикача частоти “дискретно” та регулятора “плавно”, який необхідно встановити у праве крайнє положення).

Увімкнути фазометр. Виконати вимірювання напруг на елементах та струму у колі і занести їх значення до табл. 2.

Таблиця 2

Експериментальні значення досліду 1

$U_{R1}, \text{В}$	$U_C, \text{В}$	$U_K, \text{В}$	$I, \text{А}$	$\varphi, \text{град.}$

Перед вимірюванням зсуву фаз φ необхідно виконати наступне. Встановити перемикач режимів фазометра в положення “Уст.0” і за допомогою цього регулятора встановити стрілку фазометра на “0”. Для перевірки калібровки фазометра перемикач режимів встановити в положення “калібр.” (при цьому перемикач “випереджає” – “відстає” необхідно встановити в положення “випереджає”). Якщо стрілка фазометра не знаходиться на поділці 100, то необхідно регулятором “калібр.” за допомогою викрутки встановити стрілку на вказану поділку. Знову перевірити нуль фазометра.

Для вимірювання кута φ перемикач режимів фазометра необхідно встановити в положення 100°. Якщо стрілка відхиляється в ліве крайнє положення (менше “0”), то необхідно перемикач “випереджає” – “відстає” перевести в положення “відстає”. Занести в табл. 2 значення кута φ з врахуванням знаку: якщо перемикач встановлений в положення “випереджає”, то $\varphi > 0$, якщо в положення “відстає”, то $\varphi < 0$.

Дослід 2. Дослідження явища резонансу напруг. Побудова резонансної та фазочастотної характеристик послідовного контуру.

Для схеми з досліду 1 (рис. 6) визначити значення струму та кута зсуву фаз при значенні частоти від 1 кГц до 8 кГц, підтримуючи напругу на вході кола незмінною ($U = 10 \text{ В}$). Після встановлення кожного значення частоти необхідно перевіряти діючу напругу на затискачах джерела живлення, підтримуючи її незмінне значення.

Результати вимірювань занести до табл. 3.

Таблиця 3

Результати вимірювань досліду 2

f , кГц	1	2	3	4	5	6	7	8
I , мА								
φ , град.								

7. Обробка результатів експерименту

За даними досліду 1 (табл. 2) побудувати топографічну діаграму напруг нерозгалуженого кола методом засічок (рис. 7). Для цього необхідно прийняти масштаб напруги m_u , В/см (значення масштабу напруги треба підібрати так, щоб топографічна діаграма займала площу, не меншу ніж пів сторінки аркуша).

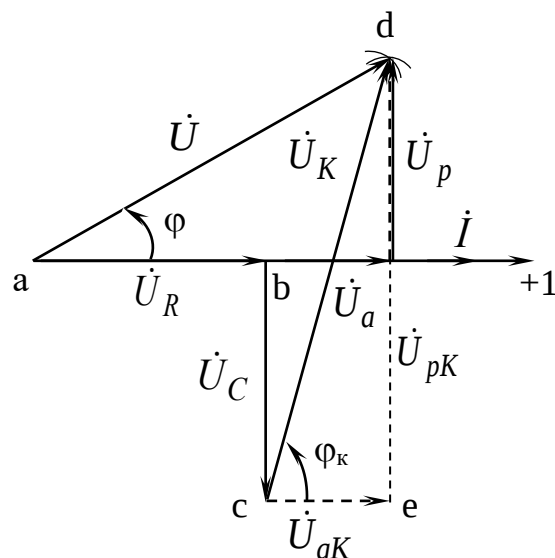


Рис. 7. Побудова векторної діаграми методом засічок

Приймаючи початкову фазу струму $\psi_i = 0$, відкласти вектор струму із точки a по осі $+1$. Враховуючи, що вектор $\underline{U}_{R1}$ співпадає за фазою зі струмом, відкласти його з тієї ж точки в напрямленні вектора $\underline{I}$ (відрізок ab).

Враховуючи, що напруга на ємності $\underline{U}_C$ суто реактивна та відстає від струму на 90° , з точки b відкласти вектор $\underline{U}_C$ (відрізок bc). Враховуючи, що $\underline{U}_K$ випереджає струм на кут $0 < \varphi_k < 90^\circ$, засічками з точок a та c , що дорівнюють величинам U та U_K , знайти положення точки d , після чого побудувати вектори $\underline{U}$ та $\underline{U}_K$.

З діаграми визначити активну $\underline{U}_{aK}$ (ce) та реактивну $\underline{U}_{pK}$ (ed) складові напруг U_K та побудувати трикутник напруг котушки індуктивності. Розрахувати параметри котушки Z_K , R_K , X_K та L_K за формулами:

$$Z_K = \frac{U_K}{I}, \quad R_K = \frac{U_{aK}}{I},$$

$$X_K = \frac{U_{pK}}{I}, \quad L_K = \frac{X_K}{2\pi f}$$

та побудувати трикутник опорів котушки. Результати занести у табл. 4.

Таблиця 4

Результати розрахунку за дослідом 1

R_1 , Ом	X_C , Ом	C , мкФ	R_K , Ом	X_K , Ом	Z_K , Ом	L_K , мГн	R , Ом	X , Ом	Z , Ом	P , Вт	Q , вар	S , В·А	φ , град

Визначити з діаграми активну $U_a = U_{R1} + U_{aK}$ та реактивну $U_p = U_L - U_C$ складові напруги на вході та побудувати трикутник напруги всього кола. Використавши вираз (16), розрахувати та занести в табл. 4 величини активного R , реактивного X та повного Z опору кола.

У відповідності з виразом (17) розрахувати та занести в табл. 4 величини активної P , реактивної Q та повної S потужностей. Використовуючи вирази

$U_C = X_C I$ та $X_C = \frac{1}{2\pi fC}$, визначити та занести в табл. 4 величину ємності C .

