

Міністерство освіти та науки України
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
Інститут електротехніки та електромеханіки
Кафедра електромеханічної інженерії

ЗБІРНИК ЗАДАЧ З ЗАГАЛЬНОЇ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ

Навчальний посібник
для студентів не електротехнічних спеціальностей

Рекомендовано на засіданні кафедри
Електромеханічної інженерії
Протокол №8 від 15.03.2023 р.

Рекомендовано на засіданні вченої
ради інституту електротехніки та
електромеханіки.
Протокол № 7 від 25.04. 2023 р.

Одеса: Одеська політехніка - 2023

Навчальний посібник «ЗБІРНИК ЗАДАЧ З ЗАГАЛЬНОЇ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ» для студентів неелектротехнічних спеціальностей / Укл. О. Ф. Винаков, Е. В. Савьолова, І. В. Меркулов, Д. А. Івлєв – Одеса: Одеська політехніка, 2023. – 121с.

Рецензент:

Бойко А. О. – проф. кафедри електромеханічної інженерії, директор Інституту електротехніки та електромеханіки Національного університету «Одеська політехніка», д. т. н.

Навчальний посібник «Збірник задач з загальної електротехніки» написаний відповідно до навчальних програм з дисципліни «Електротехніка та електроніка» за спеціальністю «Атомна енергетика».

В складі посібника є теоретичний матеріал за розділами: «Кола постійного струму», «Лінійні електричні кола змінного струму», «Трифазні електричні кола», «Електричні вимірювання», «Трансформатори та електричні машини»; приклади рішення задач та завдання для самостійної роботи, які також можуть бути використані під час проведення практичного заняття.

Посібник може стати в нагоді студентам інших спеціальностей для більш заглибленого вивчення загальної електротехніки та здобуття необхідних компетенцій.

Укладачі: О. Ф. Винаков, доцент
Е. В. Савьолова, ст. викл.
І. В. Меркулов, ст. викл.
Д. А. Івлєв, доцент

Зміст

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	5
1.1 Загальні теоретичні положення	5
1.2 Методика розв'язання типових завдань	7
1.3 Завдання для самостійної роботи	15
1.4 Контрольні завдання	18
РОЗДІЛ 2. ЛІНІЙНІ ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ЗМІННОГО СТРУМУ	22
2.1 Загальні теоретичні положення	22
2.2 Методика розв'язання типових завдань	30
2.3 Завдання для самостійної роботи	35
2.4 Контрольні завдання	39
РОЗДІЛ 3. ТРИФАЗНІ ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА	42
3.1 Загальні теоретичні положення	42
3.2 Методика розв'язання типових завдань	48
3.3 Завдання для самостійної роботи	56
3.4 Контрольні завдання	58
РОЗДІЛ 4. ЕЛЕКТРИЧНІ ВИМІРЮВАННЯ	60
4.1 Вступ.....	60
4.2 Основні метрологічні поняття	60
4.3 Похибки вимірювань	62
4.4 Вмикання електровимірювальних приладів і поширення границь вимірювання	66
4.5 Визначення результату опосередкованого вимірювання	67
4.6 Приклади організації електричних вимірювань	68
4.7 Методика розв'язання типових завдань	73
4.8 Завдання для самостійної роботи	80
4.9 Контрольні завдання	82
РОЗДІЛ 5. ТРАНСФОРМАТОРИ ТА ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ.....	83
5.1 Трансформатори	83
5.2 Асинхронні двигуни.....	95
5.3 Машини постійного струму	100
5.4 Вибір електричного двигуна для приводу виробничого механізму ..	107
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	121

ВСТУП

Тенденція в сучасній вищій школі – збільшення часу на самостійну роботу студента і можливість самостійно тестувати свої вміння. Це визначило структуру даного посібника.

Пропонований посібник відповідає навчальній програмі з електротехнічних дисциплін неелектричних спеціальностей. Посібник створено з метою організації навчального процесу таким чином, щоб активізувати самостійну роботу студентів. Посібник включає розділи: «Кола постійного струму», «Лінійні електричні кола змінного струму», «Електричні вимірювання», «Трифазні електричні кола». В кожному розділі є загальні теоретичні положення, методика рішення типових завдань, завдання для самостійної роботи і контрольні завдання до опрацювання в аудиторії під час проведення практичних занять. Така структура посібника дає можливість студенту самостійно навчитися рішенню задач з загальної електротехніки і також використовувати посібник на практичних заняттях.

Автори присвячують видання посібника «Збірник задач з загальної електротехніки» приват-професору, к.т.н. Гололобову В.В., який багато років очолював кафедру «Загальна електротехніка».

Автори висловлюють подяку рецензенту проф. Бойко А.О.

РОЗДІЛ 1. КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

1.1 Загальні теоретичні положення

Лінійні електричні кола постійного струму з одним джерелом живлення розраховуються методом згортання схеми, в якому окремі групи послідовно або паралельно сполучених опорів замінюються еквівалентними. У результаті складна розгалужена схема з'єднання опорів зводиться до одного еквівалентного (вхідного) опору, підключеного до затискачів джерела живлення.

Розглянемо схему на рис. 1.1 а). В неї опори R_4 та R_5 сполучені паралельно. Замінивши їх резистором R_{45} , значення опору якого знаходимо $R_{45} = \frac{R_4 \cdot R_5}{R_4 + R_5}$, отримуємо схему за на рис. 1.1 б), де резистори R_3 та R_{45} сполучені послідовно, тоді $R_{35} = R_3 + R_{45}$. Оскільки на ділянці ас послідовно з'єднані резистори R_3 , R_{45} паралельно до них резистор R_2 , то й опір всієї цієї групи розраховується $R_{ac} = \frac{R_2 \cdot R_{345}}{R_2 + R_{345}}$. Отримаємо схему за рис. 1.1 в).

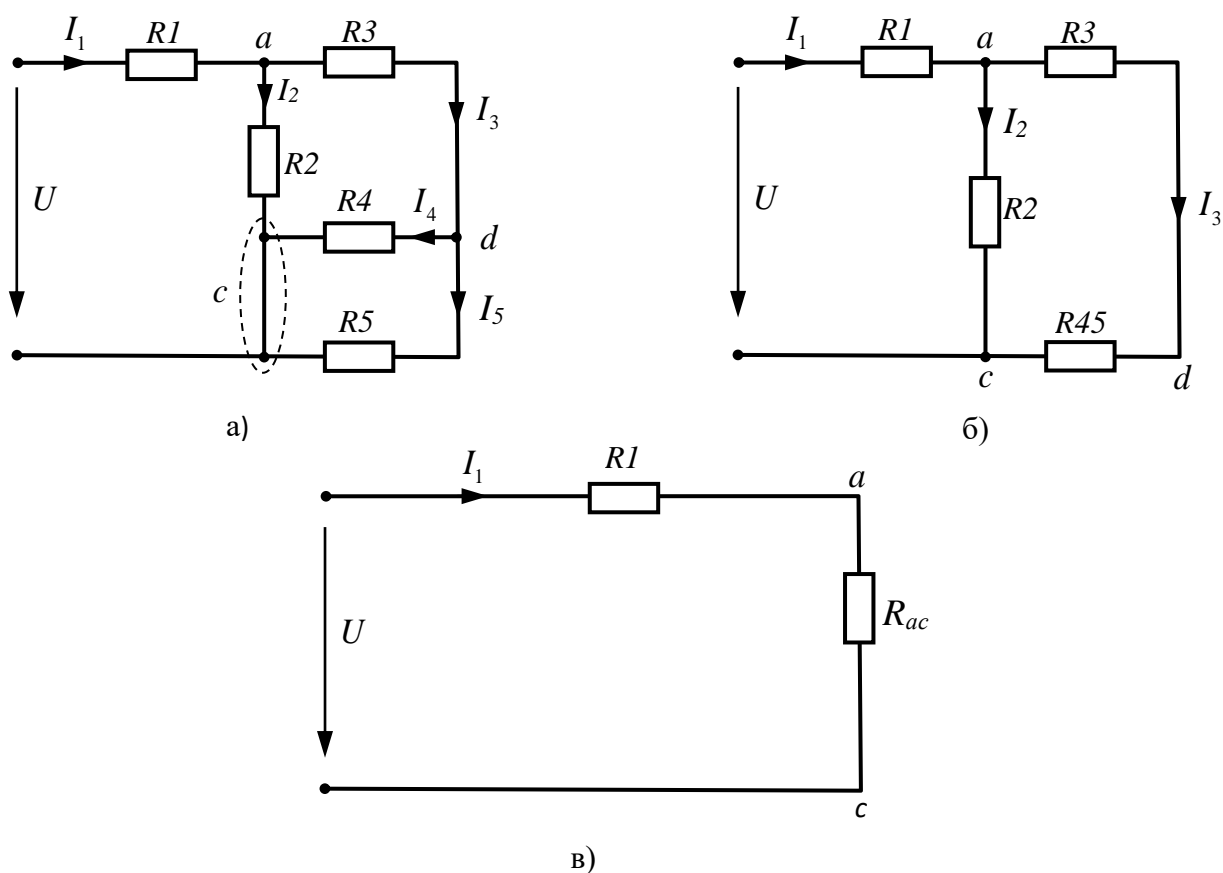


Рисунок 1.1 – Покрокове перетворення схеми

Струм I_1 визначається за законом Ома:

$$I_1 = \frac{U}{R_1 + R_{ac}}.$$

Напруга на ділянці ac :

$$U_{ac} = I_1 \cdot R_{ac} \quad \text{або} \quad U_{ac} = U - I_1 \cdot R_1.$$

Струми паралельно з'єднаних ділянок (див. рис. 1.1 б):

$$I_2 = \frac{U_{ac}}{R_2}; \quad I_3 = \frac{U_{ac}}{R_{345}}.$$

Струми паралельно з'єднаних ділянок схеми з резисторами R_4 та R_5 (див. рис. 1.1 а):

$$I_4 = \frac{U_{bd}}{R_4} = \frac{R_5}{R_4 + R_5} \cdot I_3;$$
$$I_5 = \frac{U_{bd}}{R_5} = \frac{R_4}{R_4 + R_5} \cdot I_3.$$

Напруга на будь-якому k -му елементі схеми визначається за законом Ома:

$$U_k = I_k \cdot R_k.$$

Для перевірки вірності розрахунку можна скористатися першим законом Кірхгофа і рівнянням балансу потужності, що для розглянутої схеми (див. рис. 1.1 а) мають вигляд

$$I_1 = I_2 + I_3; \quad I_3 = I_4 + I_5;$$

$$U \cdot I_1 = I_1^2 \cdot R_1 + I_2^2 \cdot R_2 + I_3^2 \cdot R_3 + I_4^2 \cdot R_4 + I_5^2 \cdot R_5.$$

Основним методом розрахунку розподілу струмів в розгалужених лінійних колах є метод рівнянь Кірхгофа. Нехай коло, яке потрібно розрахувати, містить m віток і n вузлів. Оскільки в кожній з віток діє свій струм, то число невідомих струмів дорівнює числу віток, і для їх визначення потрібно скласти m рівнянь.

