

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ДВНЗ «ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»**  
**КАФЕДРА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**  
**ДО ВИКОНАННЯ КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ**  
*з дисципліни «Основи електротехніки та теорії електроприводу» для*  
*студентів технічних спеціальностей освітнього ступеня «Бакалавр»*  
*денної та заочної форм навчання*

ЛУЦЬК – 2023

УДК 621.3.01

Методичні вказівки до контрольної роботи з дисципліни «Основи електротехніки та теорії електроприводу» для студентів технічних спеціальностей освітнього ступеня «Бакалавр» денної та заочної форм навчання [Електронний ресурс] / укладачі: О. Ю. Колларов, Д. О. Остренко. – Луцьк : ДонНТУ, 2023. – 33 с.

Укладачі: Колларов О. Ю. – зав. каф. електричної інженерії, канд. техн. наук, доцент; Остренко Д. О.

Рецензент: Власенко М. М. – доц. каф. вищої математики і фізики, канд. техн. наук, доцент.

Відповідальний за випуск: Колларов О. Ю. – зав. каф. електричної інженерії, канд. техн. наук, доцент.

Затверджено навчально–методичним відділом ДонНТУ,  
протокол №    від

Розглянуто на засіданні кафедри електричної інженерії,  
протокол №    від

© ДонНТУ, 2023 р.

## ЗМІСТ

|                                          |    |
|------------------------------------------|----|
| ВСТУП .....                              | 4  |
| 1 ЛІНІЙНІ КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ .....   | 5  |
| 1.1 Основні теоретичні положення .....   | 5  |
| 1.2 Приклад розв'язання задачі .....     | 10 |
| 1.3 Завдання та вихідні дані .....       | 15 |
| 2 ЛІНІЙНІ КОЛА СИНУСОЇДНОГО СТРУМУ ..... | 16 |
| 2.1 Основні теоретичні положення .....   | 16 |
| 2.2 Приклад розв'язання задачі .....     | 21 |
| 2.3 Завдання та вихідні дані .....       | 24 |
| 3 ТРИФАЗНІ КОЛА .....                    | 25 |
| 3.1 Основні теоретичні положення .....   | 25 |
| 3.2 Приклад розв'язання задачі .....     | 26 |
| 3.3 Завдання та вихідні дані .....       | 28 |
| 4 ОФОРМЛЕННЯ .....                       | 29 |
| ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ .....           | 33 |

## ВСТУП

Основи електротехніки та теорії електроприводу – це технічна дисципліна, пов'язана з вивченням теорії електрики та електромагнетизму, що є базовим курсом технічних спеціальностей вузів.

Електроенергетика - це галузь енергетики, що включає в себе виробництво, передачу, збут та споживання електричної енергії. Електроенергетика є найважливішою галуззю енергетики та основою функціонування економіки та життєзабезпечення, що пояснюється такими перевагами електроенергії перед енергією інших видів, як відносна легкість передачі на великі відстані, розподілу між споживачами, а також перетворення в інші види енергії (механічну, теплову, хімічну, світлову та ін.). Відмінною рисою електричної енергії є практична одночасність її генерування та споживання, так як електричний струм поширюється по мережах з швидкістю, близькою до швидкості світла.

Методичні вказівки до виконання контрольної роботи з дисципліни «Основи електротехніки та теорії електроприводу» розраховані, насамперед, для студентів широкого кола технічних спеціальностей освітнього ступеня «Бакалавр» денної та заочної форм навчання складаються з трьох частин:

- 1) розрахунок лінійних кіл постійного струму;
- 2) розрахунок лінійних кіл змінного синусоїдного струму;
- 3) розрахунок трифазних кіл змінного синусоїдного струму.

Основною метою даних методичних вказівок є апробація студентами теоретичного та практичного матеріалу, набутого при опануванні дисципліни.

Для закріплення теоретичного матеріалу і напрацювання практичних навичок розрахунку лінійних електричних кіл постійного і змінного струмів, в рамках даної контрольної роботи, бажано користуватись допоміжною літературою [1-4].

# 1 ЛІНІЙНІ КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

## 1.1 Основні теоретичні положення

Приступаючи до вивчення лінійних кіл постійного струму, перш за все необхідно ознайомитися із основними поняттями електричного кола, електричного струму, напруги, електрорушійної сили (ЕРС), потужності.

Електричне коло – це сукупність пристроїв і об'єктів, що утворюють шляхи для електричного струму, електромагнітні процеси в яких можуть бути описані за допомогою понять електрорушійної сили, струму та напруги. Складові частини електричного кола можна розділити на дві групи: джерела електричної енергії та приймачі (навантаження). Вони з'єднуються між собою за допомогою з'єднувальних проводів.

Джерелами електричної енергії є різні пристрої, в яких відбувається перетворення хімічної, теплової, механічної та інших видів енергії в електричну. Приймачі електричної енергії – це елементи електричного кола, в яких відбувається перетворення електричної енергії в інші види енергії (теплову, механічну, хімічну).

Активні кола – це кола, які мають джерела енергії, а пасивні – ті, що не мають їх. Графічне зображення електричного кола за допомогою умовних позначень називається схемою. Схема простого електричного кола подана на рис. 1.1.

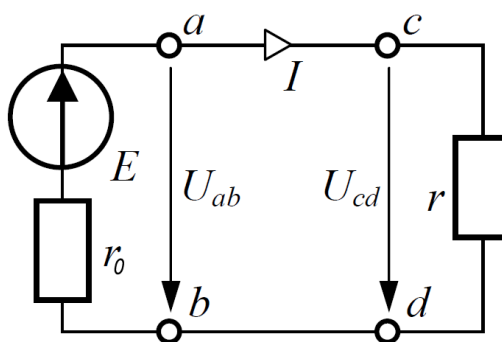


Рисунок 1.1 – Схема простого електричного кола

Джерела електричної енергії характеризуються ЕРС, яка може бути визначена як робота сторонніх сил, що витрачається при переміщенні одиничного позитивного заряду усередині джерела від затискача з меншим потенціалом до затискача з більшим потенціалом. ЕРС – скалярна величина, напрям якої збігається з напрямом переміщення позитивних зарядів усередині джерела, тобто з напрямом струму.

Електричний струм провідності або струм переносу – це упорядкований рух вільних носіїв електричного заряду. Такими носіями є: у металах – негативно заряджені частинки – електрони, в електролітах та іонізованих газах – як позитивно, так і негативно заряджені іони, у напівпровідниках електрони і дірки. Кількісно струм оцінюється зарядом, що проходить крізь поперечний переріз провідника за одиницю часу, тобто:

$$i = \frac{dq}{dt}, \text{ A}$$

У міжнародній системі одиниць (СІ) заряд виражають в кулонах (Кл), час – в секундах (с), струм – в амперах (А).