Зсув фаз φ можна розрахувати за однією з формул (5), (18) або (15).

Результати розрахунків занести в табл. 4.

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= \frac{U_{R1}}{I}; X_C = \frac{U_C}{I}; C = \frac{1}{2\pi fX_C}; \\ R_K &= \frac{U_{Rk}}{I}; X_K = \frac{U_{Lk}}{I}; Z_K = \frac{U_K}{I}; L_K = \frac{X_K}{2\pi f}. \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

З урахуванням числових значень відповідних величин записати вирази:

- для миттєвого струму та миттєвої напруги на вході кола (початкову фазу струму прийняти рівній нулю);
- для діючих струму та напруги на вході у комплексній формі;
- для комплексної потужності;

За даними досліду 2 в одній системі координат побудувати графіки резонансної $I(f)$ та фазочастотної $\varphi(f)$ характеристик. За допомогою цих графіків визначити приблизне експериментальне значення резонансної частоти f_p . За формулою (21) за номінальними параметрами елементів розрахувати резонансну частоту f_p нерозгалуженого кола.

Розрахувати значення хвильового опору ρ та добротності Q коливального контуру (нерозгалуженого кола з R, L, C елементами) за співвідношенням (25).

8. Висновки

За результатами виконаної роботи сформулювати висновки:

- щодо впливу характеру кола на кут зсуву фаз між напругою на вході та струмом;
- щодо незастосовності другого закону Кірхгофа для дійсних значень напруг;

- щодо точності визначення параметрів елементів за експериментальними даними.

9. Вказівки щодо оформлення звіту

Звіт про виконану роботу оформляє кожен студент в зошиті у клітину або на листах формату А4. В ньому необхідно відобразити наступний матеріал: назву роботи, мету її виконання; перелік устаткування та приладів; схему досліджуваного електричного кола; таблиці з експериментальними даними та результатами розрахунків; розрахункові формули та необхідні числові розрахунки; графіки резонансних характеристик; висновки з роботи.

Схеми, таблиці, графіки слід виконувати акуратно, з використанням інструментів для креслення у відповідності з вимогами ЄСКД.

Студент, який виконав роботу і правильно оформив звіт, після співбесіди з викладачем отримує відмітку про захист даної лабораторної роботи на звіті та в лабораторному журналі.

10. Питання для самоперевірки

1. Що називається миттєвим значенням електричної величини, яка гармонічно змінюється у часі? Якими параметрами ця величина характеризується?

2. Як розраховуються миттєві значення струму і напруги у виконаній роботі?

3. Як виразити індуктивний X_L і ємнісний X_C опори через параметри L , C і f ? Чому дорівнюють повний, реактивний і активний опори послідовного контуру? Як визначається комплексний опір?

4. Який порядок побудови векторної діаграми послідовного контуру? Як з векторної діаграми одержати трикутники напруг, опорів і потужностей?

5. Як визначається комплексна потужність кола?

6. При яким співвідношенні параметрів L і C виникає резонанс напруг? Навести величини цих параметрів за даними роботи.

7. Розкрити фізичний зміст понять характеристичного опору ρ і добротності Q для послідовного контуру. Як ці величини розраховувалися у виконаній роботі?

8. Що розуміють під резонансною і фазочастотною характеристиками послідовного контуру?

9. Як визначити резонансну частоту за резонансними кривими? Проілюструвати це на прикладі експериментальних характеристик.

10. Яке практичне використання явища резонансу?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИФАЗНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА ПРИ З'ЄДНАННІ ФАЗ ПРИЙМАЧА «ЗІРКОЮ»

1. Мета роботи

Експериментальне дослідження різних режимів роботи трифазних кіл з активним характером навантаження при з'єднанні приймачів електричної енергії «зіркою», вивчення властивостей трипровідних і чотирипровідних трифазних кіл, оволодіння методом побудови топографічних векторних діаграм.

2. Підготовка до роботи

Для успішного виконання лабораторної роботи студент повинен проробити матеріал конспекту з теми «Трифазні електричні кола», повторити теоретичні положення по літературі, що рекомендується, ознайомитись з матеріалом, який приведено в методичних вказівках для проведення лабораторної роботи, підготувати схеми і таблиці для запису результатів вимірювань.

Крім того необхідно:

знати мету і зміст роботи, порядок її виконання, основні теоретичні положення стосовно режимів роботи приймачів з'єднаних «зіркою», одиниці вимірювання електричних величин;

вміти користуватись вимірювальними приладами, будувати векторні топографічні діаграми струмів і напруг, подавати результати вимірювань і розрахунків в необхідній формі.

3. Загальні положення

Більша частина електричної енергії виробляється, передається, розподіляється і споживається трифазними електричними системами.

Головними складовими її є: джерело трифазної напруги (як правило, синхронний генератор), трифазний споживач (трифазний асинхронний та синхронний електродвигуни та інше навантаження), лінія передачі, яка підключає споживача до джерела живлення. Лінія передачі електроенергії може бути трипровідна та чотирипровідна. У чотирипровідному трифазному електричному колі обмотки фаз трифазного генератора (трансформатора) з'єднують «зіркою». Поряд із трьома лінійними провідниками, що приєднують до початків A , B , C кожної з обмоток генератора, є четвертий провідник. Називають його нейтральним і приєднують до вузла N джерела, що зветься нейтральною точкою генератора, у якій з'єднані кінці X , Y та Z кожної з його фаз.

Чотирипровідне трифазне коло. У такому колі до початків кожної фази трифазного приймача a , b , c , повний опір яких Z_a , Z_b , Z_c , підводять лінійні, провідники A , B , C , а до вузлової точки приймача " n " – четвертий нейтральний провідник. Останній з'єднує нейтральні точки джерела N та приймача n (рис. 1).