Послідовність операцій розрахунку:

- а) спрощують схему, зробивши еквівалентні перетворення ділянок, що не містять джерел, але з послідовним або паралельним з'єднанням опорів;
- б) позначають струми у всіх вітках ($I_1, I_2, I_3, \dots, I_m$), довільно вибирають їх позитивні напрями і позначають на схемі ці напрями стрілками;
- в) складають по першому закону Кірхгофа рівняння $(n-1)$ вузлів;
- г) бракуючи $m-(n-1)$ рівняння складають по другому закону Кірхгофа.

Обирають $m-(n-1)$ взаємно незалежних контурів так, щоб в кожен наступний контур входила хоча б одна вітка, яка не враховувалася в раніше складених рівняннях. Вибирають напрями обходу цих контурів (за годинниковою стрілкою або проти) і відповідно позначають їх на схемі.

В результаті виходить система з m -рівнянь. Рішення цієї системи дозволяє визначити не лише числові значення струмів, але і їх дійсні напрями. Якщо рішення привело до негативного знаку якого-небудь струму, то його дійсний напрям є протилежним обраному спочатку позитивному напрямку.

Метод контурних струмів дозволяє зменшити число рівнянь, що складаються за двома законами Кірхгофа, на число рівнянь, записаних по першому закону Кірхгофа.

При вирішенні методом контурних струмів кількість рівнянь визначається числом незалежних контурів $m-(n-1)$, у яких діють умовні контурні струми.

1.2 Методика розв'язання типових завдань

Приклад 1.2.1

Визначити струми у вітках схеми (рис.1.2), якщо відомі параметри її елементів: $E = 12 \text{ V}$, $R_1 = 10 \Omega$, $R_2 = 1 \Omega$, $R_3 = 5 \Omega$, $R_4 = 10 \Omega$, $R_5 = 4 \Omega$, $R_6 = 6 \Omega$.

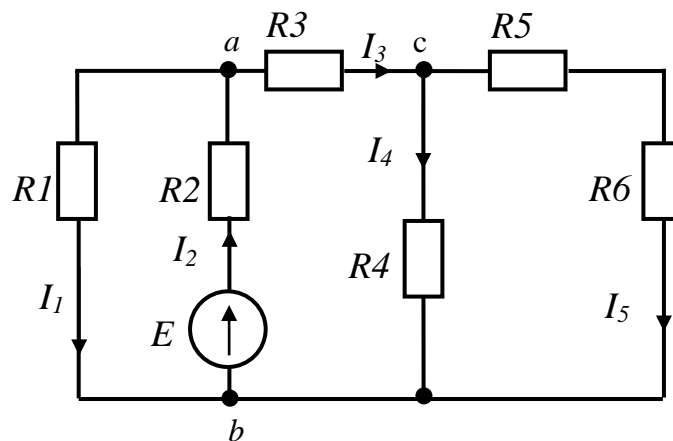


Рисунок 1.2 - Схема електричного кола

Розв'язання

Для знаходження значень струмів в вітках схеми скористуємось методом еквівалентних перетворень. Спростімо початкову схему так, щоб залишилися тільки ідеальне джерело ЕРС і послідовно сполучений з ним еквівалентний резистивний елемент. Перш ніж почати перетворення, позначимо на схемі (рис.1.2) електричні вузли і струми в вітках (орієнтуючись на заданий напрям

ЕРС джерела, вказуємо умовно позитивні напрями струмів). З рис. 1.2 бачимо, що резистори R_5 і R_6 сполучені послідовно і їх еквівалентний опір дорівнює:

$$R_7 = R_5 + R_6 = 4 + 6 = 10 \Omega.$$

Етапи перетворення схеми показані на рис. 1.3.

Резистори R_4 і R_7 увімкнені паралельно (рис. 1.3, а). Знаходимо їх еквівалентний опір

$$R_8 = \frac{R_4 \cdot R_7}{R_4 + R_7} = \frac{10 \cdot 10}{10 + 10} = 5 \Omega$$

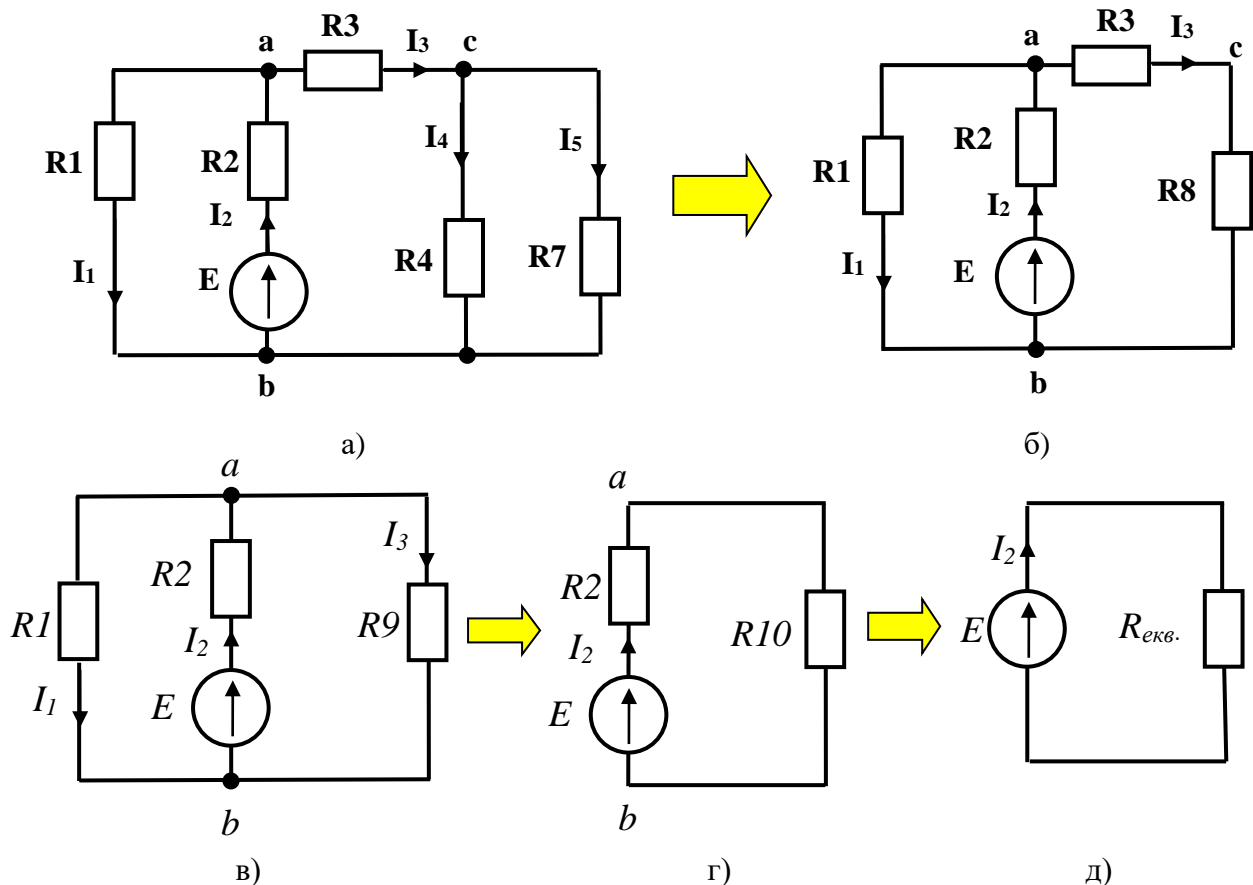


Рисунок 1.3 - Етапи перетворення схеми

Резистори R_3 і R_8 з'єднані послідовно (рис. 1.3, б) і їх еквівалентний опір:

$$R_9 = R_3 + R_8 = 5 + 5 = 10 \Omega$$

Паралельну ділянку ab з резисторами R_1 і R_9 (рис. 1.3, в) замінимо резистором R_{10} , опір якого обчислюємо за формулою:

$$R_{10} = \frac{R_1 \cdot R_9}{R_1 + R_9} = \frac{10 \cdot 10}{10 + 10} = 5 \Omega$$

Резистори R_2 і R_{10} (рис. 1.3, г) сполучені послідовно і їх еквівалентний опір дорівнює:

$$R_{екв} = R_2 + R_{10} = 1 + 5 = 6 \Omega$$

Знаючи еквівалентний опір, розрахуємо струм I_2

$$I_2 = \frac{E}{R_{екв}} = \frac{12}{6} = 2 \text{ A.}$$

Для визначення струмів I_1 і I_3 необхідно знайти напругу U_{ab} (рис. 1.3, в). Скористуємося законом Ома для ділянки кола і знайдемо падіння напруги на резисторі R_{10} (рис. 1.3, г)

$$U_{ab} = I_2 \cdot R_{10} = 2 \cdot 5 = 10 \text{ V.}$$

Тоді значення струмів I_1 і I_3 відповідно:

$$I_1 = \frac{U_{ab}}{R_1} = \frac{10}{10} = 1 \text{ A,}$$

$$I_3 = \frac{U_{ab}}{R_9} = \frac{10}{10} = 1 \text{ A.}$$

Для розрахунку значень струмів I_4 і I_5 необхідно визначити напругу U_{cb} (рис. 1.3, а), яка дорівнює падінню напруги на резисторі R_8 (рис. 1.3, б)

$$U_{cb} = I_3 \cdot R_8 = 1 \cdot 5 = 5 \text{ A.}$$

Визначаємо струми I_4 і I_5 :

$$I_4 = \frac{U_{cb}}{R_4} = \frac{5}{10} = 0,5 \text{ A,}$$

$$I_5 = \frac{U_{cb}}{R_7} = \frac{5}{10} = 0,5 \text{ A.}$$

Перевірку розрахунку здійснюємо, скориставшись першим законом Кірхгофа для вузлів «а» і «с»:

$$I_2 - I_1 - I_3 = 2 - 1 - 1 = 0 \text{ A;}$$

$$I_3 - I_4 - I_5 = 1 - 0,5 - 0,5 = 0 \text{ A.}$$

Приклад 1.2.2

Визначити струми в вітках схеми (рис. 1.4), користуючись законами Кірхгофа, якщо відомі параметри її елементів: $E_1 = 40 \text{ V}$, $E_2 = 60 \text{ V}$, $R_1 = 10 \Omega$, $R_2 = 20 \Omega$, $R_3 = 5 \Omega$, $R_4 = 10 \Omega$, $R_5 = 40 \Omega$.

Розв'язання

Коло містить 3 вітки і 2 вузли. У кожній вітці діє свій струм і для їх визначення необхідно буде скласти 3 рівняння. Перетворимо схему, здійснивши еквівалентні перетворення ділянок з послідовним з'єднанням резисторів.

$$R_{12} = R_1 + R_2 = 10 + 20 = 30 \Omega;$$

$$R_{34} = R_3 + R_4 = 5 + 10 = 15 \Omega$$

Схема після перетворення зображена на рис. 1.4, б).