При переміщенні одиничного позитивного заряду із точки  $a$  у точку  $b$  силами електричного поля виконується робота, що дорівнює різниці потенціалів цих точок. Потенціал довільної точки електричного поля визначається як робота, що виконується силами електричного поля по переміщенню одиничного позитивного заряду із даної точки у точку з нульовим потенціалом. За точку з нульовим потенціалом зазвичай береться точка, віддалена в нескінченність або на поверхні землі.

Різниця потенціалів точок «а» і «b» називається напругою між цими точками:

$$U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b, \text{ В}$$

У системі одиниць СІ напругу, як і ЕРС, виражають у вольтах (В). Напруга являє собою скалярну величину, якій надають певний напрям. Зазвичай під позитивним напрямом напруги розуміють напрям від точки кола із більшим потенціалом до точки із меншим потенціалом.

Протікання струму у внутрішньому опорі джерела та в опорі навантаження супроводжується перетворенням електричної енергії у теплову. Швидкість перетворення енергії характеризується потужністю:

$$P = \frac{dW}{dt}, \text{ Вт}$$

де  $W$  – енергія, Дж.

Потужність джерела енергії:

$$P_{\text{дж}} = E \cdot I = P_{\text{п}} + \Delta P, \text{ Вт}$$

де  $P_{\text{п}} = U \cdot I = I^2 r$  – потужність приймача енергії, Вт;

$\Delta P = I^2 r_0$  - потужність втрат всередині джерела, Вт.

Згідно із другим правилом Кірхгофа отримуємо:

$$E = U_{\text{аб}} + I \cdot r_0 \Rightarrow U_{\text{аб}} = E - I \cdot r_0, \text{ В}$$

Напруга на затискачах джерела відрізняється від ЕРС на величину внутрішнього падіння напруги. При зміні опору приймача змінюється струм кола, а отже, і напруга на затискачах джерела.

Джерело енергії, внутрішній опір якого дорівнює нулю ( $r_0 = 0$ ) називають ідеальним джерелом ЕРС, а ідеальне джерело енергії з нескінченно

великим внутрішнім опором ( $r_0 = \infty$ ) – джерелом струму. На рис. 1.2 наведено умовні позначення та зовнішні характеристики ідеальних джерел.

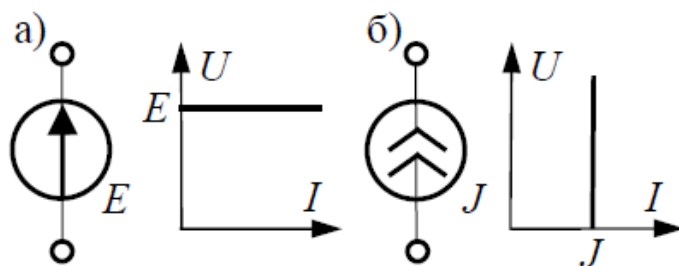


Рисунок 1.2 – Позначення ЕРС (а) та ДС (б) на схемі

Для розрахунку простих кіл (або резистивних ділянок кіл) застосовують узагальнений закон Ома:

$$I = \frac{U + \sum E_i}{\sum r_k}, \text{ A}$$

де  $U$  – спрямована по струму напруга на ділянці кола, В;

$\sum r_k$  – сумарний резистивний опір ділянки, Ом;

$\sum E_i$  – алгебрична сума ЕРС (В) у вітці із шуканим струмом, причому зі знаком «плюс» беруть ЕРС, напрям яких збігається з напрямом струму.

При розрахунку режиму роботи електричного кола, як правило, потрібно визначити струми, напруги та потужності на всіх його ділянках при заданих значеннях ЕРС джерел і опорів кола. Такий розрахунок базується на застосуванні законів Кірхгофа, для запису яких введемо поняття вітки, вузла і контуру.

Віткою електричного кола називається ділянка, яка складається з одного або декількох елементів, розміщених між двома вузлами та через які тече однаковий струм. Таке з'єднання елементів називається послідовним (рис. 1.3).

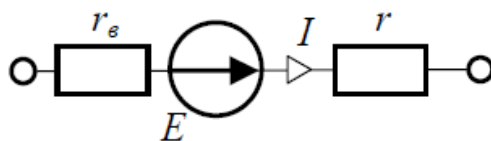


Рисунок 1.3 – Послідовне з'єднання елементів

Точка електричного кола називається вузлом, якщо в ній з'єднуються не менш, як три вітки (рис. 1.4, вузол А).

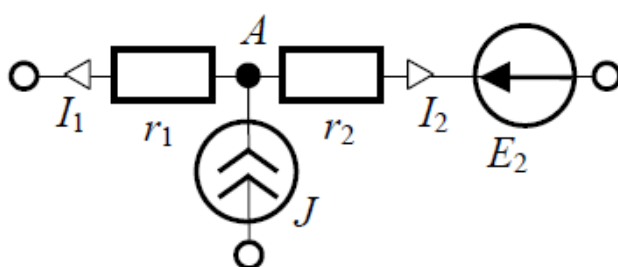


Рисунок 1.4 – Паралельне з'єднання елементів

Контуром електричного кола є замкнений шлях по вітках електричного кола, причому кожна вітка і кожен вузол на шляху зустрічаються лише одного разу.

Для складання рівнянь за правилами Кірхгофа необхідно задатися додатними напрямками струмів у кожній вітці. У відповідності до першого правила Кірхгофа алгебрична сума струмів у вузлі дорівнює нулю:

$$\sum_q I_q = 0$$

Струми, що напрямлені до вузла, рекомендується брати із знаком «мінус», а ті, що від вузла, – із «плюсом».

Згідно другого правила Кірхгофа у будь-якому контурі електричного кола алгебрична сума напруг на окремих ділянках дорівнює алгебричній сумі ЕРС, що діють у цьому ж контурі:

$$\sum_q I_q R_q = \sum_p E_p, \text{ В}$$

Напрямок обходу контуру вибирається довільно; ЕРС і напруги, напрямки яких збігаються з обходом контуру, враховуються у рівнянні із знаком «плюс», а направлені проти обходу – із знаком «мінус». При складанні рівнянь слід дотримуватися правила, щоб в кожному наступному контурі була хоч б одна вітка, що не увійшла до попередніх контурів. Такі контури називають незалежними. Друге правило Кірхгофа не має сенсу застосовувати до контурів, що містять джерела струму.