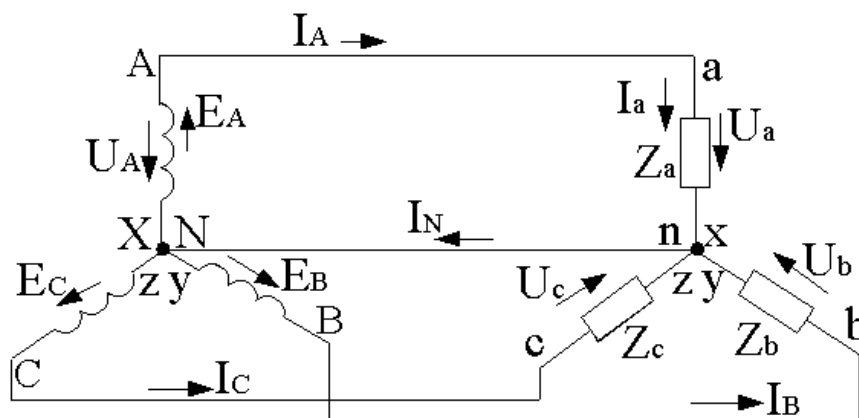


Рис. 1. Чотирипровідне трифазне коло
зі з'єднанням фаз приймача та джерела «зіркою»

Якщо знехтувати опором лінійних і нейтрального провідників, то відповідні напруги на фазі приймача та джерела живлення будуть однаковими:

$$U_A = U_a; U_B = U_b; U_C = U_c. \quad (1)$$

Лінійна напруга, тобто напруга між двома будь-якими початками фаз обмоток джерела (будь-якими лінійними проводами) та будь-якими двома початками фаз приймача в цьому випадку є також однаковими:

$$U_{AB} = U_{ab}; U_{BC} = U_{bc}; U_{CA} = U_{ca}. \quad (2)$$

Струм фази приймача (фазний струм) і струм відповідного лінійного провідника, як видно з рис. 1, збігаються. Тобто, при такому з'єднанні можна записати $I_L = I_\phi$. Фазні струми приймача можна визначити за законом Ома. В комплексній формі його запису:

$$\underline{I}_a = \frac{\underline{U}_a}{\underline{Z}_a}; \underline{I}_b = \frac{\underline{U}_b}{\underline{Z}_b}; \underline{I}_c = \frac{\underline{U}_c}{\underline{Z}_c}, \quad (3)$$

де $\underline{Z}_a, \underline{Z}_b, \underline{Z}_c$ - комплексні опори фаз a, b, c трифазного приймача;

$\underline{U}_a, \underline{U}_b, \underline{U}_c$ - комплексні напруги на фазах приймача.

Струм нейтрального провідника I_N знаходять як результат векторної суми фазних струмів

$$\underline{I}_N = \underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c. \quad (4)$$

Враховуючи те, що при з'єднанні «зіркою» фазний і лінійний струм це один і той же струм, можна записати рівняння (4) і в такому вигляді

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

Графічно комплексні напруги фаз приймача зображають відповідними векторами на топографічній діаграмі напруг (рис. 2 а, б). Останні збігаються з топографічною діаграмою напруг на відповідних фазах джерела, якщо знехтувати опором лінійних провідників, що підводять електричну енергію від джерела до приймача. Векторні діаграми, які зображені нижче по тексту, приведені для активного характеру опорів фаз приймача.

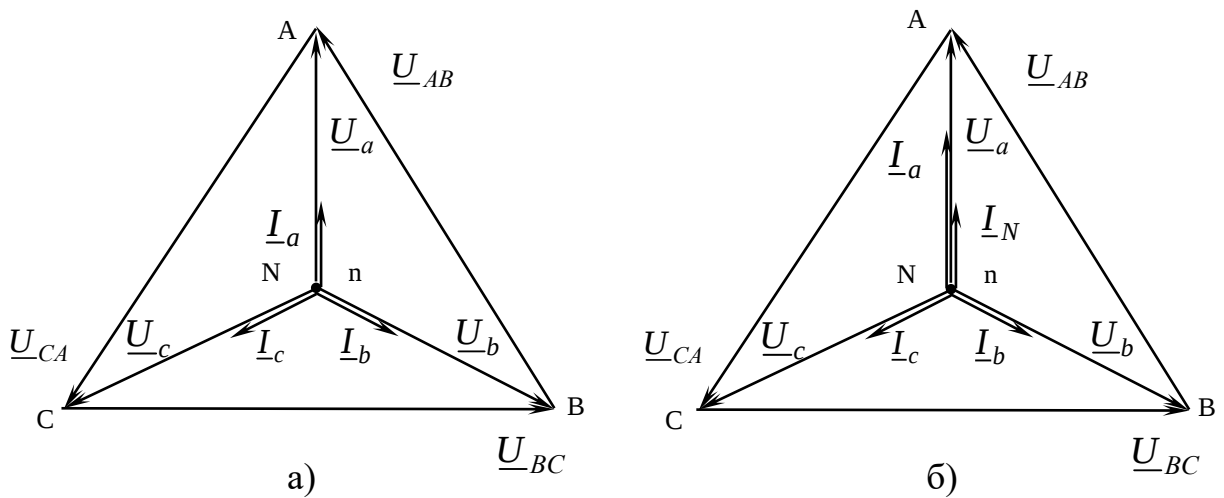


Рис. 2. Векторні діаграми: симетричний приймач в чотири - та трипровідному колі (а); несиметричний приймач в чотиривпровідному колі (б)

Трипровідне трифазне коло. Якщо нейтральні точки джерела N та приймача n не з'єднані між собою (штепсельна вставка в нейтральному проводі на рис. 5 розімкнена), то в загальному випадку між цими точками виникає напруга U_{nN} . (рис. 3 а) Її можна аналітично визначити, застосовуючи метод напруги між двома вузлами.