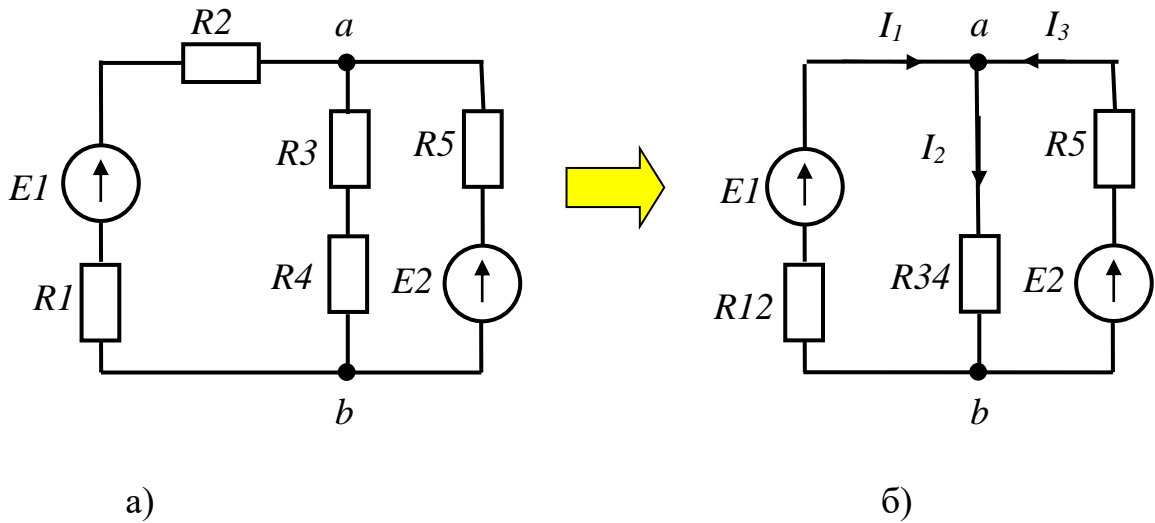


Рисунок 1.4 - Схема електричного кола «а» і перетворена схема «б»

Позначимо електричні вузли і струми в вітках (умовно - позитивні напрями струмів I_1 та I_3 обираємо, орієнтуючись на напрями ЕРС E_1 та E_2 , напрям струму I_2 - довільно). За першим законом Кірхгофа складається кількість рівнянь на одиницю менш, ніж число вузлів. Складаємо рівняння за першим законом Кірхгофа для вузла «а».

$$I_1 + I_3 = I_2$$

Не вистачає ще двох рівнянь, складених за другим законом Кирхгофа для двох взаємно незалежних контурів. Вибравши заздалегідь напрям обходу, здійснюємо обхід за годинниковою стрілкою. Тоді для 1 і 2 контурів рівняння відповідно будуть:

$$E_1 = I_1 \cdot R_{12} + I_2 \cdot R_{34};$$

$$- E_2 = - I_3 \cdot R_5 - I_2 \cdot R_{34}.$$

Система рівнянь, складена по методу законів Кирхгофа матиме вигляд :

$$\begin{cases} I_1 + I_3 = I_2 \\ E_1 = I_1 \cdot R_{12} + I_2 \cdot R_{34} \\ - E_2 = - I_3 \cdot R_5 - I_2 \cdot R_{34} \end{cases}$$

Рішення цієї системи дозволить визначити величину і дійсний напрям шуканих струмів. Підставимо в ці рівняння чисельні значення параметрів елементів електричного кола:

$$\begin{cases} I_1 + I_3 = I_2 \\ 40 = 30I_1 + 15I_2 \\ 60 = - 40I_3 - 15I_2 \end{cases}$$

Вирішуємо цю систему рівнянь і отримаємо наступні значення струмів :

$$I_1 = 0,58 \text{ A};$$

$$I_2 = 1,51 \text{ A};$$

$$I_3 = 0,93 \text{ A}.$$

Приклад 1.2.3

Визначити струми в вітках схеми (рис. 1.5), користуючись методом контурних струмів, якщо відомі параметри її елементів: $E_1 = 40 \text{ V}$, $E_2 = 60 \text{ V}$, $E_3 = 50 \text{ V}$, $R_1 = 10 \ \Omega$, $R_2 = 20 \ \Omega$, $R_3 = 25 \ \Omega$, $R_4 = 30 \ \Omega$, $R_5 = 40 \ \Omega$, $R_6 = 45 \ \Omega$.

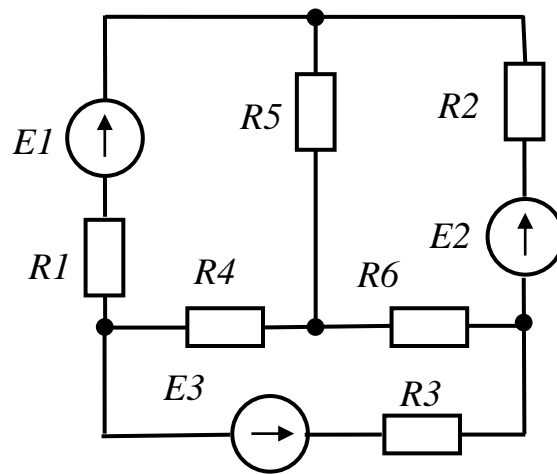


Рисунок 1.5 - Схема електричного кола

Розв'язання

Коло містить 6 віток і 4 вузли. Якщо завдання вирішувати методом законів Кірхгофа, то система мала б 6 рівнянь. По методу контурних струмів досить записати 3 рівняння. Задаємося умовно-позитивними напрямками струмів в вітках (рис. 1.6). Визначаємо незалежні контури. У даній схемі 3 незалежні контури. Задаємося умовно-позитивними напрямками контурних струмів I_{11} , I_{22} , I_{33} .

Для обраних трьох незалежних контурів (рис. 1.6) запишемо рівняння за другим законом Кірхгофа відносно контурних струмів I_{11} , I_{22} , I_{33} :

$$\begin{cases} I_{11}(R_1 + R_4 + R_5) - I_{22}R_5 - I_{33}R_4 = E_1 \\ -I_{11}R_5 + I_{22}(R_2 + R_5 + R_6) - I_{33}R_6 = -E_2 \\ -I_{11}R_4 - I_{22}R_6 + I_{33}(R_3 + R_4 + R_6) = -E_3 \end{cases}$$

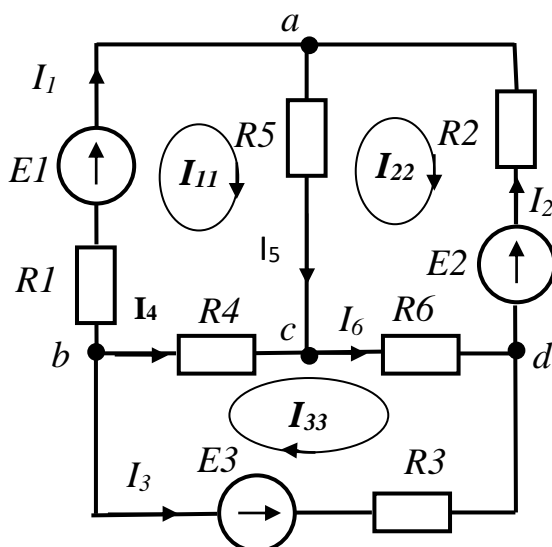


Рисунок 1.6 - Розрахункова схема з вказівкою напрямку контурних струмів і струмів в вітках.

У отриману систему рівнянь підставимо чисельні значення параметрів елементів електричного кола :

$$\begin{cases} 80 \cdot I_{11} - 40 \cdot I_{22} - 30 \cdot I_{33} = 40 \\ -40 \cdot I_{11} + 105 \cdot I_{22} - 45 \cdot I_{33} = -60 \\ -30 \cdot I_{11} - 45 \cdot I_{22} + 100 \cdot I_{33} = -50 \end{cases}$$

Вирішуємо систему рівнянь з трьома невідомими, знаходячи її визначники:

$$\Delta = \begin{vmatrix} 80 & -40 & -30 \\ -40 & 105 & -45 \\ -30 & -45 & 100 \end{vmatrix} = 315500;$$

$$\Delta I_{11} = \begin{vmatrix} 40 & -40 & -30 \\ -60 & 105 & -45 \\ -50 & -45 & 100 \end{vmatrix} = -229500;$$

$$I_{11} = \Delta I_{11} / \Delta = -229500 / 315500 = -0,727 \text{ A};$$

$$\Delta I_{22} = \begin{vmatrix} 80 & 40 & -30 \\ -40 & -60 & -45 \\ -30 & -50 & 100 \end{vmatrix} = -452000;$$

$$I_{22} = \Delta I_{22} / \Delta = -452000 / 315500 = -1,433 \text{ A};$$

$$\Delta I_{33} = \begin{vmatrix} 80 & -40 & 40 \\ -40 & 105 & -60 \\ -30 & -45 & -50 \end{vmatrix} = -430000;$$

$$I_{33} = \Delta I_{33} / \Delta = -430000 / 315500 = -1,363 \text{ A.}$$

Визначаємо струми в вітках:

$$I_1 = I_{11} = -0,727 \text{ A};$$

$$I_2 = -I_{22} = 1,433 \text{ A};$$

$$I_3 = -I_{33} = 1,363 \text{ A};$$

$$I_4 = I_{33} - I_{11} = -1,363 - (-0,727) = -0,636 \text{ A};$$

$$I_5 = I_{11} - I_{22} = -0,727 - (-1,433) = 0,706 \text{ A};$$

$$I_6 = I_{33} - I_{22} = -1,363 - (-1,433) = 0,07 \text{ A.}$$

Приклад 1.2.4

Визначити струми в вітках схеми (рис. 1.7), користуючись методом вузлових напруг, якщо відомі параметри її елементів: $E_1 = 30 \text{ V}$, $E_2 = 50 \text{ B}$, $E_3 = 20 \text{ V}$, $E_4 = 60 \text{ V}$, $R_1 = 30 \Omega$, $R_2 = 20 \Omega$, $R_3 = 25 \Omega$, $R_4 = 15 \Omega$, $R_5 = 40 \Omega$.

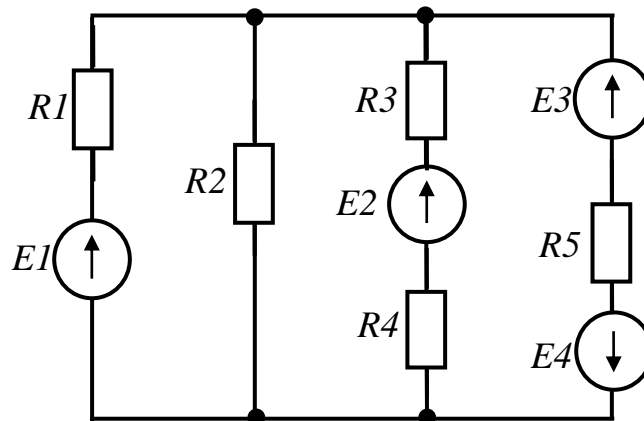


Рисунок 1.7 - Схема електричного кола

Розв'язання

Коло містить 4 вітки і 2 вузли. Тому для вирішення цього завдання використовуємо окремий випадок методу вузлових напруг - метод двох вузлів. Позначимо вузли в схемі, задамося умовно-позитивним напрямом струмів в вітках I_1 , I_2 , I_3 , I_4 і умовно-позитивним напрямом напруги між двома вузлами U_{ab} . Перетворимо послідовно сполучені елементи в еквівалентні. Розрахункова схема приведена на рис. 1.8.