Універсальною перевіркою розрахунку струмів є складання балансу потужностей (БП), який є результатом закону збереження енергії і декларує, що потужність всіх джерел дорівнює потужності всіх приймачів.

## 1.2 Приклад розв'язання задачі

Скористувавшись правилами Кірхгофа розрахувати струми в схемі рис. 1.5а, при наступних вихідних даних:  $J_1 = 10 \text{ А}$ ;  $E_2 = 100 \text{ В}$ ;  $E_6 = 300 \text{ В}$ ;  $r_3 = r_4 = r_5 = r_6 = 20 \text{ Ом}$ .

На електричній схемі вказані довільно вибрані напрямки  $U_k$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ ,  $I_4$ ,  $I_5$ ,  $I_6$ . Для цієї схеми кількість вузлів  $V_3 = 4$ , а кількість віток з невідомими струмами  $V_T - V_{TC} = 5$ .

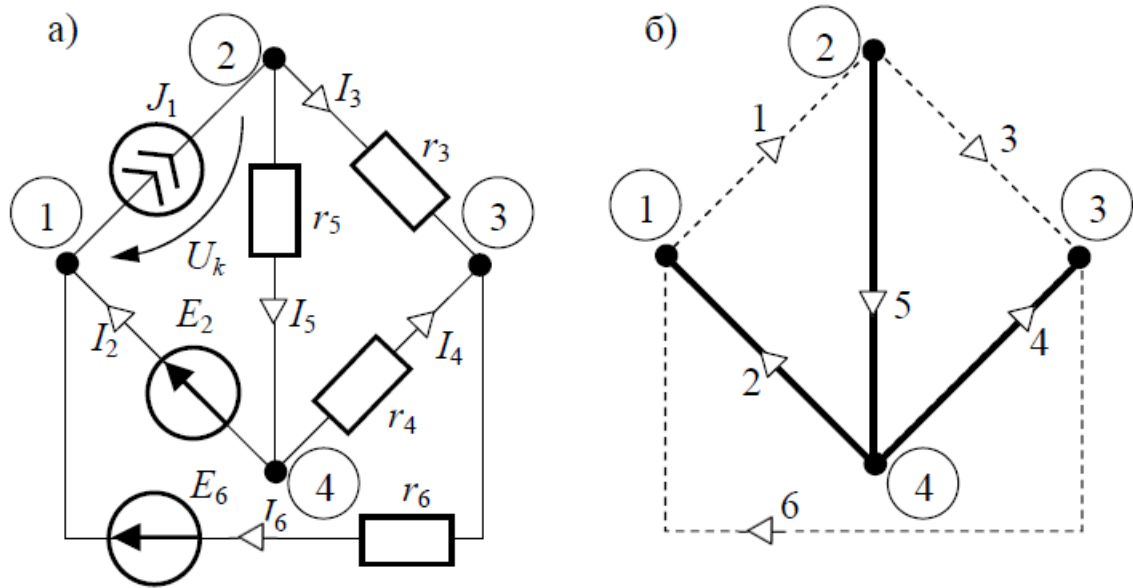


Рисунок 1.5 – Принципова схема до задачі (а) та граф схеми (б)

Рівняння, записані за першим правилом Кірхгофа для вузлів «1», «2», «3», відповідно, мають вигляд:

$$\begin{cases} J_1 - I_2 - I_6 = 0 \\ I_3 + I_5 - J_1 = 0 \\ -I_3 - I_4 + I_6 = 0 \end{cases} \quad (1.1)$$

Для складання лінійно незалежних рівнянь за другим правилом Кірхгофа скористаємося направленим графом електричного кола рис. 1.5, б. Цей граф побудований з урахуванням однієї особливості вихідного електричного кола: схема має вітку з джерелом струму ( $J_1$ ), внутрішній опір якого ( $r_1 = \infty$ ) і ЕРС ( $E_1 = 0$ ). Тому для контуру з джерелом струму неможливо записати правило за другим законом Кірхгофа у вигляді:  $\sum I \cdot r = \sum E$ , оскільки воно стає невизначеним.

Визначити напругу на затискачах джерела струму можна через рівняння, записане за другим правилом Кірхгофа для контуру, що включає джерело струму:

$$U_k = E_i - J_i \cdot r_i, \text{ В}$$

замість внутрішнього кола джерела струму:

$$I_5 \cdot r_5 - U_k = E_2, \text{ В}$$

Таким чином, вказаний контур використовується для визначення напруги на затискачах джерела струму:

$$U_k = I_5 \cdot r_5 - E_2, \text{ В}$$

Для складання рівнянь для розрахунку невідомих струмів віток використаємо незалежні контури з невідомими струмами віток зв'язку, обходячи їх у напрямі струмів віток зв'язку. Тоді для контуру з гілками 3, 4, 5 отримаємо:

$$I_3 \cdot r_3 - I_4 \cdot r_4 - I_5 \cdot r_5 = 0 \quad (1.2)$$

Для контуру з вітками 6, 4, 2:

$$-I_6 \cdot r_6 - I_4 \cdot r_4 = E_2 - E_6 \quad (1.3)$$

Система розрахункових рівнянь (1.1), (1.2), (1.3) включає в себе 5 рівнянь. Зменшимо число рівнянь у системі за допомогою методу підстановки. Для цього із рівнянь (1.1) виразимо струми віток дерева графу через струми віток зв'язку:

$$\begin{cases} I_2 = J_1 - I_6 \\ I_5 = J_1 - I_3 \\ I_4 = -I_6 - I_3 \end{cases}$$

Отримані вирази підставимо в (1.2) та (1.3) і приведемо подібні. Отримаємо:

$$\begin{cases} I_3(r_3 + r_4 + r_5) - I_6 \cdot r_4 - J_1 \cdot r_5 = 0 \\ -I_6(r_6 + r_4) + I_3 \cdot r_4 = E_2 - E_6 \end{cases} \quad (1.4)$$

Підставимо числа в отриману систему і перенесемо відоме  $(J_1 \cdot r_5)$  в праву частину (1.4):

$$\begin{cases} 60 \cdot I_3 - 20 \cdot I_6 = 200 \\ 20 \cdot I_3 - 40 \cdot I_6 = -200 \end{cases}$$

Розв'яжемо цю систему алгебраїчних рівнянь методом Крамера. Визначник системи:

$$\Delta = \begin{vmatrix} 60 & -20 \\ 20 & -40 \end{vmatrix} = -60 \cdot 40 + 20 \cdot 20 = -2000$$