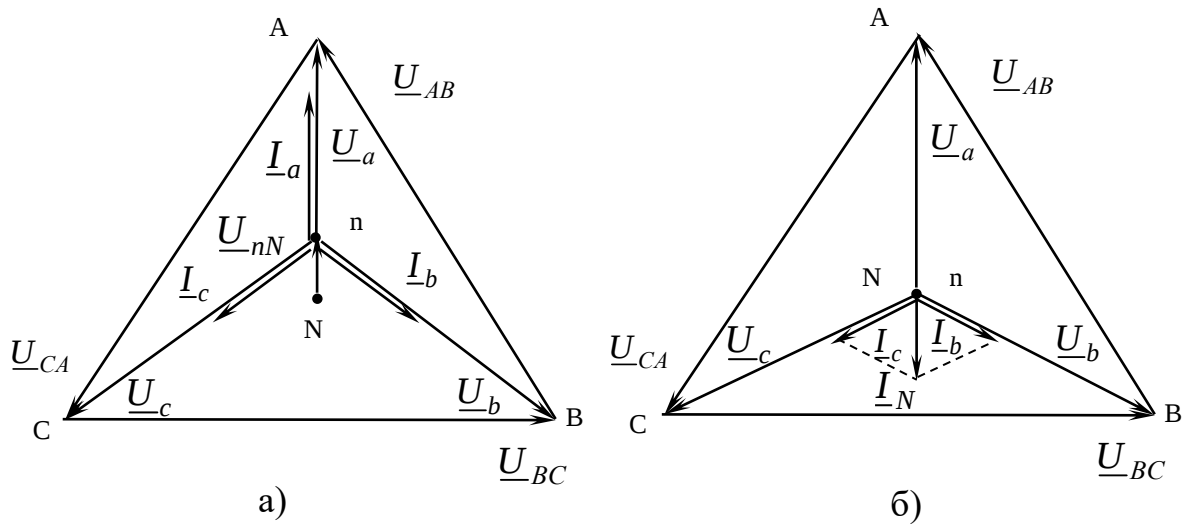


Рис. 3. Векторні діаграми: несиметричний приймач в трипровідному колі (а); обрив фази a в чотиривпровідному колі (б)

$$\underline{U}_{nN} = \frac{\underline{Y}_a \cdot \underline{U}_A + \underline{Y}_b \cdot \underline{U}_B + \underline{Y}_c \cdot \underline{U}_C}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c}, \quad (5)$$

де $\underline{Y}_a$, $\underline{Y}_b$, $\underline{Y}_c$ - комплексні провідності фаз приймача. Комплексна провідність – величина, обернена комплексному опору фази: $\underline{Y} = 1/\underline{Z}$. Напругу $\underline{U}_{nN}$ називають напругою зсуву (зміщення) нейтралі. При симетричному навантаженні, тобто при рівності комплексних опорів фаз приймача ($\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c$) напруга зсуву нейтралі $\underline{U}_{nN} = 0$ (рис. 2 а). При несиметричному навантаженні, коли $\underline{Z}_a \neq \underline{Z}_b \neq \underline{Z}_c$, з'являється напруга зсуву нейтралі і фазні напруги приймача можна визначити за формулами

$$\underline{U}_a = \underline{U}_A - \underline{U}_{nN}; \quad \underline{U}_b = \underline{U}_B - \underline{U}_{nN}; \quad \underline{U}_c = \underline{U}_C - \underline{U}_{nN}, \quad (6)$$

Струми фаз приймача визначаються за законом Ома (3). При аналізі стану трифазного кола можна використовувати графоаналітичний метод, що дозволяє суттєво скоротити об'єм розрахунків.

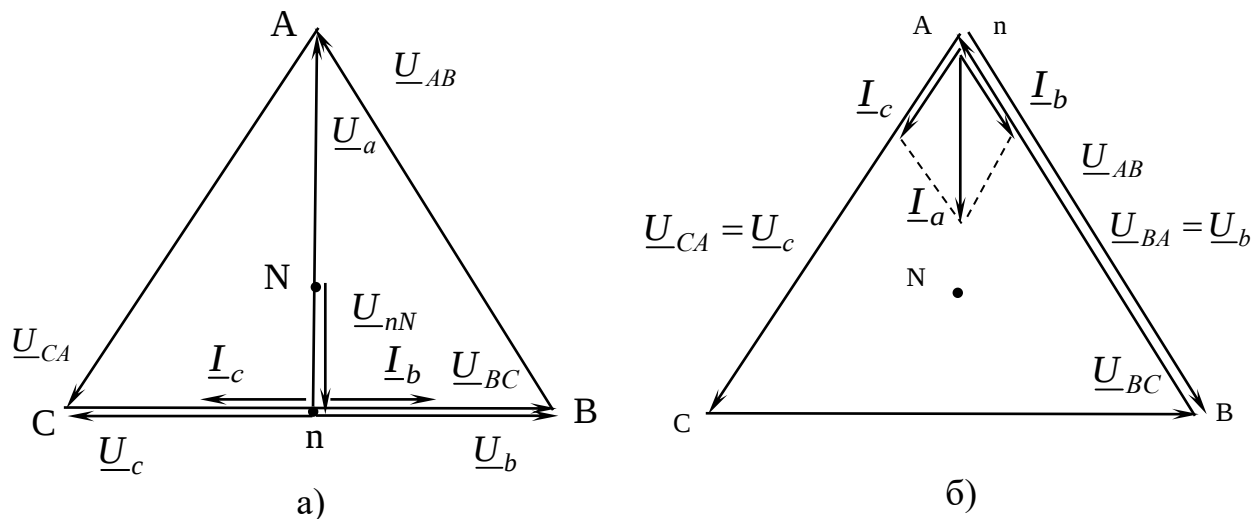


Рис. 4. Векторні діаграми: обрив фази a в трипровідному колі (а); коротке замкнення фази a в трипровідному колі (б)

При виникненні обриву у фазі a приймача, тобто при $Z_a = \infty$, дві фази, які залишилися в роботі, фази b і c , утворюють послідовне з'єднання, на яке діє лінійна напруга U_{BC} . Нейтральна точка приймача n припадає на середину вектора $\underline{U}_{BC}$ (рис. 4 а).