При цьому:

$$R_{34} = R_3 + R_4 = 25 + 15 = 40 \Omega;$$

$$E_{34} = E_4 - E_3 = 60 - 20 = 40 \text{ V.}$$

Визначимо вузлову напругу U_{ab} , яка для цієї схеми матиме вигляд :

$$U_{ab} = \frac{\frac{E_1}{R_1} + \frac{E_2}{R_{34}} - \frac{E_{34}}{R_5}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_{34}} + \frac{1}{R_5}} = \frac{\frac{30}{30} + \frac{50}{40} - \frac{40}{40}}{\frac{1}{30} + \frac{1}{20} + \frac{1}{40} + \frac{1}{40}} = 9,375 \text{ V}$$

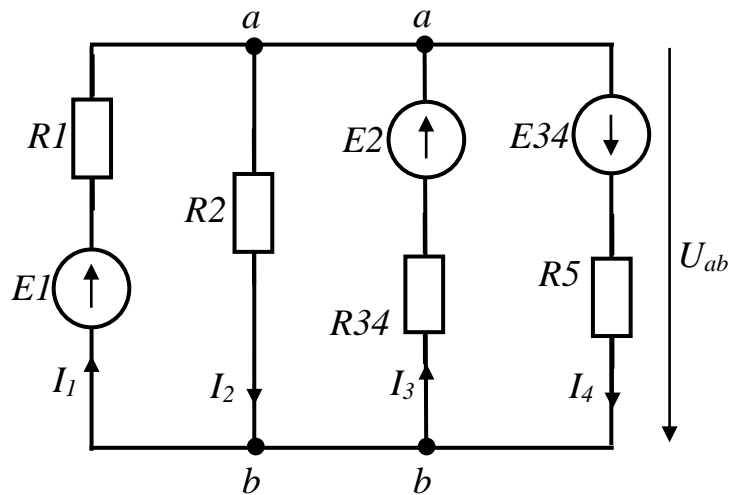


Рисунок 1.8 - Розрахункова схема кола з вказівкою напрямку струмів у вітках і U_{ab}

ЕРС в чисельнику береться зі знаком плюс, якщо його напрям не співпадає з умовно-позитивним напрямом напруги U_{ab} , і зі знаком мінус - якщо співпадає.

Струми в гілках визначаємо за законом Ома і враховуючи, що якщо умовно-позитивний напрям струму співпадає з умовно-позитивним напрямом ЕРС і напруга U_{ab} , то їх беруть зі знаком плюс і якщо не співпадають, то зі знаком мінус.

$$I_1 = \frac{E_1 - U_{ab}}{R_1} = \frac{30 - 9,4}{30} = 0,69 \text{ A};$$

$$I_2 = \frac{U_{ab}}{R_2} = \frac{9,4}{20} = 0,47 \text{ A};$$

$$I_3 = \frac{E_2 - U_{ab}}{R_{34}} = \frac{50 - 9,4}{40} = 1,01 \text{ A};$$

$$I_4 = \frac{E_{34} + U_{ab}}{R_5} = \frac{40 + 9,4}{40} = 1,23 \text{ A}.$$

Перевірку розрахунку здійснюємо, скориставшись першим законом Кірхгофа для вузла «а»:

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

$$0,69 + 1,01 - 0,47 - 1,23 = 0 \text{ A}$$

1.3 Завдання для самостійної роботи.

Завдання 1.3.1 Неізолюваний дрiт опором R розізуали на три рiвні частини, склали їх разом і скрутили. Який буде опір отриманого провідника?

Відповідь: $R/9$

Завдання 1.3.2 Як з'єднати чотири резистори опором R кожен, щоб загальний опір теж був рiвний R ?

Завдання 1.3.3 Електрична лампочка потужністю 60 W підключена на напругу 12 V . Визначити струм в колі.

Відповідь: 5 A

Завдання 1.3.4 Визначити струм I_4 схеми (рис. 1.9) при двох положеннях вимикача K , якщо відомі параметри її елементів: $E = 100\text{ V}$; $R_1 = R_2 = R_3 = 30\ \Omega$; $R_4 = 20\ \Omega$.

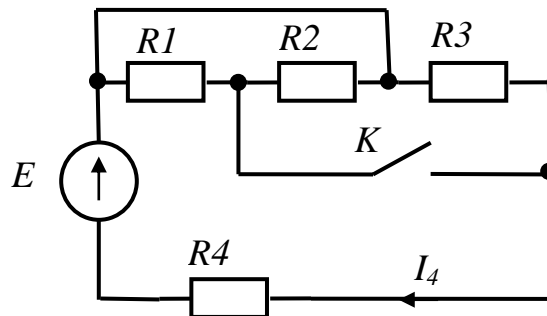


Рисунок 1.9 - Схема електричного кола

Відповідь: вимикач розімкнений - $I_4 = 2\text{ A}$;
вимикач замкнений - $I_4 = 3,33\text{ A}$

Завдання 1.3.5 Визначити струм I_2 схеми (рис. 1.10), якщо відомі параметри її елементів : $U = 40\text{ V}$, $R_3 = 20\ \Omega$, $R_2 = 20\ \Omega$, $I_3 = 0,5\text{ A}$.

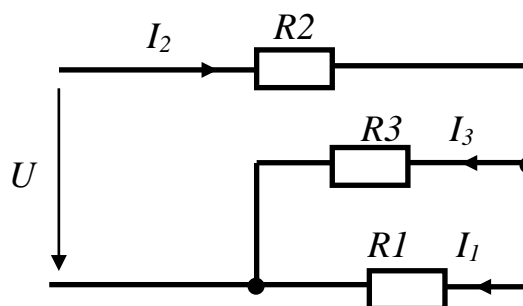


Рисунок 1.10 - Схема електричного кола

Відповідь: $1,5\text{ A}$

Завдання 1.3.6 Визначити струми в вітках схеми (рис. 1.11) методом вузлових напруг, якщо відомі параметри її елементів: $E_1 = 40 \text{ V}$, $E_2 = 20 \text{ V}$, $E_3 = 30 \text{ V}$, $R_1 = 40 \Omega$, $R_2 = 50 \Omega$, $R_3 = 20 \Omega$, $R_4 = 30 \Omega$.

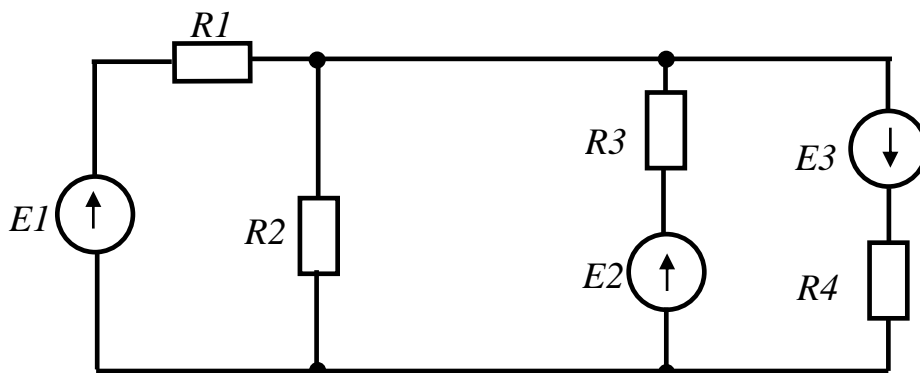


Рисунок 1.11 - Схема електричного кола

Відповідь: $I_1 = 0,805 \text{ A}$, $I_2 = 0,156 \text{ A}$, $I_3 = 0,61 \text{ A}$, $I_4 = 1,26 \text{ A}$.

Завдання 1.3.7 Джерела ЕРС в схемі (Рис. 1.12) однакові. $E_1 = E_2 = E$. Лампочка розжарювання H_1 розрахована на напругу рівну E . При якому положенні вимикача K_1 лампочка горітиме?

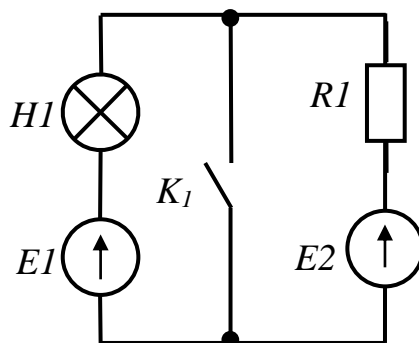


Рисунок 1.12 - Схема електричного кола

Завдання 1.3.8 Визначити показ вольтметра в схемі (рис. 1.13), якщо електричне коло має наступні параметри: $E_1 = 100 \text{ V}$, $E_2 = 50 \text{ V}$, $R_1 = 4 \Omega$, $R_2 = 6 \Omega$, $R_3 = 15 \Omega$.

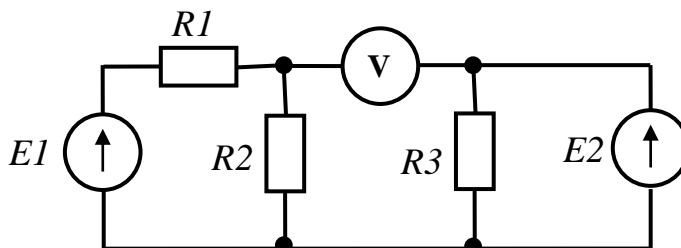


Рисунок 1.13 - Схема електричного кола

Відповідь: 10 V .

Завдання 1.3.9 Визначити значення ЕРС E_2 (рис. 1.14) за умови, що струм в резистивному елементі R_3 дорівнює нулю. Електричне коло має наступні параметри: $E_1 = 6\text{ V}$, $R_1 = 0,2\ \Omega$, $R_2 = 0,6\ \Omega$.

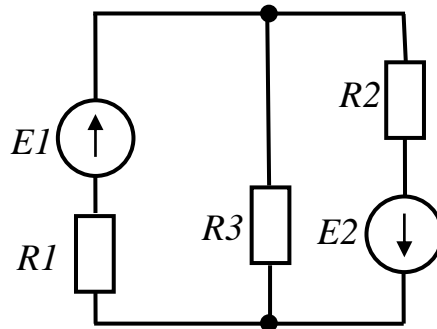


Рисунок 1.14 - Схема електричного кола

Відповідь: 18 V .

Завдання 1.3.10 Визначити показ амперметра в схемі (рис. 1.15) у випадку замкненого і розімкненого вимикача К. Електричне коло має наступні параметри: $U = 60\text{ V}$, $E = 120\text{ V}$, $R_1 = R_3 = 20\ \Omega$, $R_2 = 10\ \Omega$.