Допоміжні визначники становлять:

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} 200 & -20 \\ -200 & -40 \end{vmatrix} = 200 \begin{vmatrix} 1 & -20 \\ -1 & -40 \end{vmatrix} = -200 \cdot (40 + 20) = -12000$$

$$\Delta_6 = \begin{vmatrix} 60 & 200 \\ 20 & -200 \end{vmatrix} = 200 \begin{vmatrix} 60 & 1 \\ 20 & -1 \end{vmatrix} = 200 \cdot (-60 - 20) = -16000$$

Струми віток зв'язку:

$$I_2 = J_1 - I_6 = 10 - 8 = 2 \text{ A}$$

$$I_4 = -I_3 + I_6 = -6 + 8 = 2 \text{ A}$$

Струми віток дерева:

$$I_2 = J_1 - I_6 = 10 - 8 = 2 \text{ A}$$

$$I_4 = -I_3 + I_6 = -6 + 8 = 2 \text{ A}$$

$$I_5 = J_1 - I_3 = 10 - 6 = 4 \text{ A}$$

Напруга на затискачах джерела струму:

$$U_k = -E_2 + I_5 \cdot r_5 = -100 + 4 \cdot 20 = -20 \text{ B}$$

Баланс потужностей:

$$U_k \cdot J_1 + E_2 \cdot I_2 + E_6 \cdot I_6 = I_3^2 \cdot r_3 + I_4^2 \cdot r_4 + I_5^2 \cdot r_5 + I_6^2 \cdot r_6$$

$$100 \cdot 2 - 20 \cdot 10 + 300 \cdot 8 = 6^2 \cdot 20 + 2^2 \cdot 20 + 4^2 \cdot 20 + 8^2 \cdot 20$$

$$2400 \text{ Вт} = 20 \cdot (36 + 4 \cdot 16 + 64) = 20 \cdot 120 = 2400 \text{ Вт}$$

Баланс потужностей збігається, задача розрахунку струмів розв'язана вірно.

### 1.3 Завдання та вихідні дані

Скористувавшись правилами Кірхгофа розрахувати струми в схемі рис. 1.5, а, при наступних вихідних даних (табл. 1.1):

Таблиця 1.1 – Вихідні дані

| Номер<br>варіанту | $J_1, A$ | $E_2, B$ | $E_6, B$ | $R_3, \text{Ом}$ | $R_4, \text{Ом}$ | $R_5, \text{Ом}$ | $R_6, \text{Ом}$ |
|-------------------|----------|----------|----------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| 1                 | 1        | 3        | 0        | $\infty$         | 6                | 4                | 3                |
| 2                 | 0        | 4        | 4        | 1                | $\infty$         | 3                | 2                |
| 3                 | 2        | 5        | 0        | 2                | 7                | $\infty$         | 5                |
| 4                 | 0        | 6        | 6        | 3                | 8                | 5                | $\infty$         |
| 5                 | 3        | 7        | 0        | 4                | 9                | $\infty$         | 6                |
| 6                 | 0        | 1        | 5        | 5                | $\infty$         | 3                | 5                |
| 7                 | 4        | 2        | 0        | $\infty$         | 1                | 2                | 4                |
| 8                 | 0        | 3        | 3        | 5                | $\infty$         | 3                | 4                |
| 9                 | 5        | 4        | 0        | 4                | 2                | $\infty$         | 3                |
| 10                | 0        | 5        | 4        | 3                | 3                | 2                | $\infty$         |
| 11                | 6        | 7        | 0        | 2                | 4                | $\infty$         | 4                |
| 12                | 0        | 8        | 6        | 1                | $\infty$         | 4                | 5                |
| 13                | 7        | 4        | 0        | $\infty$         | 4                | 5                | 6                |
| 14                | 0        | 3        | 5        | 1                | $\infty$         | 6                | 1                |
| 15                | 8        | 2        | 0        | 2                | 3                | $\infty$         | 2                |
| 18                | 0        | 8        | 4        | 3                | 2                | 5                | $\infty$         |
| 17                | 9        | 7        | 0        | 4                | 2                | $\infty$         | 4                |
| 18                | 0        | 2        | 3        | 5                | $\infty$         | 4                | 3                |
| 19                | 10       | 3        | 0        | $\infty$         | 4                | 7                | 5                |

Варіант завдання визначає викладач. Втім, рекомендується присвоювати номер варіанту, що відповідає порядковому номеру прізвища студента/ки в списку групи.

## 2 ЛІНІЙНІ КОЛА СИНУСОЇДНОГО СТРУМУ

### 2.1 Основні теоретичні положення

Синусоїдним називається струм, що змінюється у часі за синусоїдним законом. Значення струму в деякий момент часу називається його миттєвим значенням і позначається малою буквою «і». Струм вважається визначеним, якщо відомий закон зміни його миттєвого значення і вказаний додатний напрям. Для синусоїдного струму:

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi), \text{ A}$$

де  $I_m$  – максимальне значення або амплітуда струму, А;

$\varphi$  – початкова фаза, рад;

$\omega$  – кутова частота, що визначається за формулою, рад/с:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f, \text{ рад/с}$$

де  $T$  і  $f$  – період і частота струму.

Крім амплітудного значення, струм характеризується ще й середнім:

$$I_{\text{ср}} = \frac{2I_m}{\pi}, \text{ A}$$

та діючим значеннями:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}, \text{ A}$$

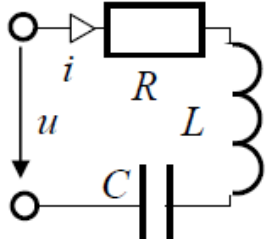
Пасивними елементами кола синусоїдного струму є активний опір  $R$  (враховує перетворення електричної енергії в теплову), індуктивність  $L$  (враховує наявність магнітного поля і явище самоіндукції) і ємність  $C$  (враховує наявність електричного поля). Стан цих елементів при увімкненні їх до напруги  $u(t) = U_m \sin(\omega t)$  характеризується даними табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Вирази для миттєвих і діючих значень струму

| Елемент         | Миттєві значення струму, А                                              | Закон Ома<br>для діючих значень, А       |
|-----------------|-------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| $R, \text{ Ом}$ | $i(t) = \frac{U_m}{R} \sin(\omega t)$                                   | $I = \frac{U}{R}$                        |
| $L, \text{ Гн}$ | $i(t) = \frac{U_m}{\omega L} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$ | $I = \frac{U}{X_L} = \frac{U}{\omega L}$ |
| $C, \text{ Ф}$  | $i(t) = \omega C U_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$         | $I = \frac{U}{X_C} = \omega C U$         |