При короткому замиканні фази a , тобто при $Z_a = 0$, нейтральна точка приймача n зміщується в точку a . В цьому випадку на фазу b приймача діє лінійна напруга $\underline{U}_{BA} = -\underline{U}_{AB} = \underline{U}_B$. На фазу c діє лінійна напруга $\underline{U}_{CA} = \underline{U}_C$ (рис. 4 б).

Якщо в яку-небудь із фаз приймача включені резистори, у яких відбувається незворотне перетворення енергії електричного струму в інший вид енергії (тепло), то приймач виявляє активний характер: споживає активну

потужність P . Активна потужність трифазного приймача P дорівнює сумі активних потужностей спожитих кожною фазою:

$$P = P_a + P_b + P_c \quad (7)$$

Потужність, яка споживається кожною фазою можна визначити через її фазні величини

$$P_\phi = U_\phi I_\phi \cos \varphi_\phi \quad (8)$$

При симетричному навантаженні потужності всіх фаз однакові. Отже потужність трифазного приймача

$$P = 3P_\phi = 3U_\phi I_\phi \cos \varphi_\phi = \sqrt{3}U_L I_L \cos \varphi_\phi = 3I_\phi^2 R_\phi \quad (9)$$

4. Прилади та обладнання

Використовуються блок трифазного живлення учбово-дослідницького стенда (УДЛС-1), універсальні цифрові вольтметри В7-22А (2 одиниці), комплект вимірювальних резисторів ($R = 1$ Ом), комплект набірних елементів, перемичок та проводів для з'єднання.

5. Міри безпеки

До виконання лабораторної роботи допускаються студенти, які пройшли інструктаж з техніки безпеки (відповідний запис в журналі з техніки безпеки).

При виконанні роботи необхідно дотримуватися наступних правил техніки безпеки:

- не доторкатися до труб водопроводу і опалювальної системи;
- не включати без дозволу вимірювальні прилади в мережу;
- не витягати блоки стенда;
- не залишати без нагляду підключені стенд і прилади;
- негайно відключати живлення при виникненні ушкоджень;
- виключати живлення блоків стенда і вимірювальних приладів по закінченню роботи за стендом.

Напруги, які застосовуються для живлення електричного кола, небезпеки для життя людини не представляють.

Всі джерела живлення забезпечені захистом від перенавантажень і короткого замикання. Однак слід враховувати, що тривалий вплив струму на елементі електричного кола, що досліджується, може привести до їх непридатності. Тому, вмикати блок живлення в мережу рекомендується тільки на той час, який необхідно для отримання показів з вимірювальних приладів і запису їх в лабораторний звіт.

Після закінчення роботи всі вимірювальні прилади і блок живлення стенду повинні бути вимкнені.

6. Порядок проведення роботи

1. Зберіть трифазне електричне коло активного характеру за схемою рис. 5. Коло складають на монтажному полі стенда УДЛС-1, використовуючи з'єднувальні провідники, штепсельні перемички і високоточні вимірювальні резистори номіналом 1,0 Ом. Трифазний симетричний чи несиметричний приймач створюють із трьох однакових (або різних) однофазних приймачів. У якості останніх використовують метало-плівкові резистори МЛТ із номінальною потужністю розсіювання 2 Вт і опором 300 Ом (3 шт для симетричного приймача) й одного - опором 150 Ом (при створенні несиметричного). Живлення кола здійснюють від трифазного джерела. Останній розташований у лівій нижній частині стенда. Усі три фази (початок і кінець кожної) джерела виведені окремо. Отже, можна регулювати напругу кожної фази незалежно від іншої. Фази *A*, *B*, *C* джерела з'єднують за схемою «зірка» з відгалуженням нейтрального провідника від вузлової точки *N*. З цією метою кінці кожної фази джерела живлення з'єднують разом у вузол *N* за допомогою спеціального провідника, у якого з його вузлової точки виходять чотири кінця. Щоб виконати вимірювання струмів в лінійні провідники послідовно вмикають одноомні вимірювальні резистори $R_{\text{вим}}$ (рис. 5). Напруга $U_{\text{вим}}$ на затискачах останніх чисельно дорівнює струму I у відповідній фазі

приймача. Значення напруги U_ϕ кожної фази джерела встановлюють рівною відповідно завданню на робочому місці, а значить лінійна напруга U_L буде більшою за фазну в $\sqrt{3}$ раз.

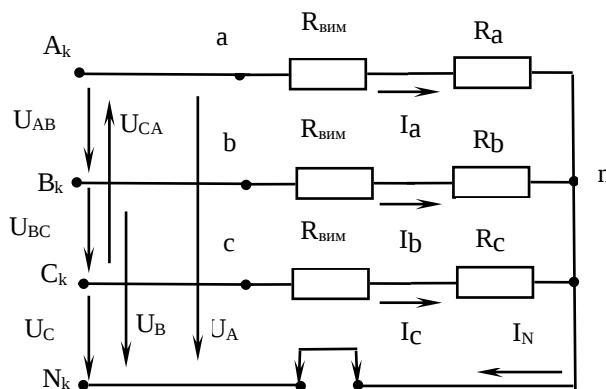


Рис. 5. Схема трифазного кола при з'єднанні споживачів «зіркою»

2. Провести вимірювання величин, які вказані в табл. 1, для різних режимів роботи при активному характері навантаження.