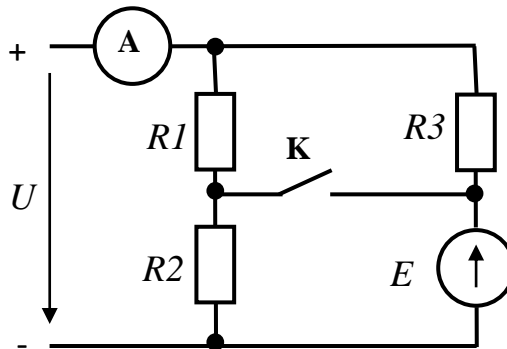


Рисунок 1.15 - Схема електричного кола

Відповідь: вимикач розімкнено – 1 A ; вимикач замкнено – 6 A .

Завдання 1.3.11 На затискачах джерела енергії виміряли напругу у двох режимах: у неробочому – $U_0 = 120\text{ V}$; у робочому – $U = 110\text{ V}$. Обчислити внутрішній опір джерела енергії, якщо опір навантаження дорівнює $R = 10\ \Omega$.

Відповідь: $R_0 = 0,9\ \Omega$

1.4 Контрольні завдання

Завдання 1.4.1 Для електричного кола, зображеного на рис.1.16 - 1.22 визначити струми в усіх вітках схеми методом еквівалентних перетворень. Параметри електричного кола приведені в Таблиці 1.1.

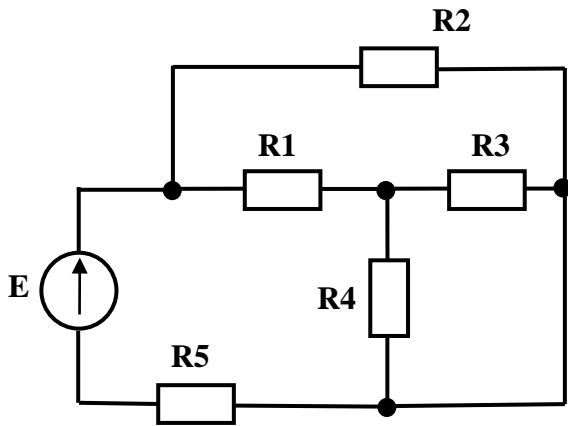


Рисунок 1.16

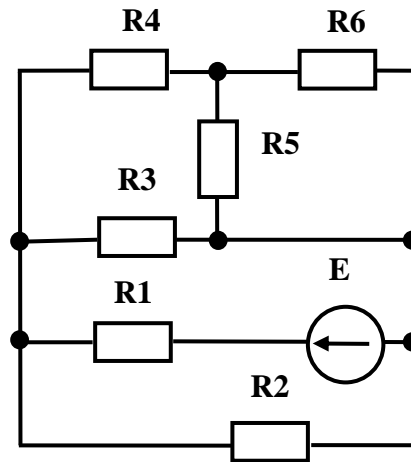


Рисунок 1.17

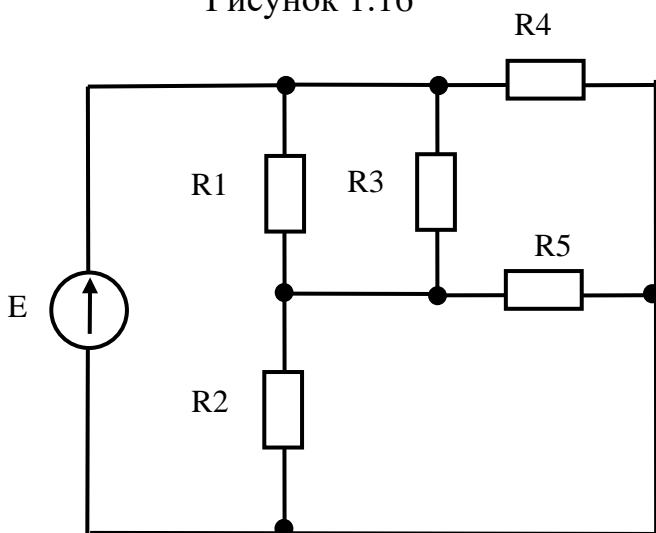


Рисунок 1.18

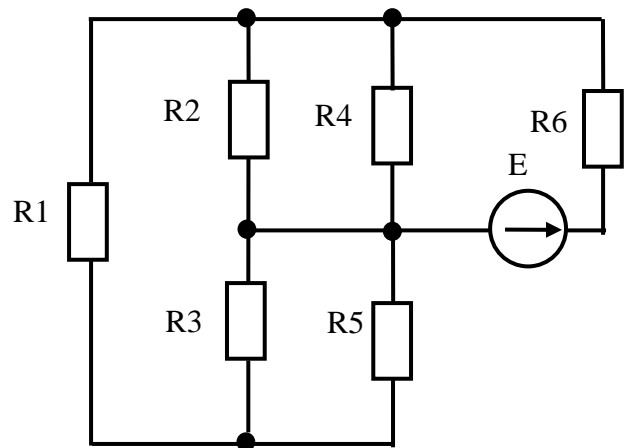


Рисунок 1.19

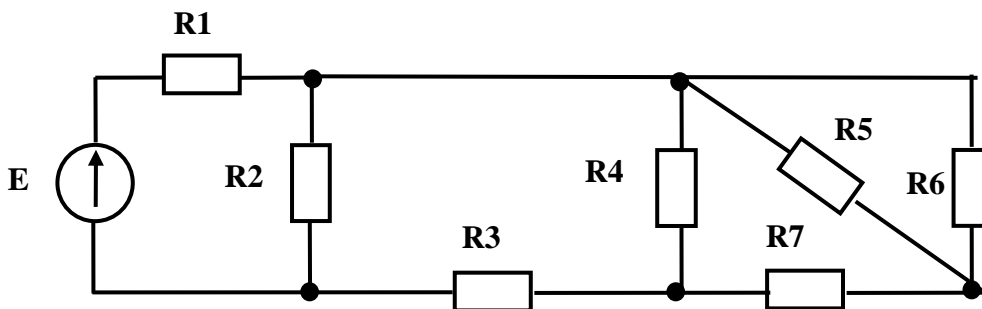


Рисунок 1.20

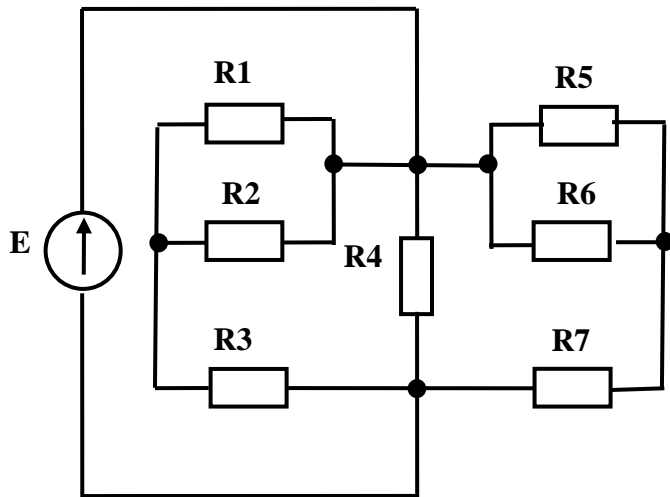


Рисунок 1.21

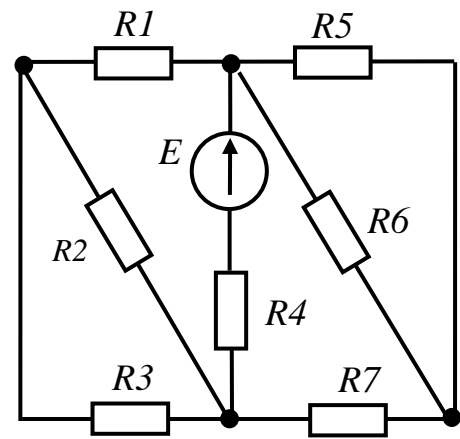


Рисунок 1.22

Таблица 1.1

Параметри електричного кола завдання 1.1

Вар-т	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Рис.	1.16	1.17	1.18	1.19	1.20	1.21	1.22	1.16	1.17	1.18
E, V	80	70	40	80	100	40	80	60	50	20
R_1, Ω	2	15	6	10	7	6	4	60	2	2
R_2, Ω	6	40	10	60	6	6	8	80	6	6
R_3, Ω	8	80	6	40	2	5	8	40	12	2
R_4, Ω	8	60	8	60	8	4	4	40	8	4
R_5, Ω	5	40	10	40	4	8	6	20	8	6
R_6, Ω	-	40	-	5	4	8	6	-	8	-
R_7, Ω	-			-	6	4	5		-	
Вар-т	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Рис.	1.19	1.20	1.21	1.22	1.16	1.17	1.18	1.19	1.20	1.21
E, V	90	60	50	100	200	120	80	100	180	60
R_1, Ω	10	1	10	6	30	25	20	20	10	100
R_2, Ω	80	10	10	20	80	70	60	120	100	100
R_3, Ω	60	6	5	20	100	140	20	80	60	10
R_4, Ω	80	8	12	12	100	100	40	120	80	60
R_5, Ω	60	6	16	16	60	80	60	80	40	80
R_6, Ω	10	6	16	16	-	80	-	20	40	80
R_7, Ω	-	5	2	8	-	-	-		60	20

Завдання 1.4.2 Для електричного кола, зображеного на рис. 1.23 – 1.28 визначити струми в усіх вітках схеми двома методами: методом контурних струмів і методом двох вузлів. Порівняти результати розрахунків кожним методом між собою. Параметри електричного кола приведені в Таблиці 1.2.