Основні величини, що мають місце у колі з послідовним з'єднанням елементів  $R$ ,  $L$  та  $C$ , якщо до нього підведена напруга  $u(t) = U_m \sin(\omega t)$ , наведені у табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Вирази для послідовного з'єднання елементів  $R$ ,  $L$  та  $C$

| Електричне коло                                                                     | Миттєве значення<br>струму, А                                                                                                        | Закон Ома<br>для діючих значень, А |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|
|  | $i(t) = \frac{U_m}{Z} \sin(\omega t - \varphi),$ $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$ $\varphi = \arctg\left(\frac{X_L - X_C}{R}\right)$ | $I = \frac{U}{Z}$                  |

При  $X_L = X_C$ , чого можна досягти, змінюючи  $L$ ,  $C$  або  $\omega$ , у RLC-колі виникає резонанс напруги, і тоді  $U_L = U_C$ ,  $U_R = U$ ,  $\varphi = 0$  ( $\cos(\varphi) = 1$ ), струм  $I = U/R$  має максимальне значення.

Якщо у колі послідовно з'єднано декілька  $R$ ,  $L$  і  $C$ , то його повний опір:

$$Z = \sqrt{(\sum R)^2 + (\sum X_L - \sum X_C)^2}, \text{ Ом}$$

а кут зсуву фаз напруги і струму:

$$\varphi = \arctg\left(\frac{\sum X_L - \sum X_C}{\sum R}\right)$$

При паралельному з'єднанні віток, в кожній з яких може бути будь-яка комбінація елементів  $R$ ,  $L$  та  $C$ , струми розкладаються на активні (співпадаючі з напругою) і реактивні (перпендикулярні до напруги) складові. Для струму  $k$ -ої вітки:

$$I_{ka} = I_k \cdot \cos\varphi_k, \text{ А}$$

$$I_{kp} = I_k \cdot \sin\varphi_k, \text{ А}$$

$$I_k = \sqrt{I_{ka}^2 + I_{kp}^2}, \text{ А}$$

Активна і реактивна складові струму в нерозгалуженій частині кола, відповідно:

$$I_a = \sum I_{ka}, \text{ А}$$

$$I_p = \sum I_{kp}, \text{ А}$$

При розрахунку паралельного з'єднання часто користуються провідностями віток. Активна, реактивна і повна провідності  $k$ -ої гілки:

$$g_k = \frac{R_k}{Z_k^2} = \frac{R_k}{R_k^2 + (X_{Lk} - X_{Ck})^2},$$

$$b_k = \frac{X_{Lk} - X_{Ck}}{Z_k^2} = \frac{X_{Lk} - X_{Ck}}{R_k^2 + (X_{Lk} - X_{Ck})^2},$$

$$Y_k = \frac{1}{Z_k}$$

У схемі паралельного резонансного контуру з втратами (рис. 2.1) при:

$$b_L = b_C, \quad \frac{\omega L}{R_1^2 + (\omega L)^2} = \frac{\frac{1}{\omega C}}{R_2^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}$$

виникає резонанс струмів. При цьому  $I_{1p} = I_{2p}$ ,  $\varphi = 0$  ( $\cos \varphi = 1$ ), а струм у нерозгалуженій частині кола має мінімальне значення, якщо  $R_1$  та  $R_2$  менші за  $\sqrt{L/C}$ .

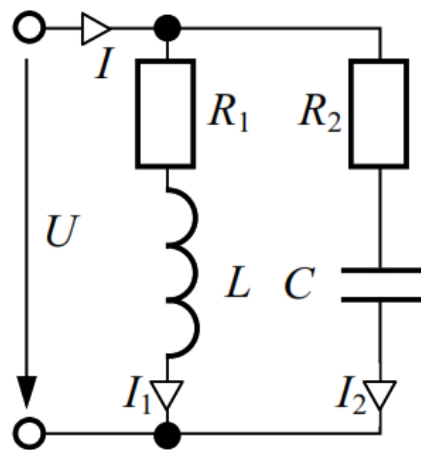


Рисунок 2.1 – Схема паралельного резонансного контуру

У схемі змішаного з'єднання, використовуючи провідність паралельно увімкнених віток, можна замінити їх однією еквівалентною віткою. Після цього коло стане послідовним, розрахунок якого розглянутий вище.

При синусоїдному струмі розрізняють миттєву потужність:

$$p(t) = u(t) \cdot i(t), \text{ Вт}$$

активну (середнє за період значення миттєвої потужності):

$$P = U \cdot I \cdot \cos(\phi) = I^2 R, \text{ Вт}$$

реактивну:

$$Q = U \cdot I \cdot \sin(\phi) = I^2 X, \text{ вар}$$

повну:

$$S = UI = I^2 Z, \text{ ВА}$$

У електроенергетиці велике значення має коефіцієнт потужності:

$$P/S = \cos(\phi)$$

При його підвищенні зростає ефективність використання обладнання та заощаджується електроенергія. Для підвищення  $\cos(\phi)$  зазвичай використовується резонанс струмів, а саме: паралельно навантаженню, яке носить, як правило, індуктивний характер, вмикаються батареї статичних конденсаторів.

## 2.2 Приклад розв'язання задачі

Коло  $r, L$  з параметрами  $r = 35 \text{ Ом}$ ,  $L = 80 \text{ мГн}$  живиться від джерела синусоїдної напруги частоти  $f = 50 \text{ Гц}$  (рис 2.2). Амплітудне значення напруги живлення  $U_m = 200 \text{ В}$ , а початкова фаза  $\psi_u = -20^\circ$ . Розрахувати миттєве і діюче значення струму. Знайти активну, реактивну і повну потужності кола.

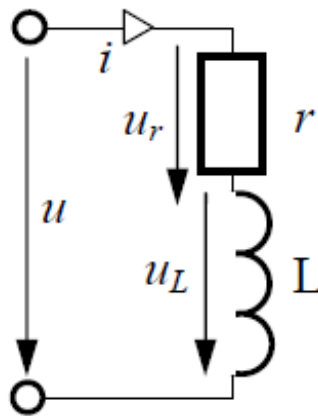


Рисунок 2.2 – Схема електричного кола

Миттєве значення прикладеної до кола напруги:

$$u(t) = U_m \sin(\omega t + \psi_u) = 200 \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{9}\right), \text{ В}$$

Кутова частота:

$$\omega = 2\pi f = 2\pi 50 = 314 \text{ рад}$$

Індуктивний опір кола:

$$X_L = \omega L = 314 \cdot 80 \cdot 10^{-3} = 25,12 \text{ Ом}$$

За другим правилом Кірхгофа для контуру кола  $u = u_r + u_L$ .