а) Симетричний режим. При симетричному режимі в кожену фазу приймача включаються однакові резистори величиною 300 Ом, тобто в цьому випадку $\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c = R = 300$ Ом.

б) Несиметричний режим. При несиметричному режимі в фазу a включається резистор величиною 150 Ом, а в фазах b і c залишаються включеними резистори по 300 Ом. Таким чином, в цьому випадку $\underline{Z}_a = 0,5R = 150$ Ом, $\underline{Z}_b = \underline{Z}_c = R = 300$ Ом.

в) Обрив фази. При обриві кола навантаження фази a струм у фазі відсутній, тобто, $\underline{Z}_a = \infty$, $I_a = 0$. В двох інших фазах опори залишаються незмінними $\underline{Z}_b = \underline{Z}_c = R = 300$ Ом.

г) Коротке замикання фази. При короткому замиканні фази a в трипровідному колі $\underline{Z}_a = 0$, $\underline{I}_a = \underline{I}_b + \underline{I}_c$.

Таблиця 1

Режими роботи		Результати вимірювань											
		U_{ab} В	U_{bc} В	U_{ca} В	U_a В	U_b В	U_c В	U_{nN} В	I_a мА	I_b мА	I_c мА	I_N мА	P Вт
Симетр.	4-и провідний							-					
	3-и провідний											-	
Несим.	4-и провідний							-					
	3-и провідний											-	
Обрив фази a 4-и пров.								-	0				
Обрив фази a 3-и пров.									0			-	
Коротке замик. фази a													

Вказані режими роботи досліджуються для схеми з нейтральним проводом та без нього. Наприклад, встановлюється симетричне навантаження для схеми з нейтральним проводом і проводяться вимірювання напруги і струмів, а потім для того ж режиму розмикається нейтральний провід шляхом видалення штепсельного перемикача (рис. 5), і вимірювання повторюються.

Розрахунок активної потужності трифазного приймача необхідно виконати за допомогою формул (7)...(9), відповідно до його режимів роботи.

7. Обробка результатів експерименту

1. За числовими даними таблиці побудувати в масштабі векторні діаграми струмів і топографічні векторні діаграми напруг для усіх режимів роботи трифазного приймача, які досліджувались в лабораторній роботі.

2. Перевірити виконання першого закону Кірхгофа для три- та чотирипровідних трифазних систем при різних режимах роботи. Перевірку виконати за допомогою векторних діаграм.

3. Перевірити співвідношення між фазними і лінійними величинами струмів і напруг для симетричного режиму.

4. Зробити висновок про роль нейтрального проводу при різних режимах роботи, а також зробити висновок, в яких випадках слід застосовувати три- а в яких чотирипровідні системи живлення трифазних приймачів.

8. Висновки

За результатами роботи необхідно зробити висновки: щодо впливу нейтрального проводу, напруги у фазах навантаження; щодо впливу величину і характеру опорів у фазах приймача на його фазні напруги.

9. Вказівки щодо оформлення звіту

Звіт про виконану роботу оформляє кожен студент в зошиті у клітинку або на листах формату А4. В ньому необхідно відобразити наступний матеріал: назву роботи, мету її виконання; перелік устаткування та приладів; схему досліджуваного електричного кола; таблиці з експериментальними даними та результатами розрахунків; розрахункові формули та необхідні числові розрахунки; графіки резонансних характеристик; висновки з роботи.

Схеми, таблиці, графіки слід виконувати акуратно, з використанням інструментів для креслення у відповідності з вимогами ЄСКД.

Студент, який виконав роботу і правильно оформив звіт, після співбесіди з викладачем отримує відмітку про захист даної лабораторної роботи на звіті та в лабораторному журналі.

10. Питання для самоперевірки

1. Які співвідношення між лінійними і фазними струмами та напругами при симетричному навантаженні і з'єднанні споживачів «зіркою»?
2. Яке призначення нейтрального проводу в чотирипровідній мережі?
3. Що буде при обриві нейтрального проводу при симетричному навантаженні?
4. Що буде при обриві нейтрального проводу при несиметричному навантаженні?

5. Що таке зміщення нейтралі, в яких випадках він виникає і як його розрахувати?

6. Запишіть формули визначення активної потужності трифазного кола і поясніть особливості їх застосування в залежності від режимів роботи навантаження.

7. Сформулюйте перший закон Кірхгофа стосовно до трифазних кіл і проілюструйте його виконання на прикладах лабораторної роботи.

8. Як можна вмикати однофазні та трифазні приймачі у трифазну мережу?

9. Як зміняться струми фаз b і c при короткому замиканні фази a симетричного приймача, якщо нейтральний провідник відсутній?

10. Поясніть чому в нейтральний провід не вмикають запобіжники та автоматичні вимикачі?

Правила виконання лабораторних робіт

За час чотиригодинного заняття студенти повинні виконати лабораторну роботу, оформити звіт і здати залік з даної роботи. Зазначена програма може бути реалізована тільки в тому випадку, якщо студенти відповідним чином будуть підготовлені до заняття. Тому спочатку проводиться допуск до лабораторної роботи. Студенти, що не одержали допуск, усуваються від виконання даної роботи. Перед початком циклу лабораторних робіт навчальна група поділяється на бригади з 2-3 чоловік, за кожною з яких на час навчального семестру закріплюється стенд УДЛС-1 під порядковим номером від 1 до 10, комплект елементів за тим же номером і набір вимірювальних приладів. Перехід студентів з однієї бригади в іншу протягом семестру, зміна стенда, комплекту елементів або приладів, закріплених за стендом, категорично заборонені.