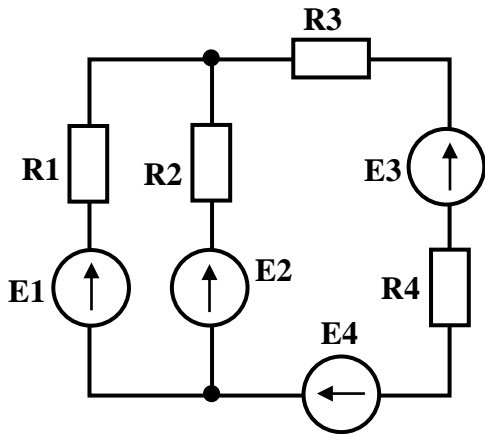


Рисунок 1.23

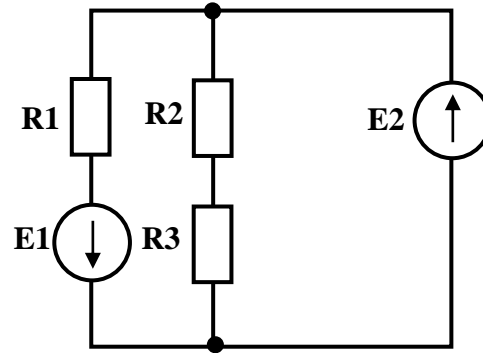


Рисунок 1.24

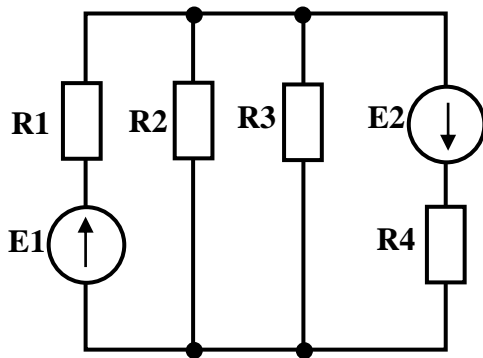


Рисунок 1.25

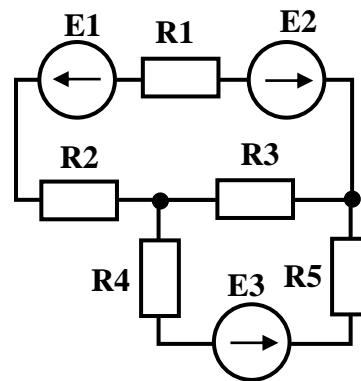


Рисунок 1.26

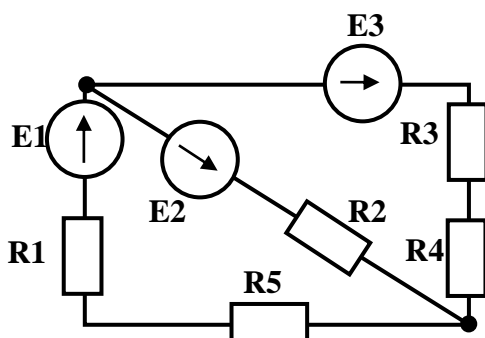


Рисунок 1.27

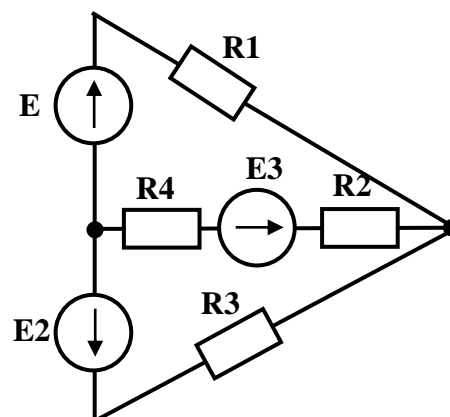


Рисунок 1.28

Параметри електричного кола завдання 1.2

Вар-т	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Рис.	1.23	1.24	1.25	1.26	1.27	1.28	1.23	1.24	1.25	1.26
E_1, V	6	20	40	10	50	60	30	40	90	20
E_2, V	7	100	10	60	50	65	40	80	30	50
E_3, V	5	-	-	20	50	50	60	-	-	30
E_4, V	9	-	-	-	-		90	-	-	
R_1, Ω	4	60	10	3	3	10	10	20	15	2
R_2, Ω	4	40	20	7	10	5	10	30	30	6
R_3, Ω	1	10	20	4	4	10	8	10	30	8
R_4, Ω	3	-	10	2	1	5	2	-	15	4
R_5, Ω	-	-	-	6	2	-	-	-	-	4
Вар-т	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Рис.	1.27	1.28	1.23	1.24	1.25	1.26	1.27	1.28	1.23	1.24
E_1, V	90	60	60	20	200	120	80	100	100	60
E_2, V	80	60	70	50	150	100	120	140	100	60
E_3, V	100	60	50	-	-	50	60	80	150	-
E_4, V	-	-	90	-	-	-	-	-	50	-
R_1, Ω	10	20	10	10	40	25	20	200	100	100
R_2, Ω	30	12	10	20	80	35	60	120	100	90
R_3, Ω	15	18	5	30	80	40	20	180	60	10
R_4, Ω	15	25	15	-	50	10	40	250	40	-
R_5, Ω	20	-	-	-	-	70	20	-	-	-

РОЗДІЛ 2. ЛІНІЙНІ ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ЗМІННОГО СТРУМУ

2.1 Загальні теоретичні положення

Змінним називається струм (напруга), що змінює в часі свій напрям і величину. Змінні струми можуть бути періодичними і неперіодичними. Найчастіше на практиці застосовуються періодичні струми, миттєві значення яких повторюються через рівні проміжки часу.

Це пояснюється тим, що:

- генератори і двигуни змінного струму простіші по пристрою, надійніше в роботі і простіше в експлуатації в порівнянні з машинами постійного струму;
- змінний струм піддається трансформації, звідси можливість його передачі на великі відстані.

У електричних колах змінного струму найчастіше використовують синусоїдальну форму сигналу, при якій величини струмів і напруги змінюються повільно (немає перенапружень, поштовхів струму), тому що вона не спотворюється після трансформації.

Крім того, синусоїдальна форма струму і напруги дозволяє проводити точний розрахунок електричних кіл з використанням методу комплексних чисел і наближений розрахунок на основі векторних діаграм. При цьому для розрахунку використовуються закони Ома і Кирхгофа, але записані у векторній або комплексній формі.

Миттєвим значенням струму, напруги, ЕРС називається значення синусоїдальної функції струму, напруги, ЕРС в будь-який наданий момент часу t і позначається малими рядковими буквами латинського алфавіту i , u , e :

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

$$u(t) = U_m \sin(\omega t + \psi_u),$$

$$e(t) = E_m \sin(\omega t + \psi_e),$$

де

I_m , U_m , E_m – амплітуди (максимальні значення) струму, напруги, ЕРС;

ψ_i , ψ_u , ψ_e – початкові фази струму, напруги, ЕРС;

аргумент функції синуса ($\omega t + \psi$) – фаза коливання, що характеризує розвиток процесу в часі і визначає значення функції в даний момент часу;

ω – циклічна частота;

T – період.

Графічно кожен з перерахованих залежностей можна наочно змалювати у вигляді часової діаграми.

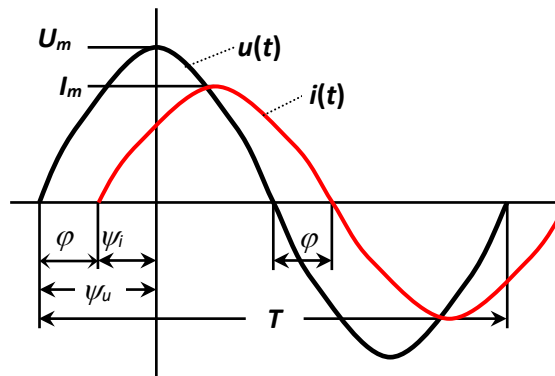


Рисунок 2.1 – Часова діаграма напруги і струму ділянки кола

Величини i , I_m - вимірюються в амперах, величини U , U_m , e , E_m - у вольтах; величина T (період) - найменший проміжок часу, через який миттєві значення повторюються, вимірюється в секундах (s); частота $f = 1/T$ - в герцах (Hz), циклічна частота $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$, що показує швидкість зміни фази, має розмірність rad/s або $grad/s$. Значення початкових фаз ψ_i , ψ_u , ψ_e можуть вимірюватися в радіанах або градусах. Величина початкової фази залежить від початку відліку часу $t = 0$. Позитивне значення відкладається вліво, негативне - управо.

Важливою характеристикою ділянки електричного кола є кут зсуву фаз між напругою і струмом φ , рівний різниці початкових фаз напруги і струму

$$\varphi = \psi_u - \psi_i.$$

Безпосередні математичні дії з синусоїдними величинами дуже трудомісткі, тому такі величини замінюють еквівалентними незмінними в часі значеннями.

Діючим значенням струму вважають такий постійний струм, який створює той самий тепловий ефект, що і реальний змінний струм.

Діюче значення (середньоквадратичне за період), позначається заголовною буквою і дорівнює:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \sin^2 \omega t dt} = \sqrt{\frac{I_m^2}{2}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}},$$

$$\text{для напруги та Е.Р.С.} - U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = 0,707 U_m; \quad E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = 0,707 E_m.$$

Будь-яку синусоїду можна зобразити вектором, що обертається проти годинникової стрілки з швидкістю, рівній кутовій частоті ω (рис. 2.2).

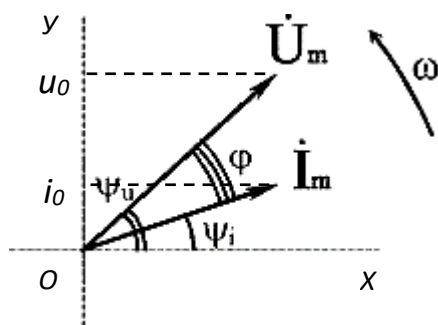


Рисунок 2.2 –Зображення векторами \dot{U}_m та \dot{I}_m миттєвих значень напруги і струму

Вектор зображують в початковий момент часу $t = 0$. Тоді фаза коливання $(\omega t + \psi) = \psi$. При позитивній початковій фазі вектор зрушується відносно горизонтальної осі проти напрямку руху годинникової стрілки, по напрямку руху - при негативній фазі. Довжина вектора в масштабі виражає амплітудне значення величини. Вектори, що обертаються, позначають заголовною буквою з крапкою над нею. Вертикальні проекції векторів визначають миттєве значення струму і напруги при $t = 0$:

$$i_0 = I_m \sin \psi_i;$$

$$u_0 = U_m \sin \psi_u.$$

Оскільки діюче і миттєве значення пропорційні, то довжина вектора може бути рівною значенню діючої величини. При обертанні з однакою швидкістю всі вектори взаємно нерухомі.

Сукупність векторів, що зображують синусоїдальні величини однакової частоти в початковий момент часу, називають векторною діаграмою.

Векторні діаграми дають графічне рішення задачі.

Для аналітичного вирішення площину координат XOY замінимо комплексною площиною. Оскільки літерою i в електротехніці позначають струм, то уявну одиницю позначимо літерою $j = \sqrt{-1}$. Вектору на комплексній площині можна зіставити комплексне число $\dot{I}_m = I_m e^{j\psi}$: (комплекс амплітудного значення) або $\dot{I} = I e^{j\psi}$ (комплекс діючого значення). Довжину характеризують модулем комплексу I_m або I , положення на комплексній площині - аргументом комплексу ψ (рис. 2.3).

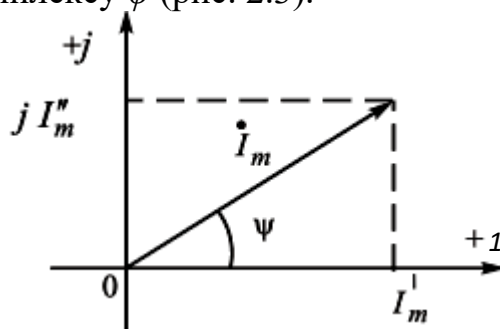


Рисунок 2.3 – Зображення вектора на комплексній площині

Таку форму запису комплексного числа в математиці називають показовою. Її можна використовувати для множення і ділення комплексних чисел.