Повний опір кола:

$$Z = \sqrt{r^2 + X_L^2} = \sqrt{35^2 + 25,12^2} = 43,1 \text{ Ом}$$

і кут зсуву фаз між струмом і напругою:

$$\varphi = \arctg \frac{X_L}{r} = \arctg \frac{25,12}{35} = 35,67^\circ$$

За законом Ома для амплітудних значень:

$$I_m = \frac{U_m}{Z} = \frac{200}{43,1} = 4,64 \text{ А}$$

Початкова фаза синусоїди струму:

$$\psi_i = \psi_u - \varphi = -20 - 35,67 = -55,67^\circ$$

Миттєве значення шуканого струму:

$$i(t) = 4,64 \sin \left( 314t - 55,67 \frac{\pi}{180} \right), \text{ А}$$

Діюче значення струму:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{4,64}{\sqrt{2}} = 3,28 \text{ А}$$

Діюче значення напруги на резисторі:

$$U_r = I \cdot r = 3,28 \cdot 35 = 115 \text{ В}$$

Діюче значення напруги на індуктивності:

$$U_L = I \cdot X_L = 3,28 \cdot 25,12 = 82,4 \text{ В}$$

Діюче значення напруги на вході кола (напруга мережі):

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = \frac{200}{\sqrt{2}} = 141,4 \text{ В}$$

Активна потужність кола:

$$P = U \cdot I \cdot \cos(\varphi) = I^2 \cdot r = 3,28^2 \cdot 35 = 376,5 \text{ Вт}$$

Реактивна потужність:

$$Q = U \cdot I \cdot \sin(\varphi) = I^2 \cdot X_L = 3,28^2 \cdot 25,12 = 270,2 \text{ вар}$$

Повна потужність:

$$S = U \cdot I = 3,28 \cdot 141 = 464 \text{ ВА}$$

Коефіцієнт потужності:

$$\cos(\varphi) = \frac{P}{S} = \frac{376,5}{464} = 0,811 = \cos(35,67^\circ)$$

### 2.3 Завдання та вихідні дані

Електричне коло послідовно з'єднаних елементів ( $r$ ,  $C$ ) живиться від джерела синусоїдної напруги амплітудою ( $U_m$ ), частотою ( $f$ ) з початковою фазою напруги ( $\psi_u$ ). Розрахувати миттєве і діюче значення струму. Знайти активну, реактивну і повну потужності кола. Вихідні дані наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Вихідні дані

| Номер варіанту | $U_m$ , В | $f$ , Гц | $\psi_u$ , ° | $C$ , мФ | $r$ , Ом |
|----------------|-----------|----------|--------------|----------|----------|
| 1              | 110       | 50       | -12          | 0,5      | 1        |
| 2              | 112       | 23       | 34           | 0,9      | 2        |
| 3              | 60        | 56       | -3           | 1        | 3        |
| 4              | 89        | 67       | -45          | 0,2      | 4        |
| 5              | 67        | 23       | 23           | 0,75     | 5        |
| 6              | 123       | 46       | 54           | 0,45     | 6        |
| 7              | 220       | 59       | 123          | 0,98     | 7        |
| 8              | 323       | 23       | 43           | 1,1      | 8        |
| 9              | 23        | 45       | 23           | 0,23     | 9        |
| 10             | 56        | 78       | 33           | 0,46     | 1        |
| 11             | 76        | 98       | 44           | 0,19     | 11       |
| 12             | 127       | 34       | -34          | 0,34     | 14       |
| 13             | 234       | 65       | -67          | 0,67     | 23       |
| 14             | 23        | 23       | -23          | 0,8      | 26       |
| 15             | 67        | 68       | -67          | 0,6      | 54       |
| 18             | 86        | 23       | -78          | 0,56     | 3        |
| 17             | 98        | 78       | -98          | 0,78     | 7        |
| 18             | 230       | 98       | -45          | 0,89     | 9        |
| 19             | 110       | 23       | 45           | 0,9      | 12       |

Варіант завдання визначає викладач. Втім, рекомендується присвоювати номер варіанту, що відповідає порядковому номеру прізвища студента/ки в списку групи.

## З ТРИФАЗНІ КОЛА

### 3.1 Основні теоретичні положення

Теорія трифазних систем починається з розгляду понять: симетричні системи ЕРС, напруг, струмів; несиметричні системи ЕРС, напруг, струмів.

Короткий перелік назв ЕРС, напруг, струмів наступний:

- a) фазні ЕРС  $E_A, E_B, E_C$ , які відповідають фазам генератора  $AХ, ВУ, CZ$ ;
- b) фазні струми  $I_{AB}, I_{BC}, I_{CA}$ ;
- c) фазні напруги  $U_A, U_B, U_C$ ;
- d) лінійні напруги  $U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}$ ;
- e) лінійні струми  $I_A, I_B, I_C$ ;
- f) струм нейтралі (нульового проводу)  $I_N$ ;
- g) напруга зсуву нейтралі  $U_N$  (між нульовими точками генератора і приймача).

Відповідно, розрізняють активні, реактивні, повні потужності фаз  $P_A, P_B, P_C, Q_A, Q_B, Q_C, S_A, S_B, S_C$ , а також активну  $P$ , реактивну  $Q$  і повну  $S$  потужності трифазних приймачів (або генератора), причому:

$$\begin{aligned} P &= P_A + P_B + P_C, \text{ Вт} \\ Q &= Q_A + Q_B + Q_C, \text{ вар} \\ S &= \sqrt{P^2 + Q^2}, \text{ ВА} \end{aligned}$$

Трифазні кола зі статичним навантаженням, тобто такі, що не містять електродвигунів і трансформаторів розраховуються, як правило, комплексним методом. Їх розрахунок зазвичай супроводжується побудовою векторних або топографічних діаграм, які допомагають запобігти можливим помилкам в аналітичних розрахунках.

Якщо в трифазній системі є пристрої, опори фаз яких залежать від послідовності чергування фаз струмів (асинхронні або синхронні електродвигуни або генератори, або хоч би один з таких пристроїв, потужність якого порівняна з потужністю всієї трифазної системи), то для розрахунку несиметричного режиму таких трифазних кіл застосовують спеціальний метод розрахунку – метод симетричних складових.