До кожного лабораторного заняття студенти повинні готуватися завчасно, попередньо ознайомившись з описом роботи, повторивши відповідний теоретичний матеріал за конспектом лекцій і за рекомендованою літературою і частково заготовивши звіт з лабораторної роботи. Заготовка звіту повинна містити схеми дослідів, таблиці для занесення експериментальних і розрахункових даних, формули, необхідні для розрахунків, і міліметровий папір, на якому нанесені координатні осі для побудови графіків. Студенти, що не мають заготовок звіту чи не підготовлені теоретично, до роботи не допускаються.

Перед виконанням роботи кожна бригада студентів повинна одержати у викладача набір елементів до свого стенда і перевірити відповідно до опису на кришці шухляди комплектність набору. У випадку невідповідності складу набору опису, необхідно сповістити про це викладачу. По закінченні роботи на стенді всі елементи необхідно вставити у відповідні гнізда, провідники

акуратно укласти в правий відсік шухляди і, переконавшись у комплектності, здати набір викладачеві.

Студенти зобов'язані дбайливо ставитися до лабораторних стендів і вимірювальних приладів. Категорично забороняється робити позначки і написи на блоках стенда, набірному полі і вимірювальних приладах. Забороняється без необхідності перемикати тумблера, крутити ручки стенда УДЛС-1 і вимірювальних приладів. Під час роботи студенти несуть повну відповідальність за збереженість і справність устаткування.

Заняття повинні проводитися у творчій діловій атмосфері при дотриманні порядку і тиші в лабораторії.

Під час перерви слід припинити роботу на стенді, виключити його блоки, вимірювальні прилади і провітрити приміщення. Староста групи поряд із викладачем несе відповідальність за підтримку дисципліни й порядку при проведенні робіт у лабораторії.

Експериментальні дані заносяться в чернетку і пред'являються викладачеві наприкінці кожного досліду. У випадку одержання невірних результатів досліди повторюються. Після перевірки правильності результатів усіх дослідів викладач робить відмітку про виконання роботи, а студенти приступають до оформлення й здачі звіту.

У випадку, якщо студент не встиг оформити звіт, він повинний представити його на наступному занятті для здачі викладачеві при співбесіді. Якщо звіт оформлений правильно і викладач переконується в розумінні студентом сутності роботи, методики одержання результатів і вірності інтерпретації отриманих даних, робота зараховується. Пропущені, незакінчені чи невірно виконані роботи відпрацьовуються в дні, погоджені з викладачем.

Правила безпеки в електротехнічній лабораторії

До виконання лабораторних робіт допускаються студенти, що пройшли інструктаж із правил техніки безпеки з наступним записом про це в спеціальному журналі. На передню панель стенда УДЛС-1 виведені напруги, що не становлять небезпеки для життя людини. Усі джерела живлення мають захист від перевантажень. Тому зборку, перевірку й включення електричних кіл студенти проводять самостійно.

Однак слід враховувати, що все устаткування лабораторії, включаючи стенди і вимірювальні прилади, підключено до мережі живлення 380/220 В. У зв'язку з цим слід дотримуватися наступних правил безпеки.

1. При роботі зі стендами забороняється:

- доторкатися до труб водопроводу й опалювальної системи;
- самостійно включати вимірювальні прилади у мережу;
- відключати заземлення вимірювальних приладів;
- класти на стенди сумки, портфелі, одяг і т.п.;
- виймати блоки стенда;
- ремонтувати блоки стенда і вимірювальні прилади;
- самостійно змінювати запобіжники;
- залишати без нагляду включений стенд і вимірювальні прилади.

2. У випадку ушкодження блоків стенда чи вимірювальних приладів слід негайно відключити їх від мережі живлення і сповістити про це керівника.

3. По закінченні роботи на стенді необхідно виключити живлення всіх активних блоків стенда і вимірювальних приладів.

4. Якщо в лабораторії стався нещасний випадок, слід негайно відключити живлення лабораторії, надати потерпілому першу допомогу і повідомити про те, що трапилося, керівника.

Правила оформлення звітів з лабораторних робіт

Звіт виконується або на спеціальному бланку, або на аркушах папера формату А4 (210 x 297). Для звіту можна використовувати розгорнуті аркуші учнівських зошитів, укорочені до встановленого формату. На титульному листі вказується: назва академії, кафедри, номер та найменування лабораторної роботи, прізвище та група студента, прізвища студентів, разом із якими була виконана робота, номер стенда, дата виконання та прізвище керівника. Аркуші звіту заповнюються тільки з однієї сторони й акуратно зшиваються або склеюються.

Звіт повинен містити: ціль роботи, перелік використовуваних приладів і блоків, опис дослідів і висновки за результатами роботи. Опис дослідів рекомендується проводити в такому порядку:

- назва (ціль) дослідів;
- схема дослідів;
- таблиці результатів вимірів і обчислень;
- обробка експериментальних даних і необхідні розрахунки;
- графіки, діаграми, рисунки;
- висновки з дослідів.

При написанні звіту слід залишати поля: ліворуч - 25 мм, праворуч - 10 мм, зверху й знизу - по 20 мм. Звіт повинен бути написаний чітко й акуратно.

Математичні символи дозволяється застосовувати тільки разом із цифровими значеннями чи літерними позначеннями.

Наприклад, $\sin 45^\circ$, $\lg n$, $\arctg \frac{b}{a}$ і т.п.

Розмірність величин вказується тільки після числових значень, у заголовках таблиць і на графіках. У тексті розмірність величин дається без скорочень прописом.

При записі експериментальних даних і в процесі розрахунків слід користатися не тільки основними, але і додатковими одиницями вимірів для того, щоб числові значення використовуваних величин знаходилися в межах від 0,01 до 1000. Нижче наведені приклади правильного і неправильного запису.