Складати і віднімати в такій формі запису не можна, для цього переходять до алгебраїчної форми, тобто розкладають вектор на проєкції по осях координат: дійсну I'_m і уявну jI''_m : $\dot{I}_m = I'_m + jI''_m$. Перехід від однієї форми запису до іншої роблять по формулах:

$$I_m = \sqrt{(I'_m)^2 + (I''_m)^2}; \quad \psi = \operatorname{arctg} \frac{I''_m}{I'_m};$$

$$I'_m = I_m \cdot \cos\psi; \quad I''_m = I_m \cdot \sin\psi.$$

Відношення комплексного значення напруги до комплексного значення струму на ділянці кола називають комплексом повного опору і позначають \underline{Z} :

$$\underline{Z} = \frac{\dot{U}_m}{\dot{I}_m} = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = Z e^{j(\psi_u - \psi_i)} = Z e^{j\varphi},$$

де $Z = \frac{U_m}{I_m} = \frac{U\sqrt{2}}{I\sqrt{2}} = \frac{U}{I}$ - модуль повного опору, вимірюється в омах (Ω).

Як будь-яке комплексне число \underline{Z} має дійсну частину R , звану активним опором і деяку уявну частину jX :

$$\underline{Z} = Z \cdot \cos\varphi + jZ \cdot \sin\varphi = R \pm jX,$$

X - реактивний опір (Ω).

Під комплексною провідністю \underline{Y} розуміють величину, зворотну комплексному опору:

$$\underline{Y} = \frac{1}{\underline{Z}} = \frac{1}{R \pm jX} = G \mp jB = Y e^{-j\varphi},$$

G - активна провідність, B - реактивна провідність.

Одиниці виміру G , B і модуля повної провідності Y - сименси (S).

Закон Ома
$$\dot{i} = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}}, \quad (2.3)$$

где \underline{Z} – комплексний опір.

При послідовному з'єднанні n -споживачів:

$$\underline{Z} = \sum^n \underline{Z}_n.$$

При паралельному з'єднанні n -споживачів:

$$\frac{1}{\underline{Z}} = \sum^n \frac{1}{\underline{Z}_n}.$$

Тут комплексний опір і фазовий кут n -ого приймача:

$$Z_n = R_n + j(X_{Ln} - X_{Cn}),$$

$$\varphi_n = \arctg \frac{X_{Ln} - X_{Cn}}{R_n}.$$

I закон Кірхгофа
$$i = \sum_{n=1}^n i_n. \quad (2.4)$$

II закон Кірхгофа
$$\sum_{k=1}^k \dot{E}_k = \sum_{n=1}^n \dot{U}_n. \quad (2.5)$$

Для наочного уявлення про фазове розташування векторів аналітичні розрахунки електричних кіл синусоїдного струму супроводжують побудовою векторних і топографічних діаграм. Таким чином здійснюється якісний контроль результатів розрахунку. На рис. 2.4 показані послідовне коло (рис. 2.4 а), його векторна (рис. 2.4 б) і топографічна (рис. 2.4 в) діаграми. На рис. 2.5 в тій же послідовності зображені паралельне коло, його векторна і топографічна діаграми.

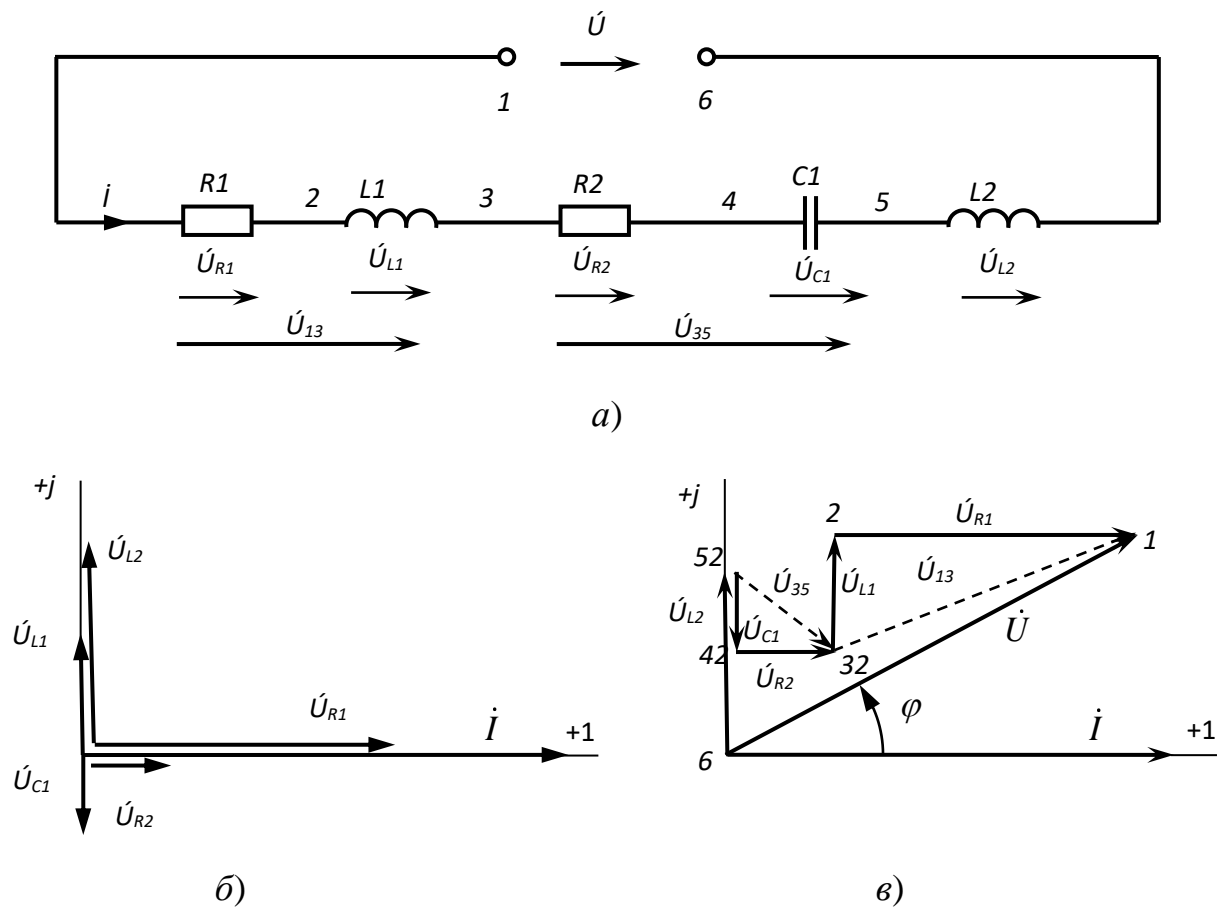


Рисунок 2.4 – Схема послідовного з'єднання R, L, C елементів, її векторна та топографічна діаграми

При побудові векторних діаграм один з векторів приймають за основний (опорний) і спрямовують його зазвичай по позитивному напрямку дійсній вісі. В цьому випадку його початкова фаза дорівнює нулю. Для послідовного кола за основний вектор приймають вектор струму (рис. 2.4 б), а для паралельного - вектор напруги (рис. 2.5 б).

Сукупність точок комплексної площини, що відображають комплексні потенціали однойменних вузлів електричної схеми відносно будь-якого одного вузла, потенціал якого прирівнюють нулю, називається топографічною діаграмою. На діаграмі вузлу з нульовим потенціалом відповідає точка початку координат. Для визначення напруги на ділянці кола (див. рис.2.4 а), наприклад U_{L2} , треба з'єднати однойменні точки комплексної площини 5 і 6. Причому комплексному значенню напруги відповідає вектор, направлений від точки 6 до точки 5. Аналогічно можна визначити значення напруги між будь-якими двома вузлами: \dot{U}_{13} , \dot{U}_{35} і так далі (рис. 2.4 а, в).

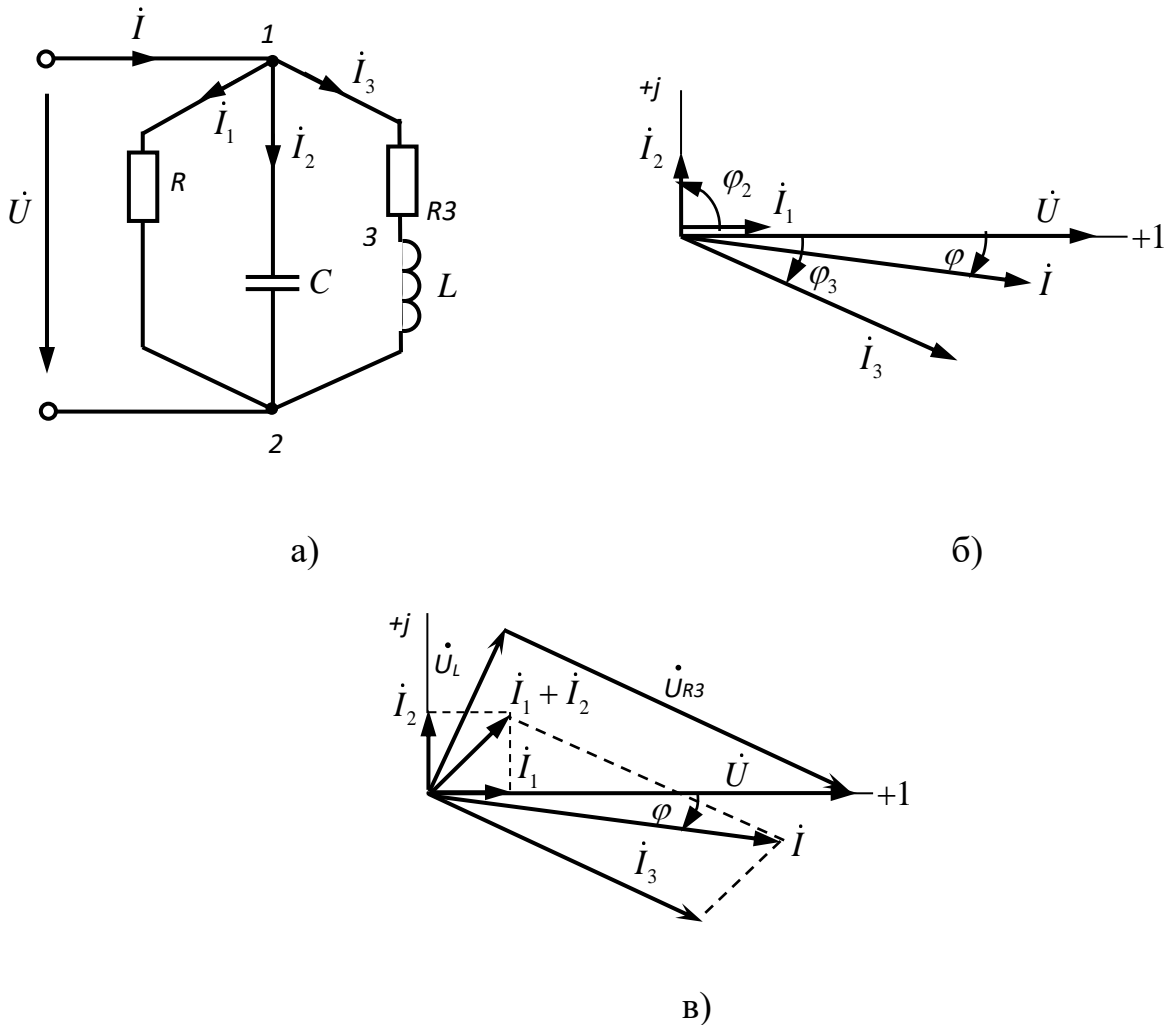


Рисунок 2.5 – Паралельне коло, векторна та топографічна діаграми

Вивчаючи явища резонансу, необхідно засвоїти наступне. При резонансі напруга і струм на затискачах кола завжди збігаються по фазі. Налаштування ж

