

Міністерство освіти і науки України
Національний університет водного господарства
та природокористування
Кафедра автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-
інтегрованих технологій

04-03-265М

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання практичних занять з навчальної дисципліни
«Електротехніка та електроніка»
для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за
освітньо-професійною
програмою «Комп'ютерна інженерія» спеціальності 123
«Комп'ютерна інженерія» заочної форми навчання

Рекомендовано науково-
методичною радою з якості
ННІАКОТ
Протокол № 1 від 08.10.2020 р.

Рівне – 2020

Методичні вказівки до виконання практичних робіт з навчальної дисципліни «Електротехніка та електроніка» для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерна інженерія» спеціальності 123 «Комп'ютерна інженерія» заочної форми навчання [Електронне видання] / Кулик Н. І. – Рівне : НУВГП, 2020. – 56 с.

Укладач: Кулик Н. І., кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій.

Відповідальний за випуск: Древецький В. В., доктор техн. наук, професор, завідувач кафедри автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій.

Керівник групи забезпечення спеціальності

Круліковський Б. Б.

© Кулик Н. І., 2020
© Національний університет
водного господарства
та природокористування, 2020

ВСТУП

Дисципліна «Електротехніка та електроніка» відноситься до дисциплін фундаментальної підготовки.

Предметом вивчення навчальної дисципліни є електричні та магнітні явища та їх використання для генерування, передачі і розподілу електроенергії, перетворення одних природних речовин в інші, отримання й передача інформації, принципи виробництва і удосконалення електронних приладів і систем для потреб національної економіки.

Міждисциплінарні зв'язки: дисципліна «Електротехніка та електроніка» є складовою частиною циклу фундаментальних дисциплін для підготовки студентів за спеціальністю комп'ютерна інженерія. Вивчення курсу передбачає наявність систематичних та ґрунтовних знань із суміжних курсів – «Фізика» (розділи «Електричне і магнітне поля», «Змінний струм. Електромагнітні коливання», «Вища математика» (розділи «Лінійна алгебра», «Векторна алгебра і аналітична геометрія», «Інтегральне числення і диференціальні рівняння»), «Теорія електричних і магнітних кіл», «Мікропроцесорні системи», цілеспрямованої роботи над вивченням спеціальної літератури, активної роботи на лекціях, практичних заняттях, самостійної роботи та виконання поставлених задач.

Вимоги до знань та умінь визначаються галузевими стандартами вищої освіти України.

ЗМІСТ

Практична робота № 1. Визначення загального опору простого електричного кола.	5
Практична робота № 2. Розрахунок кола постійного струму. Закони Кірхгофа.	15
Практична робота № 3. Розрахунок кола змінного струму. Паралельне з'єднання реактивних елементів.	22
Практична робота № 4. Розрахунок трифазного електричного кола. З'єднання споживачів зіркою.	31
Практична робота № 5. Розрахунок трансформатора.	46
Перелік літератури.....	56

Практичне заняття №1

Тема: «Визначення загального опору простого електричного кола».

Мета роботи: Навчитися проводити розрахунок загального опору простих та складних електричних кіл постійного струму.

1. Теоретичні відомості

Як відомо, опори в електричному колі можуть бути з'єднані послідовно (рис.1.1,а), паралельно (рис.1.1,б) та змішано (рис.1.1,в).

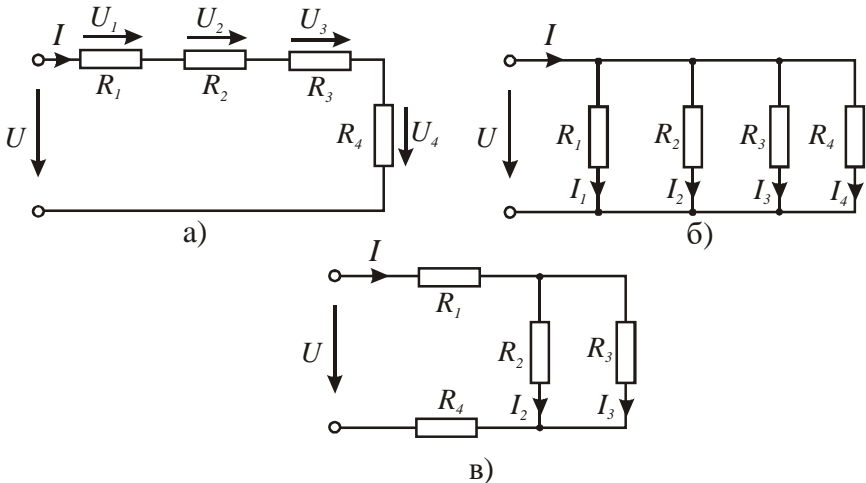


Рисунок 1.1.

При послідовному з'єднанні кінець одного опору з'єднується з початком другого, кінець другого – з початком третього і т.д. При цьому струм у всіх послідовно з'єднаних опорах має однакову величину, а спад напруг на кожному опорі - пропорційний цьому струму.

Струм у колі з послідовним з'єднанням опорів згідно закону Ома

$$I = \frac{U}{R_{екв}}, \quad (1.1)$$

де $R_{екв} = \sum_{i=1}^n R_i$ – еквівалентний опір кола, який у загальному випадку, дорівнює арифметичній сумі n послідовно з'єднаних опорів.

Спад напруги на кожному опорі

$$U_i = IR_i. \quad (1.2)$$

Напруга на вході електричного кола дорівнює арифметичній сумі напруг на окремих опорах :

$$U = \sum_{i=1}^n U_i = I \sum_{i=1}^n R_i. \quad (1.3)$$

Потужність i -того споживача у послідовному колі

$$P_i = I^2 R_i = \frac{U_i^2}{R_i}, \quad (1.4)$$

а всього кола

$$P = \sum_{i=1}^n P_i = I^2 \sum_{i=1}^n R_i = \sum_{i=1}^n \frac{U_i^2}{R_i}. \quad (1.5)$$

Паралельне з'єднання опорів (рис.1.1,б) – це таке з'єднання, коли умовні початки всіх опорів з'єднані в одну точку, а кінці – в другу. При паралельному з'єднанні на всіх опорах однакова

напруга, яка дорівнює напрузі джерела живлення U . Струм у кожному опорі пропорційний цій напрузі:

$$I_i = \frac{U}{R_i} = U g_i, \quad (1.6)$$

де $g_i = \frac{1}{R_i}$ – провідність і-того опору.

Сила струму в нерозгалуженій частині кола

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 = \sum_{i=1}^4 I_i \quad (1.17)$$

або

$$I = U g_{екв}, \quad (1.8)$$

де $g_{екв} = g_1 + g_2 + g_3 + g_4 = \sum_{i=1}^4 g_i = \sum_{i=1}^4 \frac{1}{R_i}$ – еквівалентна

провідність кола.

Потужність, що споживається при паралельному з'єднанні опорів і-ою віткою,

$$P_i = U^2 g_i = \frac{1}{R_i} U^2, \quad (1.9)$$

а - усім колом

$$P = \sum_{i=1}^n P_i = U^2 \sum_{i=1}^n g_i = U^2 g_{екв}. \quad (1.10)$$

Змішане з'єднання опорів (рис.1.1,в) – це таке з'єднання, коли частина з них з'єднана паралельно (опори R_2, R_3), а інші - послідовно.

Еквівалентний опір всього кола (рис.1.1,в) дорівнює

$$R_{екв} = R_1 + R_{23} + R_4, \quad (1.11)$$

де $R_{23} = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}$.

Сила струму джерела живлення дорівнює

$$I = I_2 + I_3 = \frac{U}{R_{екв}} = U g_{екв}. \quad (1.12)$$

2. Виконання розрахунків на практичному занятті

Приклад розрахунку

Визначимо загальний опір електричного кола, наведеного на рис.1.2.

Загальний опір з'єднання елементів $R_1 R_2 R_3$:

$$R_{1-3} = \frac{(R_1 + R_2) \cdot R_3}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{(10 + 4) \cdot 8}{10 + 4 + 8} = 5.09 \text{ Ом}.$$

Загальний опір з'єднання елементів $R_1 R_2 R_3 R_4 R_6$:

$$R_{1-4,6} = \frac{(R_{1-3} + R_4) \cdot R_6}{R_{1-3} + R_4 + R_6} = \frac{(5.09 + 3) \cdot 12}{5.09 + 3 + 12} = 4.83 \text{ Ом}.$$

Загальний опір з'єднання елементів $R_1 \dots R_6$:

$$R_{1-6} = R_{1-4,6} + R_5 = 4.83 + 4 = 8.83 \text{ Ом}.$$

Загальний опір з'єднання елементів $R_7 \dots R_9$:

$$R_{7-9} = \frac{(R_7 + R_8) \cdot R_9}{R_7 + R_8 + R_9} = \frac{(7 + 4) \cdot 5}{7 + 4 + 5} = 2.91 \text{ Ом}.$$

Загальний опір електричного кола:

$$R_{3\Delta\Gamma} = R_{1-6} + R_{7-9} = 8.83 + 2.91 = 11.74 \text{ Ом}.$$

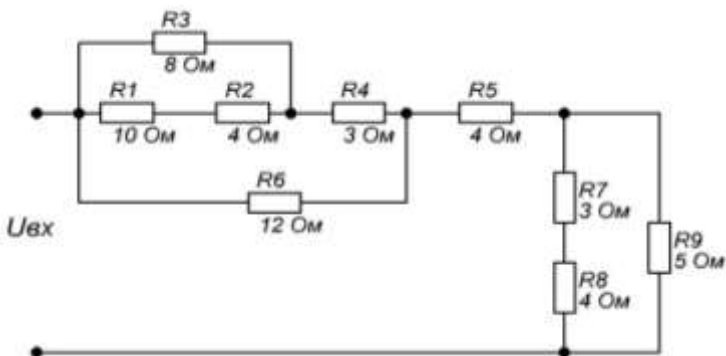


Рисунок 1.2.

Схеми для визначення загального опору електричного кола на практичному занятті наведені на рис. 1.3 – рис. 1.10.

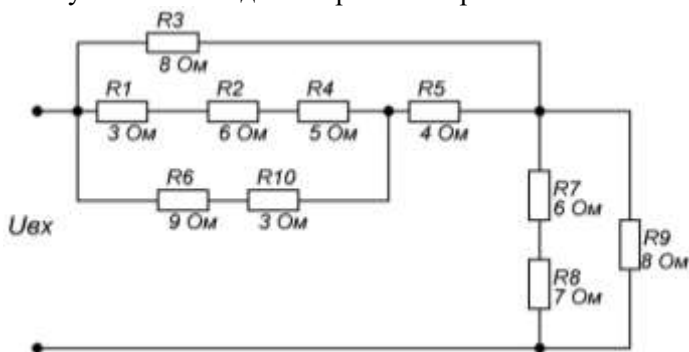


Рисунок 1.3.

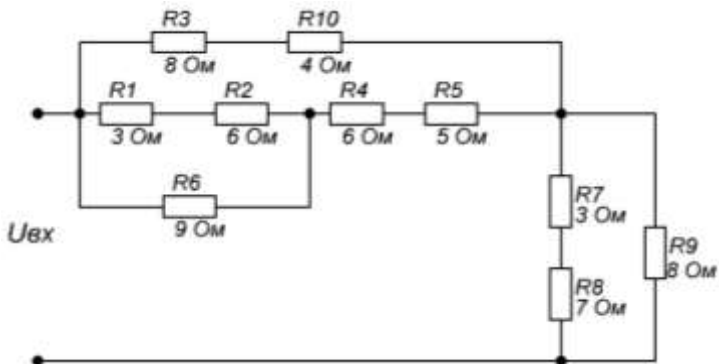


Рисунок 1.4.

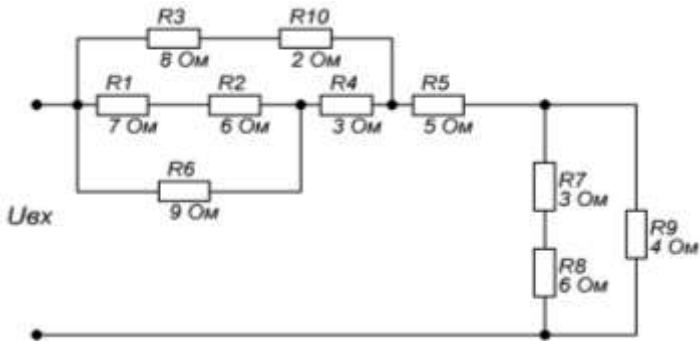


Рисунок 1.5.