### 3.2 Приклад розв'язання задачі

Дано двигун з наступними паспортними даними:  $n = 1375$  об/хв;  $f = 50$  Гц,  $P_n = 4,5$  кВт,  $U_n = 220$  В,  $I_n = 17,8$  А,  $\cos(\varphi) = 0,83$ , ККД = 0,8. Потрібно розрахувати опори обмоток двигуна  $R_\Phi$ ,  $X_\Phi$ ,  $Z_\Phi$ , які з'єднані в трикутник (рис. 3.1, б)

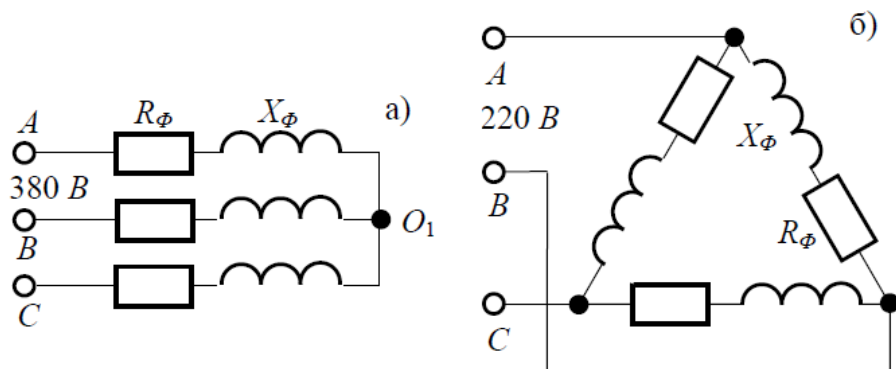


Рисунок 3.1 – Вихідна схема задачі

Слід пам'ятати, що в паспорті електродвигуна вказуються лінійні величини напруги  $U_L = U_n$  та струму  $I_L = I_n$ .

Двигун має три однакові фазні обмотки, опори яких і потрібно визначити. Нагадаємо, що двигуни малої потужності випускаються так, що їх обмотки не з'єднані ні у зірку, ні в трикутник. На клемному щитку виведено шість затискачів: початки обмоток А, В, С і кінці Х, Y, Z. Щоб отримати вказану

потужність двигуна, його обмотки можна з'єднати у зірку при напрузі 380 В (рис. 3.1, а) або у трикутник, якщо в мережі 220 В (рис. 3.1, б).

Що стосується вказаної потужності  $P_H$ , то треба знати, що це – так звана відпускна потужність, тобто потужність на валу, або потужність з урахуванням механічного ККД двигуна. Насправді:

$$P = \sqrt{3} \cdot U_{\text{л}} \cdot I_{\text{л}} \cos(\varphi) = \sqrt{3} \cdot 220 \cdot 17,8 \cdot 0,83 = 5629 \text{ Вт}$$

$$P_H = P \cdot \eta = 5629 \cdot 0,8 = 4504 \text{ Вт}$$

Тому в паспортних даних вказується або  $\eta$  або  $I_H$ .

Параметри обмоток двигуна  $R_{\Phi}$ ,  $X_{\Phi}$ ,  $Z_{\Phi}$  визначають через розрахункові електричні потужності. При з'єднанні обмоток у трикутник:

$$U_{\Phi} = U_{\text{л}} = 220 \text{ В}$$

$$I_{\Phi} = \frac{I_{\text{л}}}{\sqrt{3}} = 10,28 \text{ А}$$

$$P_{\Phi} = \frac{P}{3} = \frac{5629}{3} = 1876 \text{ Вт}$$

Тоді опори обмоток:

$$Z_{\Phi} = \frac{U_{\Phi}}{I_{\Phi}} = \frac{220}{10,28} = 21,4 \text{ Ом}$$

$$R_{\Phi} = \frac{P_{\Phi}}{I_{\Phi}^2} = \frac{1876}{10,28^2} = 17,76 \text{ Ом}$$

$$X_{\Phi} = \sqrt{Z_{\Phi}^2 - R_{\Phi}^2} = \sqrt{21,4^2 - 17,76^2} = 11,95 \text{ Ом}$$

### 3.3 Завдання та вихідні дані

Дано двигун з наступними паспортними даними табл. 3.1. Потрібно розрахувати опори обмоток двигуна  $R_\Phi$ ,  $X_\Phi$ ,  $Z_\Phi$ , які з'єднані зіркою (рис. 3.1, а).

Таблиця 3.1 – Вихідні дані

| Номер<br>варіанту | $f$ , Гц | $P_H$ , кВт | $U_H$ , В | $I_H$ , А | $\cos(\varphi)$ | ККД  |
|-------------------|----------|-------------|-----------|-----------|-----------------|------|
| 1                 | 50       | 5           | 220       | 15        | 0,9             | 0,88 |
| 2                 | 60       | 4           | 380       | 14        | 0,85            | 0,8  |
| 3                 | 20       | 3           | 660       | 11        | 0,8             | 0,78 |
| 4                 | 50       | 4           | 660       | 12        | 0,75            | 0,7  |
| 5                 | 60       | 5           | 380       | 16        | 0,9             | 0,87 |
| 6                 | 20       | 4           | 220       | 20        | 0,7             | 0,69 |
| 7                 | 50       | 3           | 220       | 10        | 0,76            | 0,7  |
| 8                 | 60       | 5           | 220       | 16        | 0,86            | 0,8  |
| 9                 | 20       | 3           | 660       | 18        | 0,91            | 0,89 |
| 10                | 50       | 4           | 220       | 19        | 0,78            | 0,76 |
| 11                | 60       | 5           | 380       | 18        | 0,67            | 0,65 |
| 12                | 20       | 3           | 380       | 17        | 0,77            | 0,75 |
| 13                | 50       | 6           | 660       | 16        | 0,86            | 0,85 |
| 14                | 60       | 7           | 660       | 14        | 0,91            | 0,88 |
| 15                | 20       | 5           | 660       | 12        | 0,89            | 0,82 |
| 18                | 50       | 6           | 220       | 11        | 0,78            | 0,76 |
| 17                | 60       | 9           | 220       | 10        | 0,75            | 0,7  |
| 18                | 20       | 6           | 660       | 12        | 0,78            | 0,73 |
| 19                | 50       | 8           | 220       | 13        | 0,8             | 0,77 |

Варіант завдання визначає викладач. Втім, рекомендується присвоювати номер варіанту, що відповідає порядковому номеру прізвища студента/ки в списку групи.

## 4 ОФОРМЛЕННЯ

Контрольна робота виконується та оформлюється у вигляді зброшурованої пояснювальної записки та креслень до неї або в електронному вигляді.