Правильно	Неправильно
2 мГн	0,002 Гн
0,13 мА	0,00013 А
0,05 мкФ	50000 пФ
$7 \cdot 10^{-3}$ В (7 мВ)	0,007 В

При обробці дослідних даних і проведенні розрахунків слід чітко уявляти точність обмірюваних, вихідних даних і параметрів елементів для того, щоб число значущих цифр визначалося межами похибок величин, що входять у розрахунки. Наприклад, $U = 13,6\text{В}$, $I = 20,5\text{мА}$, тоді розрахунковий опір буде

$$R = \frac{13,6}{20,5 \cdot 10^{-3}} = 663,41 \text{ Ом}.$$

На підставі вихідних даних необхідно округлити: $R = 663 \text{ Ом}$.

Запис результатів розрахунку слід робити так, щоб усі значущі цифри були вірні і лише остання цифра може мати похибку, що не перевершує одну-дві одиниці того розряду, у якому вона знаходиться. При цьому слід користатися наступним правилом. Цифра якого-небудь розряду наближеного числа вважається вірною, якщо це число має абсолютну похибку не більше половини одиниці цього розряду; якщо ж похибка більше половини якого-небудь розряду, то цифра цього розряду й цифри наступних розрядів вважаються сумнівними. Якщо не зазначена похибка числа, то вважається, що цифри цього числа вірні, а гранична абсолютна похибка його дорівнює половині одиниці останнього розряду. Наприклад, абсолютна похибка числа 27,33 мА складає $\pm 0,005 \text{ мА}$, 27,3 мА - $\pm 0,05 \text{ мА}$, 27 мА - $\pm 0,5 \text{ мА}$.

Схеми повинні виконуватися олівцем за допомогою креслярських приладь і відповідно до вимоги ЄСКД.

Графіки повинні виконуватися на міліметровому папері, розмір якого відповідає формату А4. Координатні осі без стрілок повинні мати масштабні шкали, при цьому число одиниць виміру в 1 см повинно виражатися числами $(1,2 \text{ чи } 5) \cdot 10^n$ де n - будь-яке ціле число. Позначення величини, що відкладається за віссю абсцис, указується над віссю, а її розмірність - під віссю абсцис. Позначення величини, що відкладається за віссю ординат, указується праворуч, а її розмірність - ліворуч від осі ординат.

Експериментальні точки наносяться на графіки наступними умовними знаками: $\cdot$, $\times$, Δ , $\square$, $\bigcirc$ і т.п. Необхідно пам'ятати, що всі експериментальні точки мають цілком визначені похибки вимірів, у зв'язку з чим при побудові графіків слід робити графічне усереднення. При цьому лінії графіків можуть і не проходити через експериментальні точки. Якщо на одному графіку необхідно розмістити кілька кривих, що представляють функції одного аргументу, то будується ряд осей ординат, на яких указуються відповідні масштаби.

Таблиці повинні бути накреслені під лінійку за зразками, які наведені в інструкції.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Електротехніка та енергетичне обладнання : конспект лекцій для здобув. вищ. освіти ОС «бакалавр» денної та заоч. форм здобут. освіти. електротехн. та енерг. спец. / Г.М. Мосієнко, С.В. Петров, А.І. Тарасенко ; Укр. інж.-пед. акад. – Харків : УІПА, 2022. – 108 с.
2. Електротехніка. Комплексні моделі змісту навчання : навч.-метод. посіб. для здобувачів вищої освіти ОС «бакалавр» денної та заоч. форм здобуття освіти машинобудівних спеціальностей / Г.М. Мосієнко; Укр. інж-пед. акад. – Харків : Друкарня Мадрид, 2020. – 96 с.
3. Електротехніка: навч.-метод. посібник для студ. денної та заоч. форм навч. інж. та інж.-пед. спец. Ч. 1: Електричні кола/ А. І. Тарасенко, Г. М. Мосієнко, С. В. Петров; Укр. інж.-пед. акад., Каф. фізики, теоретичної і загальної електротехніки. - Харків: УІПА, 2015. – 136 с.
4. Електротехніка : конспект лекцій для студ. денної та заоч. форм навч. неелектротехн. спец./ А. І. Тарасенко, Г. М. Мосієнко, С. В. Петров; Укр. інж.-пед. акад., Каф. фізики, теоретичної і загальної електротехніки. - Х.: [б. в.], 2013. – 107 с.
5. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка: підручник для вищих навч. закладів неелектротехн. спец./ М. С. Будіщев; Науково-метод. центр вищої освіти, Укр. академія друкарства. - Львів: Афіша, 2001. - 424 с
6. Електротехніка: навч. посібник для неелектротехн. спец./ В. Г. Данько [та ін.]; Харків. політехн. ін-т. - Київ: НМК ВО, 1990. - 263 с.
7. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка: підручник для вищих навч. закладів/ В. І. Мілих, О. О. Шавьолкін; за ред. проф. В. І. Мілих. - Київ: Каравела, 2007. - 688 с.

Електронне навчальне видання комбінованого використання
Можна використовувати в локальному та мережному режимі

Тарасенко Анатолій Іванович
Мосієнко Ганна Миколаївна

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

Методичні вказівки
до проведення лабораторних занять для здобувачів вищої
освіти першого (бакалаврського) рівня за спеціальностями
174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»,
175 «Інформаційно-вимірювальні технології»

В авторській редакції

Підписано до розміщення 28.02.2025. Гарнітура Times New Roman.
Ум. друк. арк. 1,22. Обсяг 1,584 Мб. Зам. № 66/25.

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,
61022, м. Харків, майдан Свободи, 4.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3367 від 13.01.2009
Видавництво ХНУ імені В. Н. Каразіна