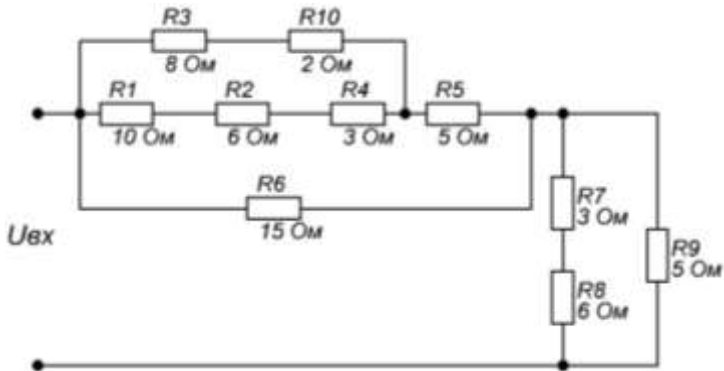


Рисунок 1.6.

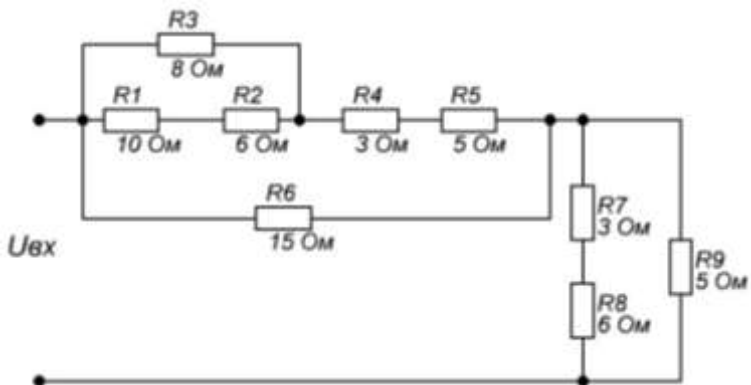


Рисунок 1.7.

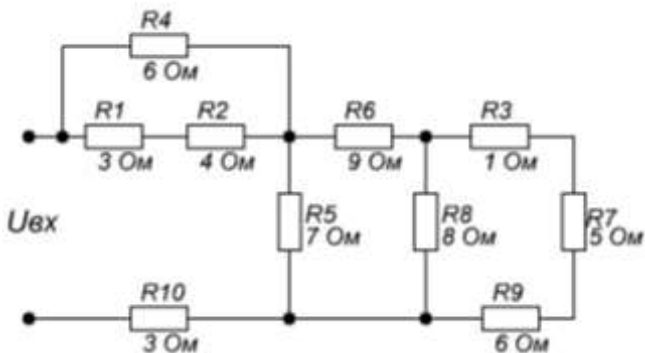


Рисунок 1.8.

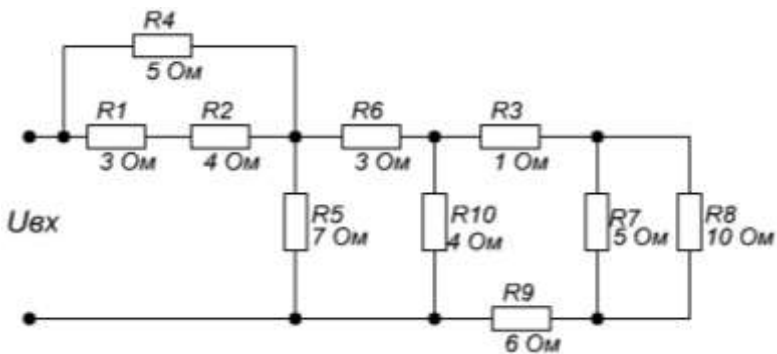


Рисунок 1.9.

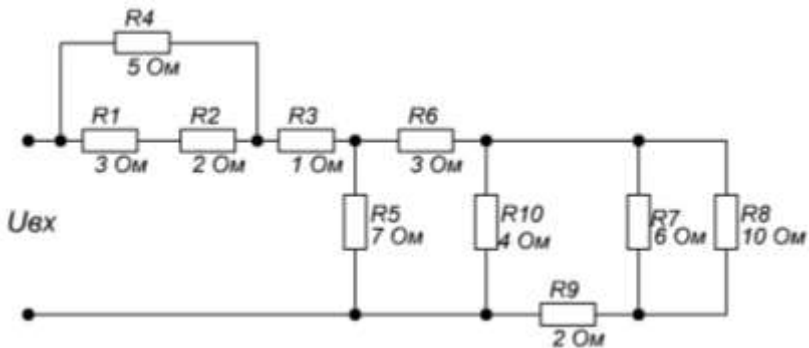


Рисунок 1.10.

3. Домашнє завдання

Схеми для визначення загального опору електричного кола для самостійного опрацювання (домашнє завдання) наведені на рис. 1.11 – рис. 1.18.

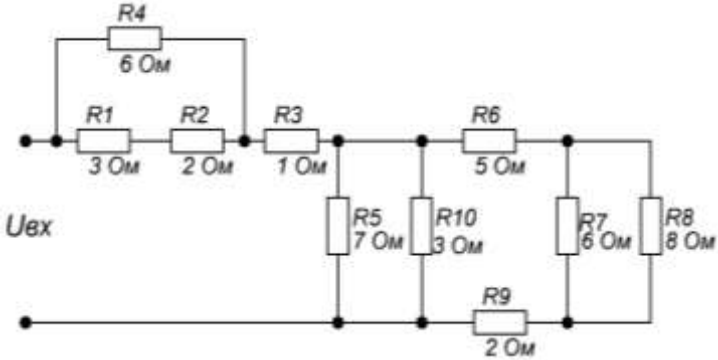


Рисунок 1.11.

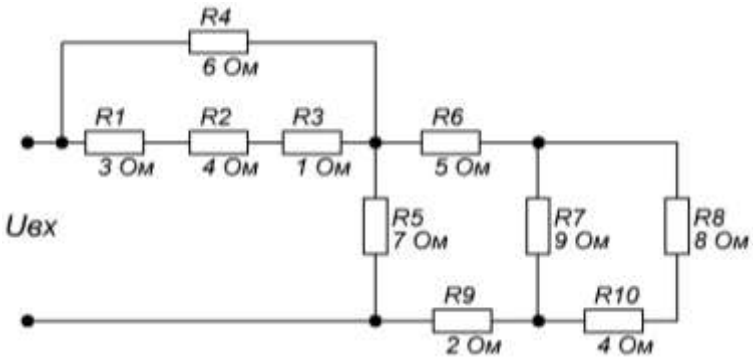


Рисунок 1.12.

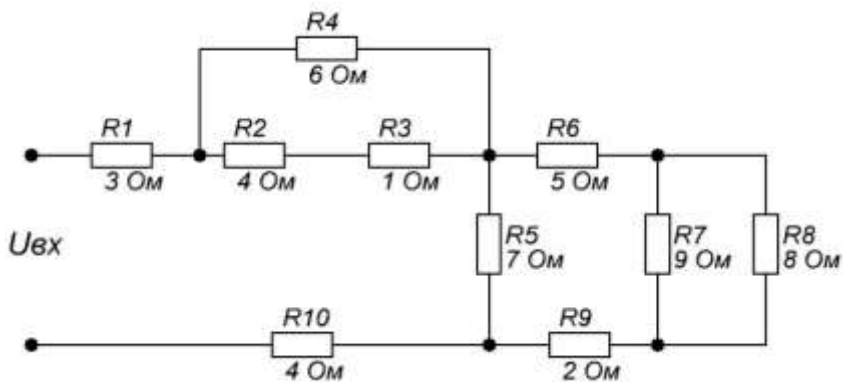


Рисунок 1.13.

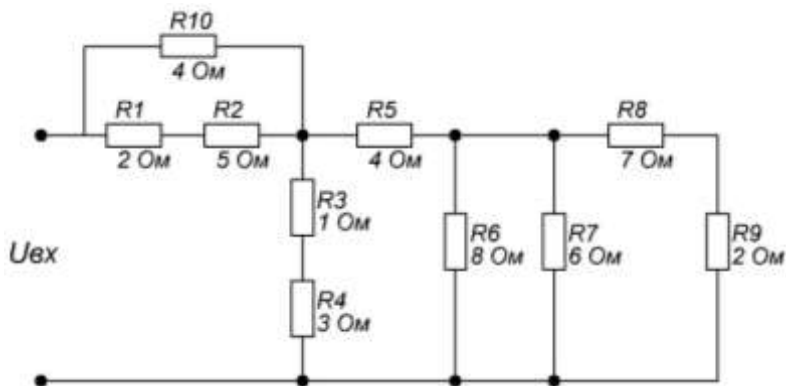


Рисунок 1.14.

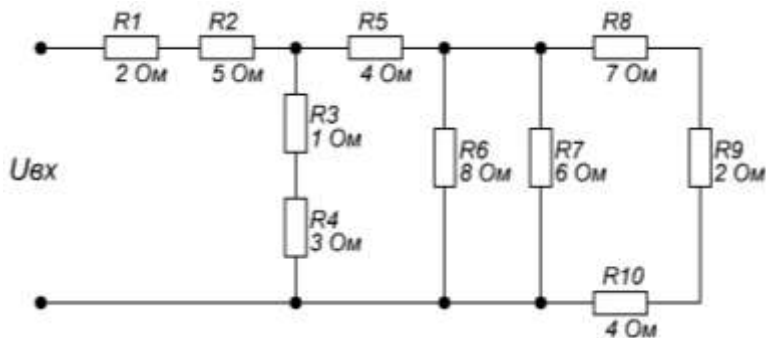


Рисунок 1.15.

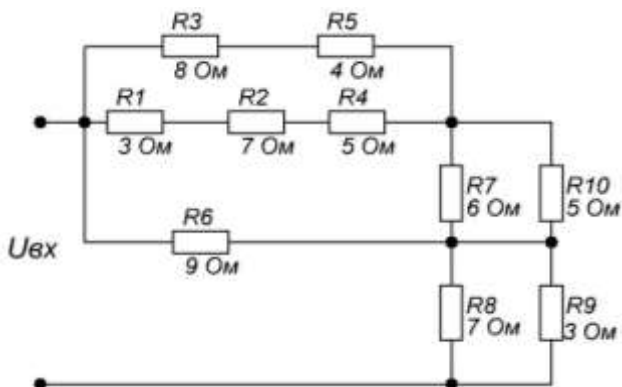


Рисунок 1.16.

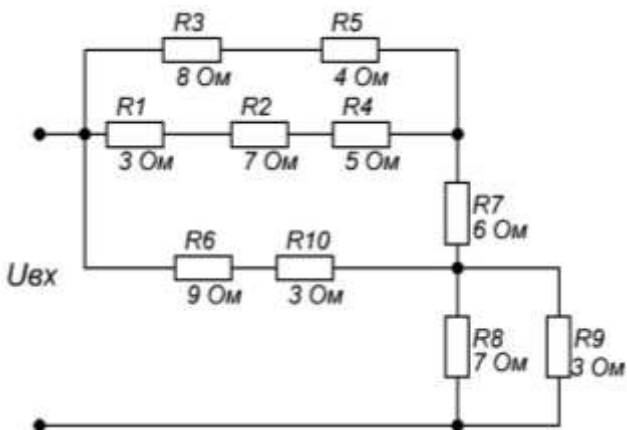


Рисунок 1.17.

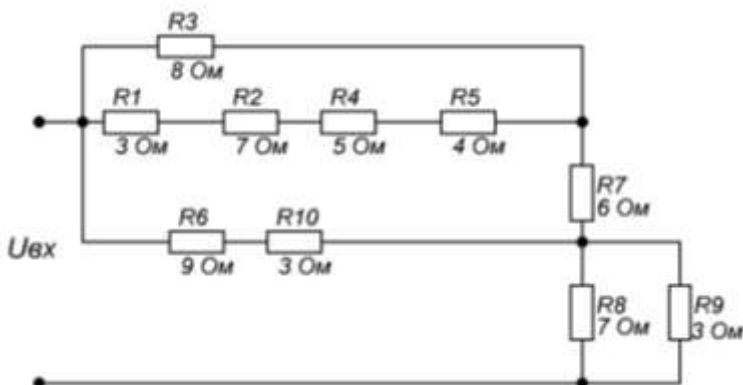


Рисунок 1.18.

4. Контрольні питання

1. Які види з'єднань існують у простому електричному колі?
2. Як визначити еквівалентний опір послідовно з'єднаних елементів?
3. Як визначити еквівалентний опір паралельно з'єднаних елементів?
4. Яким методом визначається загальний опір простого електричного кола

Практичне заняття №2

Тема: «Розрахунок кола постійного струму. Закони Кірхгофа».

Мета роботи: Навчитися проводити розрахунок простих та складних електричних кіл постійного струму.

1. Теоретичні відомості

Для аналізу електричних кіл зазвичай використовують три методи: рівнянь Кірхгофа, контурних струмів та вузлових потенціалів.

Розглянемо метод рівнянь Кірхгофа.

В задачах аналізу потрібно визначити струми і напруги віток за відомими параметрами джерел, резисторів і конфігурації кола.