Оформлення та виклад основного тексту пояснювальної записки до контрольної роботи виконують за ДСТУ 3008:2015 та, виключно, українською мовою [5].

На сторінках контрольної роботи рекомендовано застосовувати поля наступної ширини: нижній та верхній – не менше ніж 20 мм, правий – не менше ніж 10 мм, лівий – не менше ніж 25 мм [5].

Контрольну роботу виконують шрифтом «Times New Roman» прямого накреслення кеглем 14, чорного кольору, через міжрядковий інтервал значенням 1.5. Для створення заголовків у рядках та колонках таблиць, а також пояснювальних даних на рисунках й у таблицях розмір шрифту може бути іншим [5].

Символи у формулах та рівняннях, пояснювальні дані та написи на рисунках, графіках, схемах, в таблицях та діаграмах створюють і вводять у текст за допомогою наступних редакторів – CorelDraw, Photoshop, Visio, MathType, Excel, та ін. [5].

Абзацний відступ повинен бути рівним упродовж усього тексту контрольної роботи. Заборонено розривати слова в заголовках за допомогою знаку переносу [5].

Відстань поміж заголовком та подальшим чи попереднім текстом має бути не менше ніж 2 міжрядкових інтервали [5].

Сторінки контрольної роботи нумерують наскрізь арабськими цифрами. Номер сторінки виставляють у верхньому куті сторінки, праворуч без крапки у кінці [5].

Титульний аркуш входить до загальної нумерації сторінок записки. На титульному аркуші номер сторінки не виставляють [5].

Рисунки, діаграми, ескізи, схеми, графіки подають одразу після тексту, де вперше відбувається посилання на них, або на наступній сторінці.

Назву рисунка друкують з великої літери та розміщують під ним посередині рядка, наприклад, «Рисунок 3.2 – Схема устаткування» [5].

Таблицю подають безпосередньо після тексту, у якому її згадано вперше, або на наступній сторінці [5].

На кожен таблицю має бути посилання в тексті записки із зазначенням її номера [5].

Заголовки колонок таблиці починають з великої літери, а підзаголовки – з малої літери, якщо вони становлять одне речення із заголовком [5].

Переліки (за потреби) подають у розділах, підрозділах, пунктах та підпунктах. Перед переліком ставлять двокрапку (крім пояснювальних переліків на рисунках) [5].

Формули та рівняння подають посередині сторінки симетрично тексту окремим рядком безпосередньо після тексту, у якому їх згадано. Найвище та найнижче розташування запису формул має бути на відстані не менше ніж один рядок від попереднього й наступного тексту [5].

Нумерують лише ті формули, на які є посилання в тексті записки. Формули та рівняння у записці треба нумерувати наскрізно арабськими цифрами.

Номер формули чи рівняння друкують на їх рівні праворуч у крайньому положенні в круглих дужках, наприклад (3). У багаторядкових формулах або рівняннях їхній номер проставляють на рівні останнього рядка [5].

Пояснення позначень, які входять до формули чи рівняння, треба подавати безпосередньо під формулою або рівнянням у тій послідовності, у якій їх наведено у формулі або рівнянні [5].

Пояснення позначення треба подавати без абзацного відступу з нового рядка, починаючи зі слова «де» без двокрапки. Позначки, яким встановлюють

визначення чи пояснення, рекомендовано вирівнювати у вертикальному напрямку [5].

У формулах верхні та нижні індекси, а також показники степені, в усьому тексті звіту мають бути однакового розміру, але меншими за букву чи символ, якого вони стосуються [5].

Переносити формули чи рівняння на наступний рядок дозволено лише на знаках виконуваних операцій, які пишуть у кінці попереднього рядка та на початку наступного. У разі перенесення формули чи рівняння на знакові операції множення застосовують знак «х». Перенесення на знаку ділення «:» слід уникати [5].

Кілька наведених і не відокремлених текстом формул пишуть одну під одною і розділяють комами [5].

Фізичні формули подають аналогічно математичним формулам, але з обов'язковим записом у поясненні позначки одиниці виміру відповідної фізичної величини. Між останньою цифрою та одиницею виміру залишають проміжок (крім позначення одиниць плоского кута – кутових градусів, кутових мінут і секунд, які пишуть безпосередньо біля числа вгорі) [5].

У тексті доповідної записки можна робити посилання на структурні елементи самої записки та інші джерела [5].

Посилання на джерело інформації, наведене в переліку джерел посилання, рекомендовано подавати так: номер у квадратних дужках, за яким це джерело зазначено в переліку джерел посилання, наприклад, «у роботах [2-4]» [5].

У разі посилання на структурні елементи самої записки зазначають відповідно номери розділів, підрозділів, пунктів, підпунктів, позицій переліків, рисунків, формул, рівнянь, таблиць, додатків. Посилаючись, треба використовувати такі вирази: «у розділі 4», «див. 2.1», «відповідно до 2.3.4.1», «(рисунок 1.3)», «відповідно до таблиці 3.2», «згідно з формулою (3.1)», «у рівняннях (1.23)–(1.25)», «(додаток Г)» тощо [5].

Дозволено в посиланні використовувати загальноприйняті та стандартні скорочення згідно з ДСТУ 3582, наприклад, «згідно з рис. 10», «див. табл. 3.3» тощо. Посилаючись на позицію переліку, треба зазначити номер структурного елемента звіту та номер позиції переліку з круглою дужкою, відокремлені комою. Якщо переліки мають кілька рівнів – їх зазначають, наприклад: «відповідно до 2.3.4.1, б), 2)» [5].

Усі результати розрахунків повинні мати вказівки про розмірність отриманих величин [5].

Пояснення до тих чи інших розрахунків при необхідності ілюструються рисунками, які повинні бути чіткими і давати повну інформацію.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Шегедин О. І. Теоретичні основи електротехніки: навчальний посібник для студентів дистанційної форми навчання електротехнічних та електромеханічних спеціальностей вищих навчальних закладів / О. І. Шегедин, В. С. Маляр. – Львів: Новий Світ, 2020. – 168 с.
2. Маляр В. С. Теоретичні основи електротехніки / В. С. Маляр. – Львів: вид-во Львівської політехніки, 2018. – 416 с.
3. Яцун М. А. Електричні машини / М. А. Яцун. – Львів : вид-во Львівської політехніки, 2011. – 464 с.
4. Теорія електропривода: Підручник / За ред. М.Г. Поповича. – К.: Вища школа, 1993. – 494 с.
5. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлювання ДСТУ 3008:2015