Якщо електричне коло має n_e віток і $n_{вз}$ вузлів, то за першим і

другим законами Кірхгофа для такого кола можна скласти відповідно $(n_{e3} - 1)$ і $(n_e - n_{e3} + 1)$, а всього n_e незалежних рівнянь, в яких буде $2n_e$ невідомих струмів і напруг віток. Використовуючи закон Ома, одержуємо ще n_e рівнянь, які зв'язують напруги і струми віток між собою.

Отже, загалом будемо мати $2n_e$ рівнянь з $2n_e$ невідомими струмами і напругами. Загальну кількість сумісно розв'язуваних рівнянь легко зменшити до n_e , виразивши всі струми через напруги віток, або всі напруги через струми віток. Тоді одержуємо n_e рівнянь з n_e невідомими або лише струмами, або лише напругами віток. Найчастіше виражають напруги віток через струми, відразу записуючи рівняння за другим законом Кірхгофа для незалежних контурів у такій формі, щоб у лівій частині рівняння фігурували напруги на резистивних елементах віток у вигляді $\pm R_k I_k$, а у правій частині фігурували ЕРС віток.

Значно складніші зворотні задачі синтезу, в яких, наприклад, відомі струми і напруги на деяких ділянках кола, а потрібно знайти конфігурацію кола і знайти параметри всіх елементів.

Алгоритм розрахунку електричного кола методом рівнянь Кірхгофа.

1. Визначаємо кількість вузлів n_{e3} і віток n_e , довільно вибираємо напрями струму у вітках і складаємо $n_{e3} - 1$ рівнянь за першим законом Кірхгофа.

2. Вибираємо незалежні контури та довільно задаємо напрям їх обходу, бажано однаково, наприклад, за годинниковою стрілкою. Складаємо для кожного з $n = n_e - n_{e3} + 1$ незалежних контурів рівняння за другим законом Кірхгофа у вигляді $\sum_{k=1}^n I_k R_k = \sum_{k=1}^m E_k$.

3. Розв'язок системи рівнянь дає невідомі струми.

4. Перевіряємо правильність розрахунку за балансом потужностей.

Очевидно, що потужності, які генеруються джерелами енергії, мають повністю споживатися навантаженнями (резисторами), тобто в електричному колі має виконуватися *баланс потужностей*. Це наслідок закону збереження енергії:

$$\sum P_{дж} = \sum P_{сн}. \quad (2.1)$$

$\pm \sum_{i=1}^n E_i I_i$	$\pm \sum_{l=1}^m U_l J_l$	=	$\sum_{j=1}^k I_j^2 R_j$
<i>Потужність джерел напруги.</i>	<i>Потужність джерел струму.</i>		<i>Потужність споживачів.</i>
<i>Алгебраїчна сума.</i>			<i>Арифметична сума.</i>

Розглянемо електричне коло, приведене на рис. 2.1.

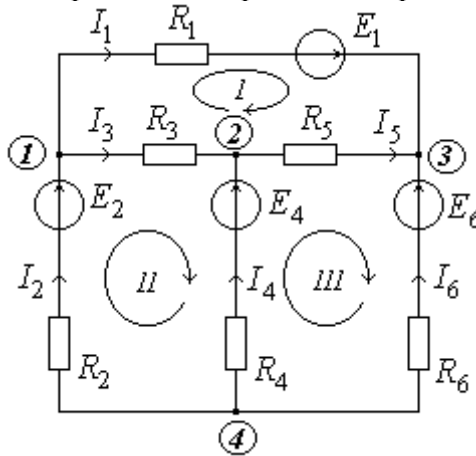


Рисунок 2.1. Схема електричного кола з трьома контурами

У колі вузлів $n_{вз} = 4$, віток $n_e = 6$. Кількість рівнянь за першим законом Кірхгофа $n_{вз} - 1 = 3$

$$1. I_2 - I_1 - I_3 = 0;$$

$$2. I_3 + I_4 - I_5 = 0;$$

$$3. I_1 + I_5 + I_6 = 0.$$

Кількість незалежних контурів:

$$n = n_e - n_{вз} + 1 = 3.$$

Виділяємо прості контури і орієнтуємо напрями їх обходу за годинниковою стрілкою:

- I. $I_1 R_1 - I_5 R_5 - I_3 R_3 = E_1$;
- II. $I_2 R_2 + I_3 R_3 - I_4 R_4 = E_2 - E_4$;
- III. $I_4 R_4 + I_5 R_5 - I_6 R_6 = E_4 - E_6$.

Одержана система з шести рівнянь з шістьма невідомими струмами.

У колі (рис. 2.1) вузлів $n_{вз} = 5$, віток $n_{в} = 8$. У вітці 8 струм відомий $I_8 = J$. Отже, загальна кількість віток з невідомими струмами дорівнює $n_{в} = 7$.

Кількість рівнянь за першим законом Кірхгофа $n_{вз} - 1 = 4$.

1. $I_2 + I_5 + I_7 = 0$; 3. $I_1 - I_5 - I_6 = 0$;
2. $I_3 - I_7 - J = 0$; 4. $I_4 - I_3 + I_6 = 0$.

Необхідна кількість рівнянь за другим законом Кірхгофа:

$$n = n_{в} - n_{вз} - 1 = 7 - 5 + 1 = 3.$$

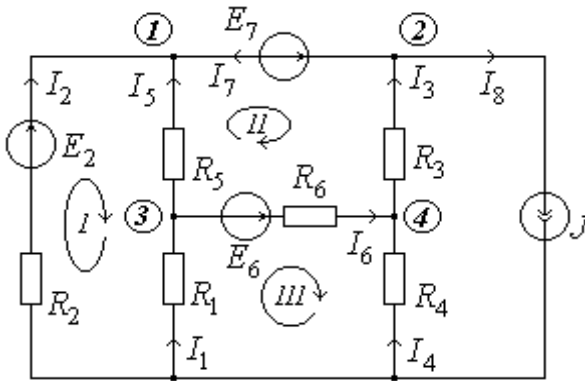


Рисунок 2.2. Схема електричного кола з чотирма контурами

Складаємо ці рівняння для трьох незалежних простих контурів, позначених на рис. 1.2 римськими цифрами.

- I. $I_2 R_2 - I_5 R_5 - I_1 R_1 = E_2$;
- II. $I_5 R_5 - I_3 R_3 - I_6 R_6 = E_7 - E_6$;
- III. $I_1 R_1 + I_6 R_6 - I_4 R_4 = E_6$.

Складаємо рівняння балансу потужностей для кола на рис. 2.2:
 $E_2 I_2 - E_7 I_7 + E_6 I_6 + J U_{s2} = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 + R_3 I_3^2 + R_4 I_4^2 + R_5 I_5^2 + R_6 I_6^2$,
де $U_{s2} = R_4 I_4 + R_3 I_3$.

2. Виконання розрахунків на практичному занятті

Вихідні дані:

1, В	1, Ом	2, В	3, Ом	2, Ом
3,8	,11	1	,01	

Необхідно виконати наступні розрахунки:

1. Скласти рівняння за законами Кірхгофа для визначення струмів в колі рис.2.3
2. Розрахувати струми гілок кола: I_1 ; I_2 і I_3 .
3. Розрахувати напругу U_{12} методом двох вузлів.
4. Скласти баланс потужності в електричному колі рис. 2.3
5. Розрахувати коефіцієнт корисної дії

Розв'язок.

Рівняння за законом Кірхгофа складають відносно невідомих струмів: I_1 ; I_2 і I_3 , тобто треба скласти три рівняння. Одне рівняння складається за першим законом Кірхгофа, а два інших за другим законом.

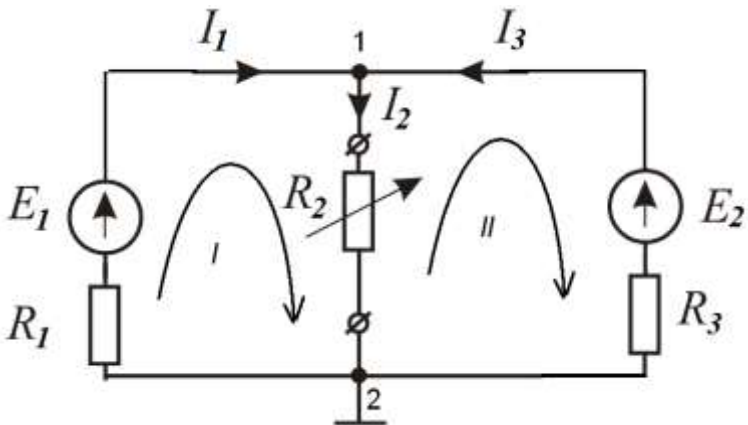


Рисунок 2.3. Схема електричного кола з чотирма контурами

1. Для 1-го вузла можемо записати:

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

для I-го контуру:

$$I_1 R_1 + I_2 R_2 = E_1;$$

для II-го контуру:

$$-I_3 R_3 - I_2 R_2 = -E_2.$$

2. Щоб знайти значення струмів, підставимо в записані рівняння (п.1) числові значення:

Для 1-го вузла можемо записати:

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

для I-го контуру:

$$0,11 I_1 + I_2 = 13,8;$$

для II-го контуру:

$$0 - 0,01 I_2 = -11.$$

або в матричному вигляді :

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & -1 \\ 0,11 & 0 & 1 \\ 0 & -0,01 & -1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 13,8 \\ -11 \end{pmatrix}. \quad (2.1)$$

Розв'язавши рівняння (2.1), отримаємо: $I_1 = 26,9$ (А); $I_3 = -16$ (А); $I_2 = 10,8$ (А).

3. Згідно методу двох вузлів, напруга між вузлами 1 і 2 буде визначатися за формулою:

$$U_{12} = \frac{E_1 g_1 + E_2 g_3}{g_1 + g_2 + g_3}. \quad (2.2)$$

$$\text{де } g_1 = \frac{1}{R_1}, \quad g_2 = \frac{1}{R_2}, \quad g_3 = \frac{1}{R_3}.$$

Таким чином

$$U_{12} = \frac{13,8 \cdot \frac{1}{0,11} + 11 \cdot \frac{1}{0,01}}{\frac{1}{0,11} + \frac{1}{0,01} + 1} = 11,1 \text{ (В)}.$$

Даним методом можна також визначити струми у вітках за законом Ома:

$$I_1 = \frac{E_1 - U_{12}}{R_1}; I_2 = \frac{U_{12}}{R_2}; I_3 = \frac{E_2 - U_{12}}{R_3}$$

4. В будь-якому електричному колі повинен підтверджуватися баланс потужностей (як частковий випадок загального закону природи – закон збереження енергії), який полягає в тому, що алгебраїчна сума потужностей всіх джерел енергії $P_E = \sum EI$ дорівнює арифметичній сумі потужностей, які розсіюються на всіх резистивних елементах кола $P_Q = \sum RI^2$ (P_Q - електрична потужність на резистивних елементах кола, яка перетворюється в тепло відповідно до закону Джоуля-Ленца).

Рівняння балансу потужностей для кола рис.2.3 має вигляд

$$E_1 I_1 + E_2 I_3 = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 + R_3 I_3^2.$$

Потужність джерел: $13,8 \cdot 26,9 - 11 \cdot 16 = 194,5$ (Вт);

Потужність споживачів:

$$26,9^2 \cdot 0,11 + 16^2 \cdot 11 + 10,8^2 \cdot 1 = 199 \text{ (Вт)}$$

Таким чином, $194,5 \approx 199$ баланс потужності виконується.

5. Коефіцієнт корисної дії визначається за формулою:

$$\eta_1 = \frac{U_{12} \cdot I_1}{E_1 \cdot I_1} = \frac{11,1 \cdot 26,9}{13,8 \cdot 26,9} = 80,6\%$$

3. Домашнє завдання

Домашнє завдання. Виконати розрахунки пунктів 1-5 по вихідних даних таблиці 1.

Одиниці у шифрі	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
E1	14	14	13	13	14.2	14.2	14	14	13	13
R1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.12	0.12	0.12	0.11	0.1	0.1
E2	12.5	12.5	12.5	12.4	12.3	12.2	12	12	11.5	11.5
R3	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
R2	0.5	0.6	0.8	0.9	1.2	1.5	1.75	2	1.2	1.2

4. Контрольні питання

1. Поясніть етапи алгоритму розрахунку електричного кола методом рівнянь Кірхгофа.
2. Як рекомендується вибирати напрямок контурних струмів?
3. Як визначають знак вузлових струмів?
4. Для чого складають баланс потужностей електричного кола?

Практичне заняття №3

Тема: «Розрахунок кола змінного струму. Послідовне з'єднання реактивних елементів».

Мета роботи: Навчитися проводити розрахунок простих електричних кіл змінного струму та будувати векторні діаграми струмів, напруг та потужностей.

1. Теоретичні відомості

Як споживачі електричної енергії в колах змінного струму використовуються різні технічні пристрої, число їх велике, але в схемах заміщення, що відображають явища, які відбуваються в колах, ми використовуємо три типу ідеальних елементів:

а) резистивний елемент – володіє тільки активним опором і відображає необоротний процес поглинання енергії (перетворення енергії в теплову);

б) індуктивний елемент – це ідеальна котушка, активний опір проводу якої приймається рівним нулю; цей елемент відображає

властивість котушки створювати магнітне поле;

в) ємнісний елемент – це ідеальний конденсатор, що не має струмів витоку; відображає властивість накопичення зарядів або створення електричного поля.

1. Електричне коло синусоїдального струму з резистивним опором.

Як видно з рис. 3.1, початкові фази струму і напруги на резисторі однакові, тобто струм через резистор співпадає за фазою з

напрягою на резисторі, де Ψ – початкова фаза.

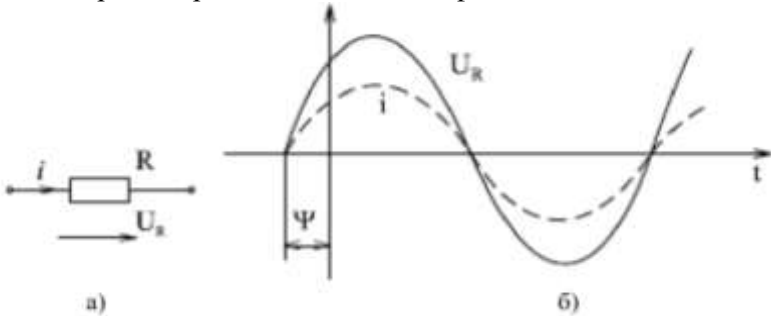


Рисунок 3.1. Позначення (а) та часові діаграми струму і напруги (б) резистора

Зобразимо комплексні струм і напругу у вигляді вектора на комплексній площині (рис. 3.2). Сукупність векторів на комплексній площині, що відображають комплексні струми і напруги для даного кола, називається векторною діаграмою. Вектор струму через резистор співпадає за напрямом з вектором напруги на резисторі.

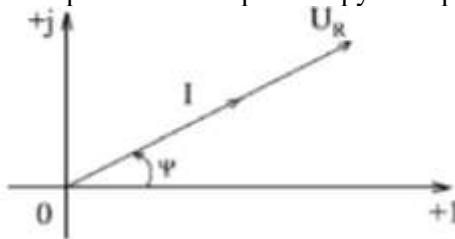


Рисунок 3.2. Векторні діаграми резистивного елементу
Часова залежність миттєвої потужності, споживаної резистивним елементом, має такий вигляд (рис. 3.3):

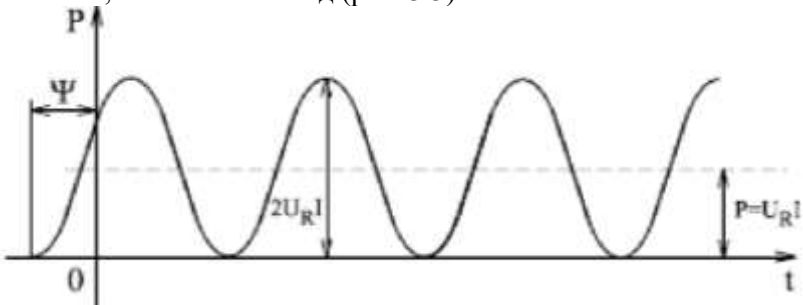


Рисунок 3.3. Часова залежність миттєвої потужності
2. Електричне коло синусоїдального струму з індуктивним опо-

ром.

Відомо, що змінний струм, проходячи через котушку індуктивності, викликає ЕРС самоіндукції. Графіки миттєвих значень струму і напруги на індуктивності мають вигляд (рис. 3.4, б).

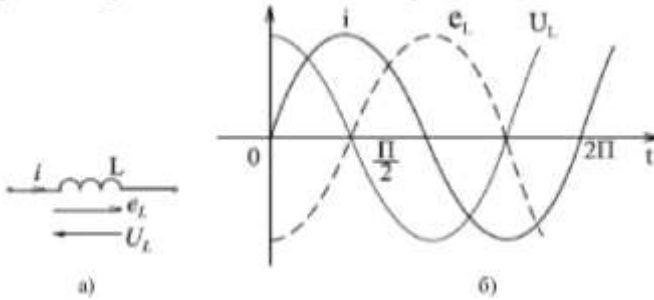


Рисунок 3.4. Позначення (а) та часові діаграми струму, ЕРС і напруги (б) котушки індуктивності

Таким чином, різниця фаз напруги і струму на індуктивному елементі складає 90° , при цьому крива струму відстає від кривої напруги. Величину $X_L = \omega L$ називають індуктивним опором. Тоді закон Ома для індуктивного кола $U_L = I X_L$. Величина jX_L називається комплексним індуктивним опором.

Векторна діаграма індуктивного кола має такий вигляд (рис. 3.5):

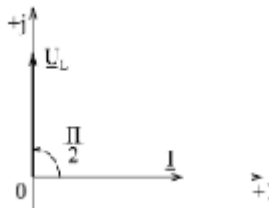


Рисунок. 3.5. Векторні діаграми індуктивного елементу

На діаграмі видно, що вектор струму, що протікає через індуктивний елемент, відстає від вектора напруги на ньому (вважаючи, що вектори обертаються проти годинникової стрілки).

Графік $P(t)$ має вигляд (рис. 3.6):

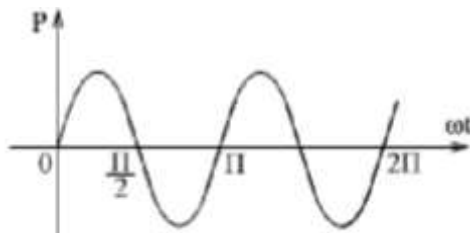


Рисунок 3.6. Часова залежність миттєвої потужності

З графіка рис. 3.6 видно, що активна потужність дорівнює середньому значенню миттєвої потужності та рівна нулю, тобто індуктивний елемент активну потужність не споживає. Для реактивних елементів вводиться поняття реактивної потужності, рівної амплітудному значенню миттєвої потужності. Розмірність для реактивної потужності така сама, що і для активної, але щоб їх розрізнити, одиниця реактивної потужності називається "ВАар" (вольтамперреактивний).

3. Електричне коло синусоїдального струму з ємнісним опором. Для електричного ємнісного кола крива струму випереджає криву напруги на чверть періоду (рис. 3.7, б).

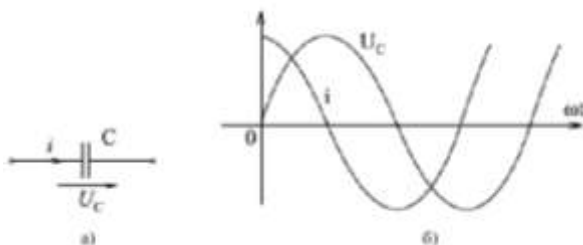


Рисунок 3.7. Позначення (а) та часові діаграми струму і напруги (б) ємнісного елемента

Величину $X_C = 1/\omega C$ називають ємнісним опором. Тоді закон Ома для ємнісного кола $U_C = -jIX_C$. Величина $-jIX_C$ називається комплексним ємнісним опором.

Векторна діаграма ємнісного кола має такий вигляд (рис. 3.8):

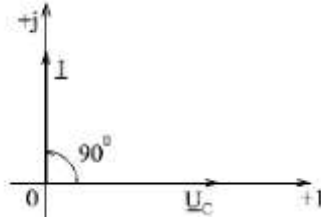


Рисунок. 3.8. Векторні діаграми ємнісного елементу

2. Виконання розрахунків на практичному занятті

Для кола з паралельним з'єднанням елементів, яке під'єднане до змінної синусоїдної напруги $u = U_m \sin \omega t$ з лінійною частотою $f=50\text{Гц}$ (рис.3.9) необхідно:

1. Накреслити розрахункову електричну схему (рис. 3.9).
2. Визначити струм джерела живлення і струми в окремих вітках кола.
3. Побудувати векторну діаграму струмів і розкласти вектори струмів на їхні активні і реактивні складові.
4. Визначити активну (P), реактивну (Q) і повну потужність кола.
5. Визначити коефіцієнт потужності ($\cos \varphi$) кожної гілки , коефіцієнт потужності джерела енергії і відповідні фазові кути струмів φ ; φ_1 ; φ_2 і φ_3 .

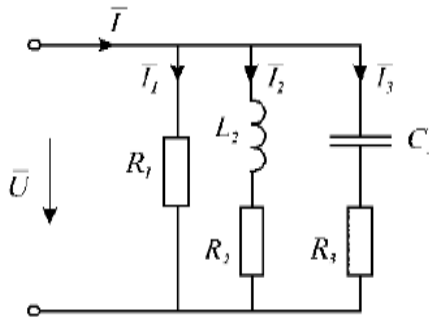


Рисунок 3.9. Розрахункова електрична схема

Вихідні дані:

U, B	$R_1, Ом$	$R_2, Ом$	$R_3, Ом$	$L_2, ГН$	$C_3, мкФ$
110	50	30	25	0,17	220

Розв'язок.

2. Загальний струм в електричному колі при паралельному з'єднанні гілок визначають за формулою

$I = UY = U\sqrt{(\sum g_i)^2 + (\sum b_{Li} - \sum b_{Ci})^2}$, де $Y = 1/Z$ - загальна повна провідність кола;

$$\sum g_i = g_1 + g_2 + g_3 = \frac{1}{R_1} + \frac{R_2}{R_2^2 + X_{L2}^2} + \frac{R_3}{R_3^2 + X_{C3}^2};$$

Для цього спочатку знайдемо реактивні опори віток:

$$X_{L2} = 2\pi fL_2 = 2\pi \cdot 50 \cdot 0,17 = 53,4 \text{ (Ом)};$$

$$X_{C3} = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 220 \cdot 10^{-6}} = 14,47 \text{ (Ом)};$$

Тоді активні провідності віток будуть рівні:

$$g_1 = \frac{1}{50} = 0,02(Cм); \quad g_2 = \frac{30}{30^2 + 53,4^2} = 0,008(Cм);$$

$$g_3 = \frac{25}{25^2 + 14,47^2} = 0,03(Cм);$$

$$g_{екв} = \sum g = 0,02 + 0,008 + 0,03 = 0,058(Cм).$$

А реактивні провідності віток будуть рівні:

$$\sum b_{Ci} = \frac{X_{C2}}{R_3^2 + X_{C3}^2}; \quad \sum b_{Li} = \frac{X_{L2}}{R_2^2 + X_{L3}^2};$$

або:

$$b_{L2} = \frac{53,4}{30^2 + 53,4^2} = 0,0142(Cм); \quad b_{C3} = \frac{14,47}{25^2 + 14,47^2} = 0,017(Cм);$$

$$b_{екв} = b_L + b_C = 0,0142 + 0,017 = 0,0031(См);$$

Тоді повна провідність другої вітки буде рівною:

$$Y_2 = \sqrt{g_3^2 + b_{L2}^2} = 0,016(См);$$

А повна провідність третьої вітки:

$$Y_3 = \sqrt{g_3^2 + b_{C3}^2} = 0,035(См);$$

Повна провідність всього кола:

$$Y = \sqrt{g_{екв}^2 + b_{екв}^2} = 0,058(См).$$

Тоді струми віток будуть визначатися за формулами:

$$I_1 = U \cdot Y_1 = U \cdot g_1 = 2,2(A); I_2 = U \cdot Y_2 = 1,8(A); I_3 = U \cdot Y_3 = 3,8(A).$$

Струм у нерозгалуженій ділянці кола буде рівний:

$$I = U \cdot Y = 6,38(A).$$

3. для побудови векторної діаграми струмів необхідно визначити фазові кути струмів віток за формулами:

$$\cos \varphi_1 = \frac{g_1}{Y_1} = 1 \rightarrow \varphi_1 = 0^\circ;$$

$$\cos \varphi_2 = \frac{g_2}{Y_2} = 0,49 \rightarrow \varphi_2 = \arccos(0,49) = -60,7^\circ;$$

$$\cos \varphi_3 = \frac{g_3}{Y_3} = 0,86 \rightarrow \varphi_3 = \arccos(0,86) = 30^\circ;$$

$$\cos \varphi = \frac{g_{екв}}{Y} = 0,99 \rightarrow \varphi = \arccos(0,99) = 3^\circ.$$

Побудову можна спростити, якщо струми в вітках розкласти на активну і реактивну складові:

$$I_{1a} = I_1 = 2,2(A);$$

$$I_{2a} = I_2 \cdot \cos \varphi_2 = 0,88(A); I_{2p} = I_2 \cdot \sin \varphi_2 = -1,57(A);$$

$$I_{3a} = I_3 \cdot \cos \varphi_3 = 3,3(A); I_{3p} = I_3 \cdot \sin \varphi_3 = 1,9(A);$$

$$I_a = I \cdot \cos \varphi = 6,37(A); I_p = I \cdot \sin \varphi = 0,34(A).$$

Тоді за виконаними розрахунками побудуємо векторну діаграму струмів:

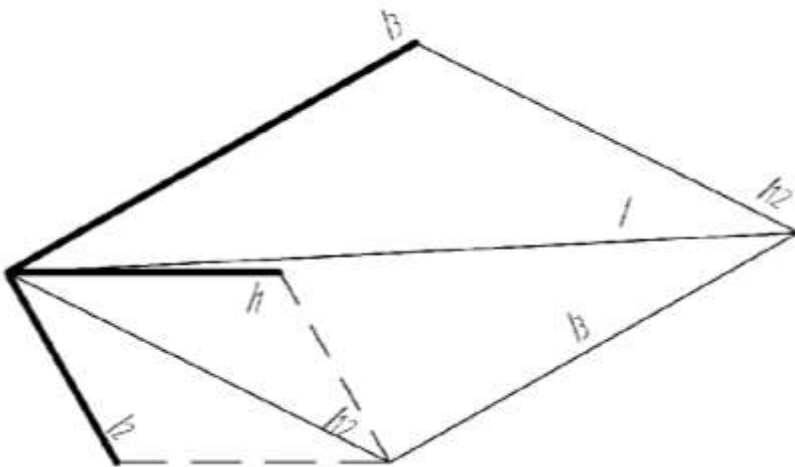


Рисунок 3.10. Векторна діаграма струмів

4. Визначаємо потужності кола:

а) Активну: $P = U \cdot I \cdot \cos \varphi = 701,3 (Вт)$;

б) Реактивну: $Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi = 37,6 (Вар)$;

в) Повну: $S = U \cdot I = 702,3 (ВА)$.

Для наочності зобразимо трикутник потужностей:



Рисунок 3.11. Трикутник потужностей

3. Домашнє завдання

Домашнє завдання. Виконати розрахунки пунктів 1-5 по вихідних даних таблиці 1 та таблиці 2.

Таблиця 1

Одиниці у шифрі	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Діюче значення	127	220	380	660	220	380	127	660	220	380

Таблиця 2

Десятки в шифрі	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$R_1, Ом$	30	20	15	25	35	40	60	55	55	45
$R_2, Ом$	80	70	60	50	40	30	75	65	45	55
$R_3, Ом$	20	40	50	45	65	75	15	25	30	55
$L_2, Гн$	0,15	0,2	0,25	0,3	0,2	0,25	0,3	0,15	0,35	0,25
$C_3, мкФ$	200	250	300	700	400	350	450	150	100	200

4. Контрольні питання

1. Як визначаються реактивні опри індуктивного та ємнісного елементів?

2. Наведіть векторні діаграми напруг та струмів в активно-індуктивному та активно-ємнісному колах.

3. Чому дорівнюють середні потужності, споживані від джерела живлення індуктивним та ємнісним елементами?

4. Охарактеризуйте активну, реактивну та повну потужності

в колі змінного струму.

5. Як характер повного опору електричного кола (активний, активно-індуктивний, індуктивний, ємнісний або активно-ємнісний) впливає на співвідношення між потужностями?

Практичне заняття №4

Тема: «Розрахунок трифазного електричного кола»

1. Теоретичні відомості

Сукупність трьох електричних кіл, в яких діють синусоїдні е. р. с. однієї частоти, але зсунуті за фазою одна від одної на кут $2\pi/3$, і які створені загальним джерелом електричної енергії, називається трифазною електричною системою. Окремі електричні кола, які утворюють трифазну систему, називають фазами.

Сукупність е. р. с., які діють в трифазній системі електричних кіл, називають трифазною системою електрорушійних сил, а сукупність струмів, які протікають у цих колах, називають трифазною системою струмів.

Найбільше поширення в сучасній електроенергетиці отримали трифазні системи. Практично все виробництво, передача та споживання електричної енергії здійснюється в трифазних системах, що обумовлене такими перевагами трифазних систем у порівнянні з однофазними як менші витрати проводів для передачі заданої потужності, простота технічної реалізації обертового магнітного поля, на використанні якого побудовані асинхронні і синхронні двигуни – основні споживачі електричної енергії.

Трифазне коло складається з трьох основних елементів: трифазного генератора, який індукуює трифазну систему е.р.с., трифазної лінії електропередачі і споживачів електричної енергії, які можуть бути як трифазними (електродвигуни і інші промислові установки), так і однофазними (однофазні двигуни, зварювальні трансформатори, лампочки розжарювання тощо).

Трифазні кола можуть бути з'єднані зіркою або трикутником, причому спосіб з'єднання обмоток генератора чи трансформатора не визначає способу з'єднання споживачів електричної енергії.

Найбільш поширеним є з'єднання обмоток генератора (трансформатора) зіркою, коли кінці обмоток з'єднують в одну точку, яку називають нейтральною точкою (рис.4.1).

Проводи, які йдуть від початків обмоток генератора (трансформатора), називають лінійними, а провід, який йде від нейтральної точки, називають нейтральним або нульовим, бо в симетричній системі струм в ньому дорівнює нулю.

Електрорушійні сили, які індукуються в обмотках генератора (трансформатора), напруги на затискачах цих обмоток і струми в них називають фазними е.р.с. (e_A, e_B, e_C), напругами (u_A, u_B, u_C) і струмами (i_A, i_B, i_C), а напруги між сусідніми проводами – лінійними напругами (u_{AB}, u_{BC}, u_{CA}).

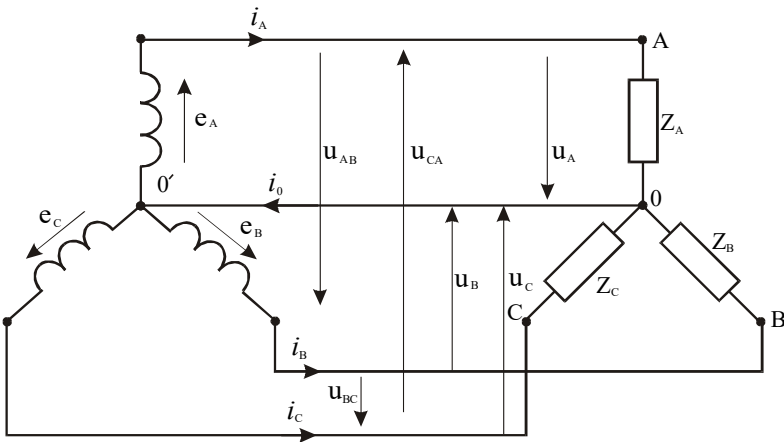


Рисунок 4.1

Сполучення трифазної системи зіркою можна здійснити двома способами : з нейтральним проводом (чотирипровідна система) і без нього (трипровідна система). Найбільш широко застосовується чотирипровідна система (рис.4.1), бо дозволяє під'єднувати трифазні, двофазні і однофазні споживачі, забезпечує незалежну роботу фаз і має дві напруги: фазну і лінійну.

Якщо в трифазній системі повні опори $Z_A = Z_B = Z_C$, то така система називається симетричною. В симетричній системі

$i_A = i_B = i_C$, тобто фазні струми рівні за величиною, але зміщені за фазою один від одного на кут $2\pi/3$, і описуються такими рівняннями:

$$\begin{aligned} i_A &= I_{mA} \sin \omega t, \\ i_B &= I_{mB} \sin(\omega t - 2\pi/3), \\ i_C &= I_{mC} \sin(\omega t - 4\pi/3), \end{aligned} \quad (4.1)$$

де I_{mA} , I_{mB} і I_{mC} - амплітудні значення відповідних фазних струмів.

Оскільки в симетричній трифазній системі повні опори фаз рівні, то рівними будуть і кути зсуву фаз:

$$\cos \varphi_A = \frac{r_A}{Z_A} = \cos \varphi_B = \frac{r_B}{Z_B} = \cos \varphi_C = \frac{r_C}{Z_C}.$$

За цих умов сума миттєвих значень фазних струмів $i_A + i_B + i_C = 0$ і струм в нейтральному проводі $i_0 = 0$. Отже, трифазна симетрична система може бути трипровідною (без нейтрального проводу).

Застосувавши для лінійних контурів другий закон Кіргофа, можна миттєві значення лінійних напруг визначити через фазні, а саме:

$$\begin{aligned} u_{AB} &= u_A - u_B, & \bar{U}_{AB} &= \bar{U}_A - \bar{U}_B, \\ u_{BC} &= u_B - u_C, & \bar{U}_{BC} &= \bar{U}_B - \bar{U}_C, \\ u_{CA} &= u_C - u_A, & \bar{U}_{CA} &= \bar{U}_C - \bar{U}_A. \end{aligned} \quad \text{або} \quad (4.2)$$

Склавши ці рівняння, знайдемо, що сума як миттєвих значень лінійних напруг, так і сума цих напруг у векторній формі дорівнює нулю.

На рис.4.2 наведені векторні діаграми напруг, побудовані на підставі рівнянь (4.2). Вихідною є діаграма фазних напруг \bar{U}_A, \bar{U}_B і \bar{U}_C , зсунутих одна від одної на кут $\frac{2\pi}{3}$ (рис.4.2,а).

Для визначення співвідношення між лінійними і фазними напругами опустимо перпендикуляр з кінця вектора \bar{U}_A на вектор \bar{U}_{AB} . Трикутник OAB рівнобедрений, тому точка К ділить сторону OB навпіл. Із прямокутного трикутника OAK маємо

$$OK = \frac{1}{2}U_{AB} = U_A \cos 30^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2}U_A \text{ або } U_{AB} = \sqrt{3}U_A. \quad (4.3)$$

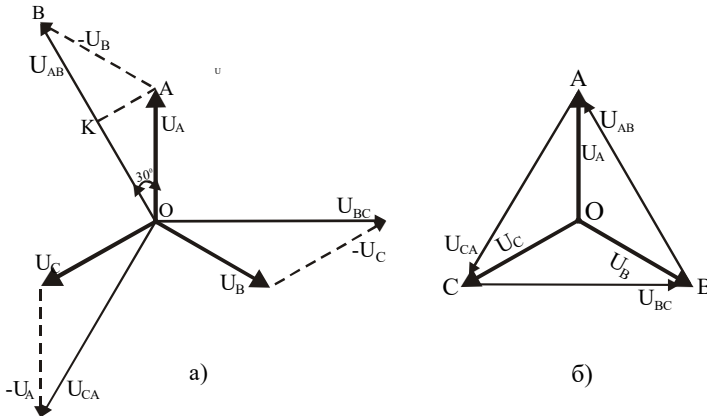


Рисунок 4.2.

Отже, в симетричній трифазній системі лінійні напруги більші фазових в $\sqrt{3}$ разів і рівні за величиною (рис 4.2,б).

Якщо в трифазній чотирипровідній системі (рис.4.1) повні опори фаз нерівні ($Z_A \neq Z_B \neq Z_C$), що має місце, коли до трифазного джерела живлення підключені одно-, дво-, і трифазні споживачі, наприклад, електросвітильники, зварювальні трансформатори і асинхронні двигуни, або обірвався один із лінійних проводів, то фазні напруги у споживачів будуть пропорційні повним опорам фаз. Це призведе до виникнення струму у нейтральному проводі

$$i_0 = i_A + i_B + i_C \quad (4.4)$$

і різниці напруг U_0 між точками 0 $0'$.

Щоб краще це зрозуміти, розглянемо випадок, коли до трифазної чотирипровідної мережі (рис.4.3,а) під'єднані споживачі, повні провідності яких $Y_A \neq Y_B \neq Y_C$, а $U_\phi = U_A = U_B = U_C$. За цих умов фазні струми $I_A = U'_A Y_A$, $I_B = U'_B Y_B$ і $I_C = U'_C Y_C$. Застосувавши до точки $0'$ перший закон Кіргофа в символічній формі, запишемо:

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = \dot{I}_0. \quad (4.5)$$

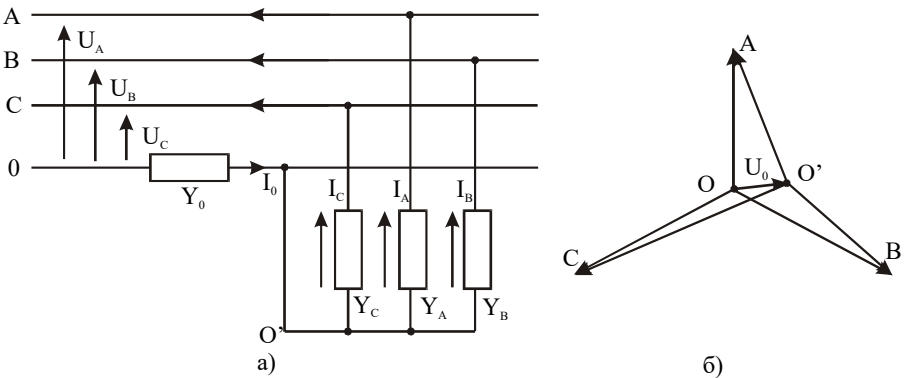


Рисунок 4.3

Символічний метод, побудований на представленні векторів комплексними числами, на відміну від векторних діаграм дозволяє одержати аналітичні залежності для розрахунку кінл змінного синусоїдного струму. За цим методом синусоїдні функції, наприклад, струм i_A , записують в такій формі :

$$i_A = I_{mA} \sin(\omega t + \psi_i) = I_{mA} e^{j(\omega t + \psi_i)} = I_{mA} e^{j\omega t} \cdot e^{j\psi_i} = \dot{I}_A e^{j\omega t},$$

де $\dot{I}_A = I_{mA} e^{j\psi_i}$ – комплексна амплітуда струму, ψ_i – початкова фаза струму.

Використовуючи символічний метод, струми, які входять в рівняння (3.5), можна виразити через відповідні провідності і напруги. Позначивши фазні напруги джерела живлення через $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$, а напруги на споживачах через $\dot{U}'_A, \dot{U}'_B, \dot{U}'_C$, одержимо

$$\begin{aligned} \dot{I}_0 &= \dot{U}_0 Y_0; \\ \dot{I}_A &= \dot{U}'_A Y_A = (\dot{U}_A - \dot{U}_0) Y_A; \\ \dot{I}_B &= \dot{U}'_B Y_B = (\dot{U}_B - \dot{U}_0) Y_B; \\ \dot{I}_C &= \dot{U}'_C Y_C = (\dot{U}_C - \dot{U}_0) Y_C. \end{aligned} \quad (4.6)$$

Склавши ці рівняння, матимемо

$$\dot{U}_A Y_A + \dot{U}_B Y_B + \dot{U}_C Y_C = \dot{U}_0 (Y_A + Y_B + Y_C + Y_0),$$

звідки

$$\dot{U}_0 = \frac{\dot{U}_A Y_A + \dot{U}_B Y_B + \dot{U}_C Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C + Y_0}. \quad (3.7)$$

Рівняння (4.7) дозволяє за фазними напругами джерела живлення і провідностями Y_A, Y_B, Y_C, Y_0 визначити напругу \dot{U}_0 між нейтральними точками, знаючи яку, за формулами знаходять напруги на споживачах і струми в кожному з них.

На рис. 4.3,б наведена векторна діаграма напруг, яка може бути побудована, якщо за формулою (4.7) визначимо \dot{U}_0 , і яка показує зміщення нейтральної точки у споживачів. Це призводить до перенапруги на фазі С і значного зменшення напруги фази А, що є небажано, а при значній зміні – недопустимо.

Якщо нейтрального проводу немає (обрив проводу), то в формулі (4.7) потрібно вважати $Y_0 = 0$, що призведе до збільшення перекосу фазних напруг на споживачах електроенергії. Тому, проектуючи мережі електропостачання, намагаються забезпечити рівномірне завантаження фаз.

Якщо навантаження симетричне, що буває коли ним є асинхронні і синхронні двигуни та інші трифазні пристрої, то струм в

нейтральному (нульовому) проводі $I_0 = 0$. Тому трифазні двигуни змінного струму і інші трифазні пристрої під'єднують до мережі живлення трижильними кабелями(трьома проводами).

При симетричному навантаженні немає потреби розраховувати струми всіх фаз, а достатньо лише однієї. Розрахунки ведуть за законом Ома

$$I_A = I_B = I_C = I_\phi = \frac{U_\phi}{Z_\phi} \quad \text{і} \quad \cos \varphi_\phi = \frac{r_\phi}{Z_\phi}, \quad (4.8)$$

де r_ϕ і Z_ϕ – активний і повний опори фаз.

При несиметричному навантаженні, що буває коли до однієї мережі під'єднують асинхронні двигуни, освітлення, зварювальні трансформатори тощо, визначають струми кожної фази, як було викладено вище.

Оскільки опір нейтрального проводу Z_0 значно менший від опору фази, то їм при розрахунках інколи нехтують, тобто вважають $Z_0 = 0$. У цьому випадку напруги на споживачах рівні і зсунуті на кут $\varphi = 2\pi/3$. За цієї умови струми фаз

$$I_A = \frac{U_A}{Z_A}; \quad I_B = \frac{U_B}{Z_B} \quad \text{і} \quad I_C = \frac{U_C}{Z_C}, \quad (4.9)$$

де Z_A, Z_B і Z_C – повні опори відповідних фаз, а $U_A = U_B = U_C = U_\phi$.

Визначивши кути зсуву фаз струмів відповідно напруг за формулами

$$\cos \varphi_A = \frac{r_A}{Z_A}; \quad \cos \varphi_B = \frac{r_B}{Z_B} \quad \text{і} \quad \cos \varphi_C = \frac{r_C}{Z_C}, \quad (4.10)$$

будують векторну діаграму струмів (рис.4.4) і на її підставі визначають струм у нейтральному проводі

$$\bar{I}_0 = \bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C. \quad (4.11)$$

Таке спрощення розрахунків чотирипровідних кіл допускається тоді, коли несиметрія навантаження не перевищує необхідної точності розрахунків.

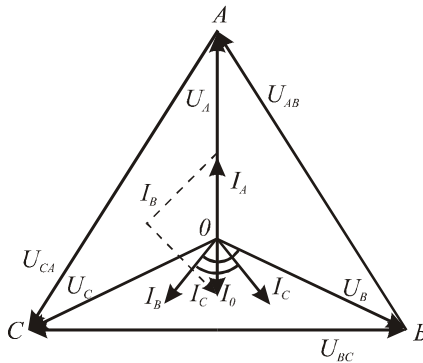


Рисунок 4.4.

Граничним випадком нерівномірного навантаження фаз в чотири провідній системі трифазного споживача, під'єданого за схемою зірка, є обрив однієї із фаз ($Z_{\phi} = \infty$). Так, при обриві фази A і симетричному навантаженні не буде струму в споживачі, який живиться від фази A , а у двох інших фазах, які знаходяться під напругою, струми не зміняться.

Якщо навантаження фаз було нерівномірним, то при обриві фази A зміняться режими роботи в інших фазах. Дійсно, до обриву фази A струм в нульовому проводі визначався рівнянням /4.11/, а після обриву ($I_A = 0$) буде справедлива рівність

$$\bar{I}_0 + \bar{I}_B + \bar{I}_C = 0. \quad (4.12)$$

Векторна діаграма для цього випадку при навантаженні фаз активними опорами ($R_B \neq R_C$) наведена на рис. 4.5, а. Із діаграми видно, що струм у нульовому проводі значно збільшився і знаходиться у протифазі з геометричною сумою струмів в фазах B і C , а фазні і лінійні напруги не змінилися.

На рис. 4.3, б показана векторна діаграма фазних напруг в чотирипровідній системі при нерівномірному навантаженні фаз. Якщо у такій системі обірвати нульовий провід, то це призведе до ще більшо-

го перерозподілу фазних напруг. Це зумовлене тим, що струм, який протікав по нульовому проводу, дещо вирівнював фазні напруги. При обриві нульового проводу падіння напруг в фазах будуть прямопропорційними опорам фаз, тобто у фазі з більшим опором напруга буде більшою і навпаки. Між нульовою точкою генератора (трансформатора) і нульовою точкою споживача буде діяти напруга U_0 , пропорційна величині струму, який протікав до обриву нульового проводу.

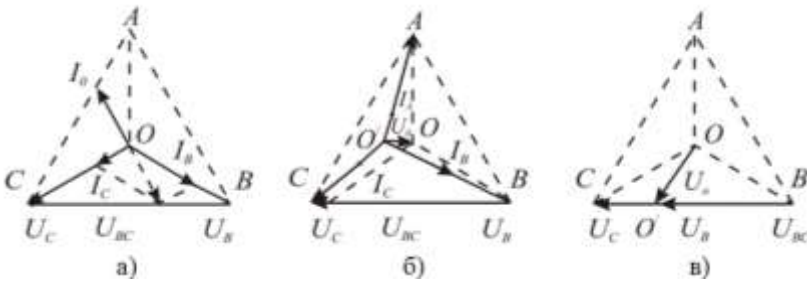


Рисунок 4.5.

На рис. 4.5, б зображена векторна діаграма напруг і струмів для випадку нерівномірного навантаження ($R_C < R_A < R_B$) при обриві нульового проводу. Із діаграми видно, що трикутник лінійних напруг залишився без зміни, а зірка фазних напруг змінилась із-за напруги U_{00} .

Якщо в розглянутій системі додатково виникає обрив, наприклад, фази A , то фази B і C будуть з'єднані послідовно. Фазні струми I_B і I_C , які протікатимуть через послідовно з'єднані фазні опори споживача, будуть однаковими, а фазні напруги – прямо пропорційними опорам фаз. Тому на векторній діаграмі (рис. 4.5, в) точка O' перемістилась на вектор лінійної напруги \bar{U}_{BC} . Якщо при цьому будемо зменшувати опір фази C , то точка O' буде зміщуватись вліво і напруга U_{00} буде наближатись до фазної напруги джерела живлення. Отже, при нерівномірному навантаженні фаз і обриві нульового проводу величина вузлової напруги U_{00} буде залежати від співвідношення опорів фаз і може наближатись до фазної напруги. Розподіл напруг між фазами буде також залежати від їх опорів, що погіршить живлення споживачів і порушить нормальний режим їх роботи. Тому в чотирипровідних колах трифазного струму не ставлять

запобіжник на нульовому проводі, перегорання якого призведе до перерозподілу (перекосу) фазних напруг.

Чотирипровідні трифазні мережі являються основними в системах електропостачання низької напруги ($U < 1000$ В). В таких мережах нейтральний провідник заземлюють на трансформаторній підстанції і /повторно/ на опорах ліній електропередач. При цьому побутові споживачі, наприклад, освітлення, побутова техніка, під'єднують до фазної напруги, яка дорівнює 220 В, а силове навантаження – до лінійної напруги 380 В.

В трифазній системі активна і реактивна потужності дорівнюють відповідно сумі активних і реактивних потужностей фаз:

$$\begin{aligned} P &= U_A I_A \cos \varphi_A + U_B I_B \cos \varphi_B + U_C I_C \cos \varphi_C; \\ Q &= U_A I_A \sin \varphi_A + U_B I_B \sin \varphi_B + U_C I_C \sin \varphi_C; \end{aligned} \quad (4.13)$$

і тільки в симетричній системі

$$P = 3U_\phi I_\phi \cos \varphi, \quad Q = 3U_\phi I_\phi \sin \varphi, \quad (4.14)$$

Повна потужність

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}. \quad (4.15)$$

2. Виконання розрахунків на практичному занятті

Завдання. Для трифазної лінії промислової частоти $f = 50$ Гц (рис.4.6) напругою 380/220В з допомогою вимикачів SA1, SA2, SA3 під'єднуються споживачі - лампи розжарювання з загальною потужністю кожної з фаз P_A , P_B і P_C і номінальною напругою $U_H = 220$ В.

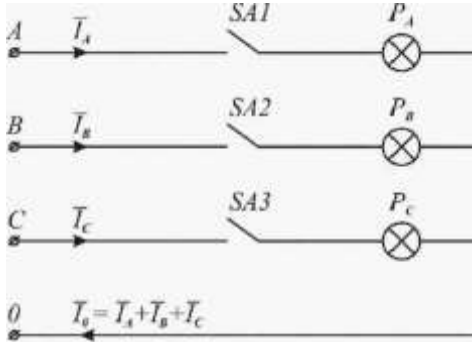


Рисунок 4.6.

Необхідно:

1. Накреслити електричну схему рис. 4.1.
2. Визначити лінійні (фазні) струми споживачів P_A , P_B і P_C
3. Побудувати в масштабі векторну діаграму напруг і струмів фаз і визначити графічно струм I_0 в нейтральному (нульовому) провіді.
4. побудувати векторну діаграму і визначити напругу і струм кожної з фаз при:
 - а) рівномірному навантаженні фаз $P_A = P_B = P_C = 2200\text{Вт}$;
 - б) обриві одної із фаз;

Вихідні значення:

$P_A=2300$ (Вт);

$P_B=3300$ (Вт);

$P_C=4300$ (Вт);

Розв'язок.

2. Лампи розжарювання номінальною напругою $U_H = 220\text{В}$ вмикаються в трифазну чотирьохпровідну мережу 380/ 220 на фазну напругу $U_\phi = 220\text{В}$.

Наявність четвертого (нейтрального) провідника забезпечує си-

метрію фазних напруг навіть при заданому несиметричному навантаженні окремих фаз і тому струм кожної фази може бути визначений за формулами

$$I_A = \frac{P_A}{U_\phi}; I_B = \frac{P_B}{U_\phi} \text{ і } I_C = \frac{P_C}{U_\phi}.$$

$$I_A = \frac{2300}{220} = 10,45(A); I_B = \frac{3300}{220} = 15(A);$$

$$I_C = \frac{4300}{220} = 19,55(A).$$

3. Векторна діаграма напруг зображена на рис.4.2. Де $U_A = U_B = U_C = U_\phi$ - фазні напруги (220 В); $U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U_\Delta$ - лінійні напруги (380 В).

Векторна діаграма струмів зображена на рис.4.8. Де I_A, I_B, I_C - фазні струми споживачів; I_0 - струм нейтрального провідника. З векторної діаграми визначаємо $I_0 = 7,88 (A)$.

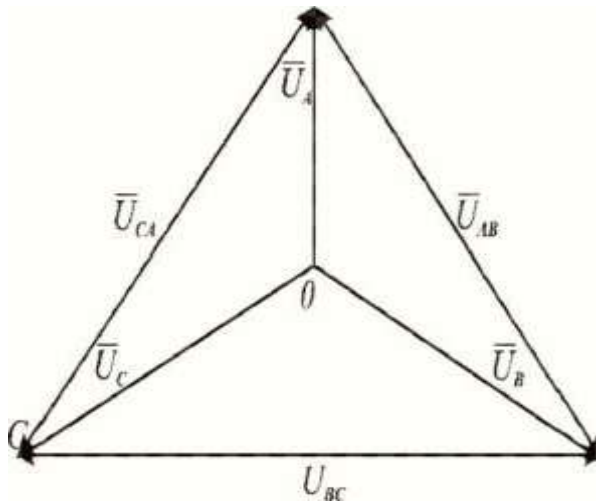


Рисунок 4.7. Векторна діаграма напруг з нульовим провідником.

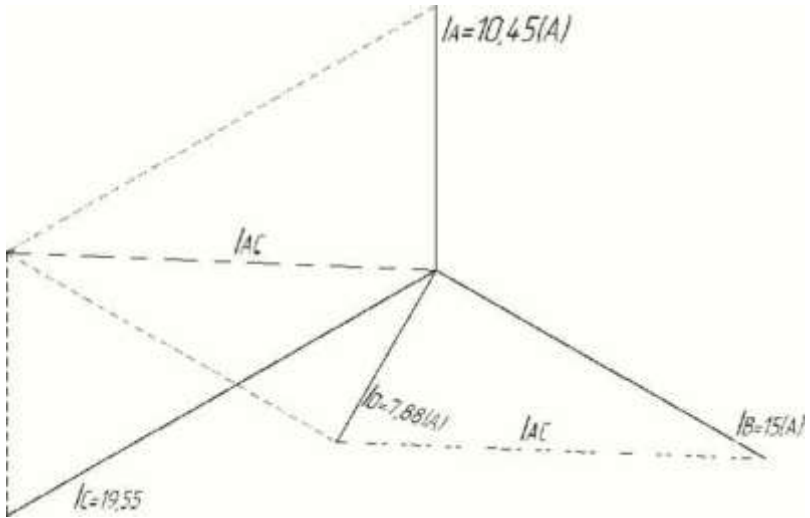


Рисунок 4.8. Векторна діаграма струмів при нерівномірному навантаженні

4а). У випадку рівномірного навантаження усі фазні струми будуть

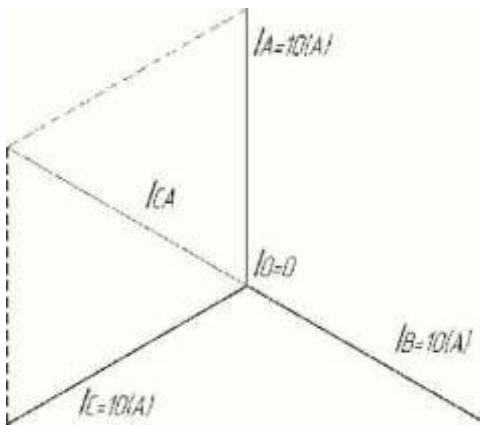


Рисунок 4.9. Векторна діаграма струмів при симетричному навантаженні.

рівними $I_A = I_B = I_C = \frac{2200}{220} = 10(A)$; . А їх сума (струм нульового провідника I_0) буде рівна нулю (рис. 4.9)

Тобто при такому навантаженні нульовий провідник не обов'язковий.

46). У випадку обриву одного з фазних провідників, відповідний фазний струм буде рівний нулю. А струм нульового провідника значно зросте. Зобразимо цей випадок при обриві фази А (рис.4.10).

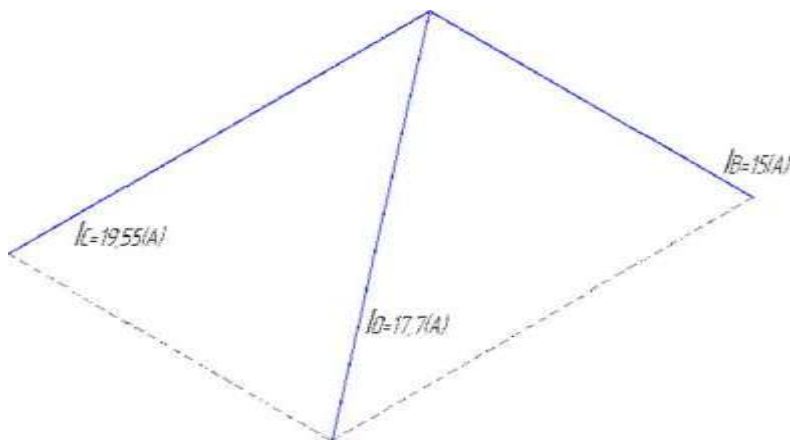


Рисунок 4.10. Векторна діаграма струмів при обриві фази «А»

З векторної діаграми рис. 4.10 знаходимо струм нульового провідника $I_0 = 17,7A$.

3. Домашнє завдання

Виконати розрахунки пунктів 1-4 та побудувати по вихідних даних таблиці 1.

Таблиця 1

Варіант	P_A	P_B	P_C
0	3000	1000	2000
1	3100	1100	2100
2	3200	1200	2200
3	3300	1300	2300
4	3400	1400	2400
5	3500	1500	2500
6	3600	1600	2600
7	3700	1700	2700
8	3800	1800	2800
9	3900	1900	2900

4. Контрольні питання

1. Яке з'єднання називають з'єднанням зіркою ?
2. Які напруги називають лінійними і які - фазними?
3. Яке існує співвідношення між лінійними і фазними напругами ?
4. В якому випадку не буде струму в нульовому проводі ?
5. Чому нульовий провід під'єднують до споживачів без запобіжника ?
6. Як зміниться режим роботи трифазної симетричної системи при обриві нульового проводу ?
7. Як зміниться режим роботи трифазної несиметричної системи при обриві нульового проводу ?
8. Що відбудеться в трифазній чотирипровідній симетричній системі при обриві фазного проводу ?
9. Що відбудеться в трифазній чотирипровідній системі при обриві нульового і фазного проводів ?
10. Як вираховують активну потужність в трифазній системі при нерівномірному навантаженні ?

Практичне заняття №5

Тема: «Розрахунок трансформатора»

1. Теоретичні відомості

При трансформації трифазного струму використовують або три однофазних трансформатори, або трифазний трансформатор з спільним магнітопроводом для всіх трьох фаз. Останній спосіб застосовується в установках середньої та невеликої потужності.

Будова трифазного трансформатора

Трифазний трансформатор уявляє собою конструктивне об'єднання трьох однофазних трансформаторів в одну систему. На зображенні устрою показаний випадок, коли первинні і вторинні обмотки фаз з'єднані однаково – за схемою “зірка”.

На практиці використовується і інша схема, коли обмотки вищої напруги з'єднані “зіркою”, а обмотки нижчої напруги – “трикутником”. Схему з'єднань обмоток трансформатора позначають

дробом $\frac{Y}{Y}$ або $\frac{Y}{\Delta}$ (чисельник – спосіб з'єднання обмоток вищої напруги, знаменник – з'єднання обмоток нижчої напруги).

В стрижнях 1, 2, 3 трифазного трансформатора відповідно виникають магнітні потоки Φ_A , Φ_B , Φ_C , пропорційні прикладеним до первинних обмоток фазним напругам U_A , U_B , U_C .

Оскільки обмотки фаз ідентичні, то будуть однакові амплітудні значення магнітних потоків Φ_{mA} , Φ_{mB} , Φ_{mC} . Сума магнітних потоків через властивості трифазної системи ($\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C = 0$) також дорівнює нулю, що дозволяє магнітопровід трифазного трансформатора робити тристрижневим.

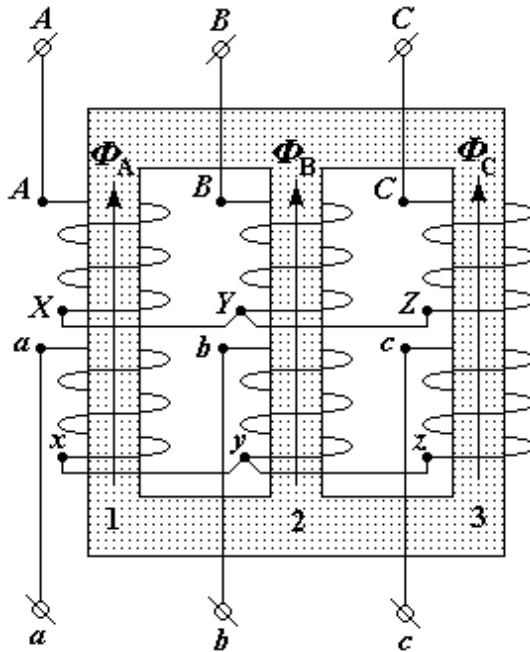


Рисунок 5.1.

При з'єднанні обмоток трансформатора «зіркою» або «трикутником» потрібно знати початки і кінці цих обмоток. Початки обмоток вищої напруги прийнято позначати буквами A, B, C , а відповідні їм кінці – буквами X, Y, Z .

Маркування виводів обмоток, що розташовані на одному стрижні, виконується так, що індуковані в них ЕРС, наприклад \dot{E}_{AX} і \dot{E}_{ax} співпадають за фазою. При неправильному маркуванні ЕРС \dot{E}_{AX} і \dot{E}_{ax} будуть зсунуті за фазою на половину періоду.

Маркування клем обмоток, розташованих на різних стрижнях трифазного трансформатора, повинні бути взаємно узгоджені і виконані так, щоб позитивні напрямки магнітних потоків у всіх трьох стрижнях були однаковими. В іншому випадку замикання магнітних потоків Φ_A, Φ_B, Φ_C в тристрижневому магнітопроводі неможливе.

Групи з'єднання обмоток трифазного трансформатора.

В обмотках вищої і нижчої напруги, які розміщені на одному стрижні, індукуються ЕРС, що співпадають за фазою. ЕРС, які виникають між однойменними клемми вищої і нижчої напруги (лінійні ЕРС), наприклад ЕРС \dot{E}_{AB} і \dot{E}_{ab} можуть або співпадати за фазою, або бути зсунуті взаємно одна одної на кут, що кратний 30° .

Розглянемо трифазний трансформатор із з'єднанням обмоток $\frac{Y}{\Delta}$.

Стрілками показані позитивні напрямки ЕРС. Векторна діаграма фазних ЕРС обмоток трансформатора має вигляд:

Вектор \dot{E}_{AB} будується як геометрична сума фазних ЕРС, що зустрічаються на шляху обходу від клемми A до клемми B . На цьому шляху зустрічаються дві ЕРС \dot{E}_A і \dot{E}_B , причому ЕРС E_B приймається із знаком «+» (оскільки її позитивний напрямок співпадає з напрямком обходу), а ЕРС E_A із знаком «-».

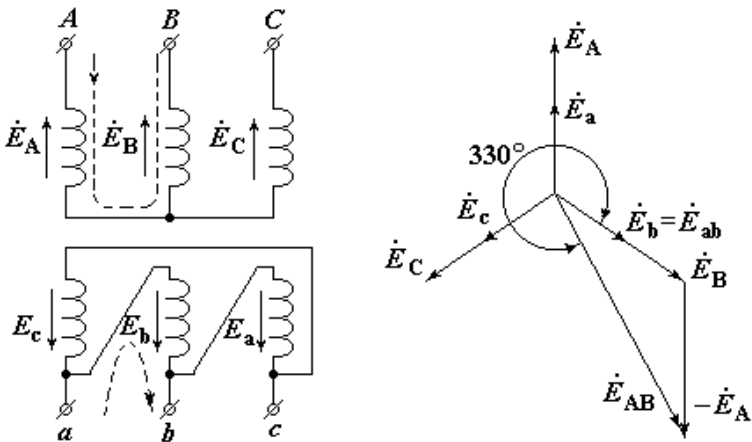


Рисунок 5.2.

Вектор \overline{E}_{ab} , як це видно з діаграми, складається тільки з вектора \overline{E}_b .

Кут між ЕРС \bar{E}_{AB} і \bar{E}_{ab} (і відповідно між іншими парами ЕРС) складає 330° .

Розглянемо з'єднання $\frac{Y}{Y}$.

Кут між ЕРС \bar{E}_{AB} і \bar{E}_{ab} тут складає 360° (ЕРС співпадають за фазою).

Кут між однойменними лінійними ЕРС обмоток вищої і нижчої напруг визначає так звану **групу з'єднання обмоток трансформатора**. Величину цього кута прийнято умовно показувати чис-

лом, кожній одиниці якого відповідає 30° . Так для $\frac{Y}{\Delta}$ маємо групу

11 ($330^\circ : 30^\circ = 11$), а для $\frac{Y}{Y}$ маємо групу **12** ($360^\circ : 30^\circ = 12$).

Прийнята система позначення груп з'єднання пов'язана з наочним зображенням зсуву фаз годинниковими стрілками циферблату. Вектор лінійної ЕРС обмотки вищої напруги співпадає з хвилинною стрілкою, що показує на 12. Вектор ЕРС обмотки нижчої напруги співпадає з годинною стрілкою. Тоді число, на яке вказує годинна стрілка, визначає групу з'єднання

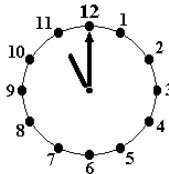


Рисунок 5.3.

Використовуючи різні схеми з'єднання обмоток можна отримати різні групи з'єднання. Різноманітність груп з'єднання незручна для експлуатації трансформаторів. Тому стандарт обмежує кількість різних схем і груп з'єднань – трьома:

$$\frac{Y}{Y_0} - 12; \quad \frac{Y}{\Delta} - 11; \quad \frac{Y_0}{\Delta} - 11.$$

Числа 12 і 11 вказують на групу з'єднання, а індекс «0» – наявність виведеної на кришку трансформатора нульової точки.

2. Виконання розрахунків на практичному занятті

Трифазний трансформатор має номінальну потужність S_n кВА; номінальні лінійні напруги: вищу U_1 , нижчу U_2 , B , потужності втрат: холостого ходу p_0 , короткого замикання p_k ; напругу короткого замикання U_k млн. т.у.п

Необхідно визначити:

1. Номінальні струми у первинній і вторинній обмотках.
2. К.К.Д трансформатора при $\cos_2=0,8$ і коефіцієнтах навантаження $\beta=0,25; 0,5; 0,75; 1,0; 1,25$. при номінальній потужності S_n і $\cos_2=0,8$. З'єднання обмоток трансформатора «зірка – зірка».
3. Відносні втрати напруги при коефіцієнтах навантаження $\beta=0,25; 0,5; 0,75; 1,0; 1,25$ при номінальній потужності S_n і $\cos_2=0,8$.
4. Побудувати залежності $U_2 = f(\beta)$ і $\eta = f(\beta)$.

Вихідні дані:

Вища напруга, кВ: 6;
Нижча напруга, В: 220 В;
Номінальна потужність S_n , кВА : 9;
Напруга к.з. U_k , %: 4,5;
Потужність p_0 , Вт: 100;
Потужність p_k , Вт: 290;
Струм х. ходу I_0 , %: 4.

Розв'язок.

Номінальні струми первинної вторинної обмотки трансформатора визначають за формулами:

$$I_{1н} = \frac{S_n \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot U_{1н}} = 0.87 \text{ (A)};$$

$$I_{2н} = \frac{S_n \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot U_{2н}} = 23.6 \text{ (A)}$$

Коефіцієнт корисної дії трансформатора розраховують за формулою:

$$\eta = \frac{\beta P_n \cdot 10^3}{\beta p_n \cdot 10^3 + p_0 + \beta^2 p_k} \cdot 100$$

де β - відношення фактичного навантаження до номінального (коефіцієнт навантаження);

$P_n = S_n \cos\varphi_2$ - номінальна активна потужність трансформатора.

$$P_n = S_n \cos\varphi_2 = 9000 \cdot 0,8 = 7,2 \text{ кВт};$$

Для $\beta = 0,25$:

$$\eta = \frac{\beta P_n \cdot 10^3}{\beta p_n \cdot 10^3 + p_0 + \beta^2 p_k} \cdot 100 = \frac{0,5 \cdot 7200}{0,5 \cdot 7200 + 100 + 0,5^2 \cdot 290} \cdot 100\% = 95,4\%;$$

Для $\beta = 0,75$:

$$\eta = \frac{\beta P_n \cdot 10^3}{\beta p_n \cdot 10^3 + p_0 + \beta^2 p_k} \cdot 100 = \frac{0,75 \cdot 7200}{0,75 \cdot 7200 + 100 + 0,75^2 \cdot 290} \cdot 100\% = 95,3\%$$

Для $\beta = 1$:

$$\eta = \frac{\beta P_n \cdot 10^3}{\beta p_n \cdot 10^3 + p_0 + \beta^2 p_k} \cdot 100 = \frac{1 \cdot 7200}{1 \cdot 7200 + 100 + 1^2 \cdot 290} \cdot 100\% = 94,9\%;$$

Для $\beta = 1,25$:

$$\eta = \frac{\beta P_n \cdot 10^3}{\beta p_n \cdot 10^3 + p_0 + \beta^2 p_k} \cdot 100 = \frac{1,25 \cdot 7200}{1,25 \cdot 7200 + 100 + 1,25^2 \cdot 290} \cdot 100\% = 94,2\%;$$

Результати обчислень запишемо в таблицю 5.1.

Таблиця 5.1.

β	0	0,25	0,5	0,75	1	1,25
$\eta, \%$	0	93,8	95,4	95,3	94,9	94,2

Відносний (% від U_{1H}) спад напруги в обмотці трансформатора обчислюють за формулою:

$$\Delta U, \% = \beta(\Delta U_a \cos\varphi_2 + \Delta U_p \sin\varphi_2), \%$$

де $\Delta U_{a\%} = \frac{P_k}{S_n \cdot 10^3} \cdot 100\%$ - активна складова напруги короткого замикання;

$\Delta U_p = \sqrt{U_k^2 - \Delta U_a^2}$ - реактивна складова напруги короткого замикання.

$$\Delta U_{a\%} = \frac{P_k}{S_n \cdot 10^3} \cdot 100\% = \frac{290}{9000} \cdot 100\% = 3,22\%.$$

$$\Delta U_p = \sqrt{U_k^2 - \Delta U_a^2} = \sqrt{4,5^2 - 3,22^2} = 5,53\%.$$

Для $\beta=0,25$:

$$\Delta U, \% = \beta(\Delta U_a \cos\varphi_2 + \Delta U_p \sin\varphi_2) = 0,25(3,22 \cdot 0,8 + 5,53 \cdot 0,6) = 1,47\%$$

Для $\beta=0,5$:

$$\Delta U, \% = \beta(\Delta U_a \cos\varphi_2 + \Delta U_p \sin\varphi_2) = 0,5(3,22 \cdot 0,8 + 5,53 \cdot 0,6) = 2,95\%$$

Для $\beta=0,75$:

$$\Delta U, \% = \beta(\Delta U_a \cos\varphi_2 + \Delta U_p \sin\varphi_2) = 0,75(3,22 \cdot 0,8 + 5,53 \cdot 0,6) = 4,42\%$$

Для $\beta=1$:

$$\Delta U, \% = \beta(\Delta U_a \cos\varphi_2 + \Delta U_p \sin\varphi_2) = 1(3,22 \cdot 0,8 + 5,53 \cdot 0,6) = 5,9\%$$

Для $\beta=1,25$:

$$\Delta U, \% = \beta(\Delta U_a \cos\varphi_2 + \Delta U_p \sin\varphi_2) = 1,25(3,22 \cdot 0,8 + 5,53 \cdot 0,6) = 7,37\%$$

Результати обчислень запишемо в таблицю 5.2.

Таблиця 5.2.

β	0	0,25	0,5	0,75	1	1,25
$\Delta U, \%$	0	1,47	2,95	4,42	5,9	7,37

За даними таблиць 5.1 та 5.2 побудуємо відповідні графіки:

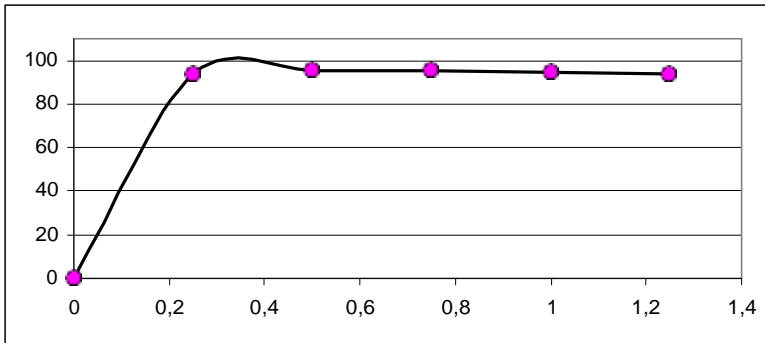


Рисунок 5.1. Графік залежності $\eta=f(\beta)$

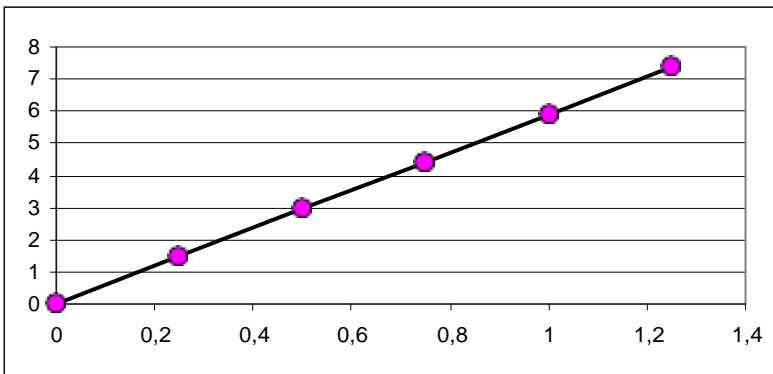


Рисунок 5.2. Графік залежності $\Delta U=f(\beta)$

3. Домашнє завдання

Виконати розрахунки пунктів 1-4 та побудувати графіки залежностей по вихідних даних таблиць 5.3 та 5.4.

Таблиця 5.3.

Одиниці у шифру	Напруга	
	Вища кВ	Нижча В
1	6,3	230
2	6,3	400
3	6,3	525
4	10	230
5	10	525
6	10	10500
7	35	6300
8	35	525
9	20	400
0	20	230

Таблиця 5.4.

Десятки у шифрі	Номінальна потужність $S_H, \text{кВА}$	Напруга к.з. $U_K, \%$	Потужність $p_0, \text{Вт}$	Потужність $p_K, \text{Вт}$	Струм х. ходу $I_0, \%$
1	2	3	4	5	6
1	10	4,5	105	335	4,0
2	16	4,5	125	500	3,4
1	2	3	4	5	6
3	25	4,5	135	690	3,2
4	40	4,7	175	1880	3,0
5	63	4,5	240	1280	2,8
6	100	4,5	330	1970	2,6
7	160	4,5	510	2650	2,4
8	250	4,7	740	370	2,3
9	400	4,5	950	5500	2,1
0	630	5,5	1310	7600	2

4. Контрольні питання

1. Яке призначення силових трансформаторів?
2. Що може бути механічним аналогом трансформатора?

3. Яку потужність трансформатора приймають за номінальну?
4. Яку напругу вторинної обмотки приймають за номінальну?
5. На підставі якого досліду визначають коефіцієнт трансформації трансформатора?
6. Для чого будують векторну діаграму трансформатора?
7. Чи залежить амплітуда основного магнітного потоку від навантаження трансформатора?
8. Як визначають напругу короткого замикання трансформатора?
9. Які втрати потужності мають місце в трансформаторі?
10. Від чого залежить коефіцієнт оптимального навантаження?

ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ

1. Методичні вказівки до лабораторних занять з дисципліни «Основи електротехніки та електроніки» для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за спеціальністю 144 «Теплоенергетика» денної форми навчання / Кулик Н. І., Аврука І. С., Шабловська А. Р. Рівне : НУВГП, 2019. 80 с.

2. Баховець Б. О., Клепач М. І. Електроніка і мікросхемотехніка. Лабораторні роботи. Рівне : Вид. Рівненського державного технічного університету, 1999. 168 с.

4. Кацман М. М. Электрические машины. М. : Высшая школа, 1990. 462 с.

5. Перхач В. С. Теоретична електротехніка. Лінійні кола. К. : Вища школа, 1992. 436 с.

6. Чабан В. Й. Математичне моделювання електромагнітних процесів. К. : НМК ВО, 1992. 390 с.

7. Руденко В. С., Ромашко В. Я., Трифонюк В. В. Промислова електроніка. К. : Либідь, 1993. 432 с.

8. Баховець Б. О., Клепач М. І. Електроніка і мікросхемотехніка. Лабораторні роботи. Рівне: Вид. Рівненського державного технічного університету, 1999. 168 с.

10. Баховець Б. О., Ковальчук Д. М. Практикум з метрології і основ вимірювань. Рівне : Вид. Українського державного університету водного господарства та природокористування, 2003. 132 с.