кола на резонанс залежить від схеми з'єднання індуктивного і ємнісного опорів. Для послідовного кола умовою резонансу є рівність індуктивного і ємнісного опорів: $X_L = X_C$. Для кола, що містить паралельний контур, в одній з віток якої знаходиться індуктивний, а в іншій - ємнісний опір, умовою резонансу є рівність реактивної провідності віток: $B_1 = B_2$. У реальних електричних колах немає елементів з тільки активним або реактивним опором, віток з тільки активною або реактивною провідністю, наприклад, для котушки з опором R і індуктивністю L активна провідність визначається по формулі

$$G = \frac{R}{R^2 + X_L^2},$$

а реактивна провідність -

$$B = \frac{X_L}{R^2 + X_L^2}.$$

Вірність будь-якого аналітичного розрахунку перевіряється складанням балансу потужності. Миттєва потужність, що виробляється і віддається в електричне коло джерелом енергії, і споживана приймачем, дорівнює швидкості виконання роботи в даний момент часу

$$p = ui = UI \cos \varphi - UI \cos(2\omega t - \varphi),$$

має постійну і змінну (гармонійну) складові, причому кутова частота останньої удвічі більше кутової частоти напруги і струму.

Постійна складова миттєвої потужності (її середнє значення за період) називається активною потужністю:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = UI \cos \varphi,$$

характеризує середню швидкість перетворення електричної енергії в теплову. Фізично вона є енергією, яка виділяється в одиницю часу у вигляді теплоти на ділянці кола в опорі R :

$$P = UI \cos \varphi = IZ \cos \varphi = I^2 Z \cos \varphi = I^2 R \quad (2.6)$$

і вимірюється у ватах (W).

Змінну складову миттєвої потужності, тобто ту частку енергії, якою обмінюються генератор і активно-реактивний приймач без перетворення в теплову, називають реактивною потужністю Q і обчислюють за формулою:

$$Q = UI \sin \varphi = I^2 Z \sin \varphi = I^2 X \quad (2.7)$$

вимірюють у вольтамперах реактивних (var).

На відміну від активної потужності, значення якої завжди позитивно, реактивна потужність індуктивної ділянки позитивна, ємкісної - негативна.

На щитку будь-якого джерела електричної енергії змінного струму (генератора, трансформатора.) указується величина максимально можливої активної потужності при заданих діючих значеннях U і I , тобто коли $\cos \varphi = 1$. Її позначають літерою S , називають повною потужністю, знаходять як добуток діючих значень напруги і струму:

$$S = UI \quad (2.8)$$

і вимірюють у $V \cdot A$.

Між P , Q і S справедливе співвідношення $S^2 = P^2 + Q^2$.

Для переходу до комплексної форми введемо поняття спряженого комплексу струму.

Якщо заданий деякий комплекс діючого значення струму

$$\dot{I} = I e^{j\psi_i} = I \cos \psi + jI \sin \psi ,$$

то під комплексом \dot{I}^* , спряженим з комплексом \dot{I} , будемо розуміти

$$\dot{I}^* = I e^{-j\psi_i} = I \cos \psi - jI \sin \psi .$$

Комплексом повної потужності називають добуток комплексу діючого значення напруги на спряжений комплекс діючого значення струму:

$$\tilde{S} = \dot{U} \dot{I}^* = UI e^{j(\psi_u - \psi_i)} = UI e^{j\varphi} = UI \cos \varphi + jUI \sin \varphi = P + jQ . \quad (2.9)$$

У цьому комплексі дійсна частина відповідає активній потужності, а уявна - реактивній.

З врахуванням введених понять вираз для балансу потужності в колах змінного струму запишеться таким чином:

$$\sum \tilde{S}_{ген} = \sum \tilde{S}_{пр} , \quad (2.10)$$

де $\tilde{S}_{ген}$ і $\tilde{S}_{пр}$ - комплексні значення повних потужностей джерел і приймачів.

З врахуванням розкладання комплексу повної потужності на дійсну уявну частини баланс можна скласти окремо для активних і реактивних потужностей:

$$Re \left[\sum \dot{I} \dot{I}^* \right] = \sum I^2 R , \quad (2.11)$$

$$Im \left[\sum \dot{I} \dot{I}^* \right] = \sum I^2 X . \quad (2.12)$$

2.2 Методика розв'язання типових завдань

Приклад 2.2.1

Синусоїдальна функція $e(\omega t)$ має наступні параметри: $E_m = 4 \text{ V}$; $e_0 = 2,83 \text{ V}$; $T = 0,02 \text{ s}$. Записати тригонометричну функцію $e(\omega t)$ і комплексне число \dot{E} і зобразити вектор \dot{E} на комплексній площині.

Розв'язання

Визначимо кутову частоту ω .

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2 \cdot 3,14}{0,02} = 314 \text{ rad/s}$$

Визначимо початкову фазу ψ_e . Так як для моменту часу $t = 0 \text{ s}$

$$e_0 = E_m \cdot \sin \psi_e, \text{ то тоді } \sin \psi_e = \frac{e_0}{E_m} = \frac{2,83}{4} = 0,707.$$

Отже, кут ψ_e буде дорівнювати 45° . Тригонометричний вираз напруги має вигляд:

$$e = 4 \cdot \sin(314 \cdot t + 45^\circ) \text{ V.}$$

Комплексне число запишемо для діючого значення ЕРС у момент часу $t = 0$:

$$\dot{E} = 2,8 \cdot e^{j45^\circ}.$$

Зобразимо вектор \dot{E} на комплексній площині (рис. 2.6).

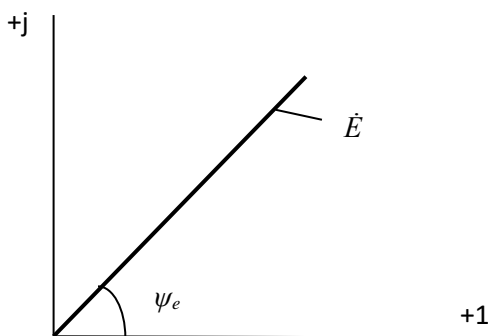


Рисунок 2.6 - Вектор \dot{E}

Приклад 2.2.2

В коло напругою $U = 120 \text{ V}$ и частотою $f = 50 \text{ Hz}$ увімкнена індуктивна котушка с параметрами: $R = 12 \ \Omega$; $L = 66,2 \text{ mH}$. Схема заміщення котушки зображена на рис. 2.7. Визначити комплекс діючого значення струму, значення повної, активної і реактивної потужностей.

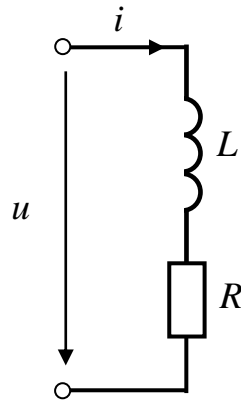


Рисунок 2.7 - Схема заміщення котушки

Розв'язання

Визначимо індуктивний опір котушки

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 66,2 \cdot 10^{-3} = 20,8 \, \Omega.$$

Визначимо комплексний опір котушки

$$Z = R + j X_L = 12 + j 20,8 = 24 e^{j60}.$$

Комплекс діючого значення струму

$$\underline{i} = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}} = \frac{120}{24 e^{j60}} = 5 e^{-j60}.$$

Визначимо комплексну потужність

$$\underline{S} = \underline{U} \underline{I}^* = 120 \cdot 5 e^{j60} = 600 e^{j60} = 600 \cdot \cos 60^\circ + j 600 \cdot \sin 60^\circ = (300 + j 520),$$

тоді $S = 600 \text{ V}\cdot\text{A}$, $P = 300 \text{ W}$, $Q = 520 \text{ var}$.

Приклад 2.2.3

Котушка індуктивності з'єднана послідовно з конденсатором (рис. 2.8). Визначити струм на котушці і конденсаторе, якщо електричне коло має такі параметри: $R_K = 6 \, \Omega$; $L_K = 25,5 \text{ mH}$; $C = 1590 \, \mu\text{F}$; $U = 220 \text{ V}$; $f = 50 \text{ Hz}$. Побудувати векторну діаграму напруг.

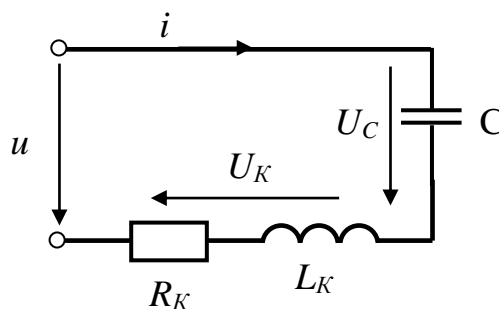


Рисунок 2.8 - Котушка індуктивності, з'єднана послідовно з конденсатором

Розв'язання

Визначимо опір елементів схеми

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 25,5 \cdot 10^{-3} = 8 \ \Omega.$$

$$X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 1590 \cdot 10^{-6}} = 2 \ \Omega.$$

Комплексний опір всього кола

$$Z_{BX} = R_K + jX_L - jX_C = 6 + j8 - j2 = 6 + j6 = 8,5e^{j45}.$$

Комплексний опір котушки індуктивності

$$Z_K = R_K + jX_L = 6 + j8 = 10e^{j53}.$$

Визначимо комплексний струм

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}_{BX}} = \frac{220}{8,5e^{j45}} = 25,9e^{-j45}.$$

Відомий струм в колі дозволяє знайти напругу на окремих ділянках кола.

Напруга на котушці:

$$\dot{U}_K = \dot{I} \cdot \underline{Z}_K = 25,9e^{-j45} \cdot 10e^{j53} = 259e^{j8}.$$

Напруга на конденсаторе:

$$\dot{U}_C = \dot{I} \cdot \underline{Z}_C = 25,9e^{-j45} \cdot 2e^{-j90} = 51,8e^{-j135}$$

Напруга на R_K и X_L :

$$\dot{U}_{R_K} = \dot{I} \cdot R_K = 25,9e^{-j45} \cdot 6 = 155,4e^{-j45}$$

$$\dot{U}_{X_L} = \dot{I} \cdot jX_L = 25,9e^{-j45} \cdot 8e^{j90} = 207,2e^{j45}$$

Векторна діаграма напруг зображена на рис. 2.9.

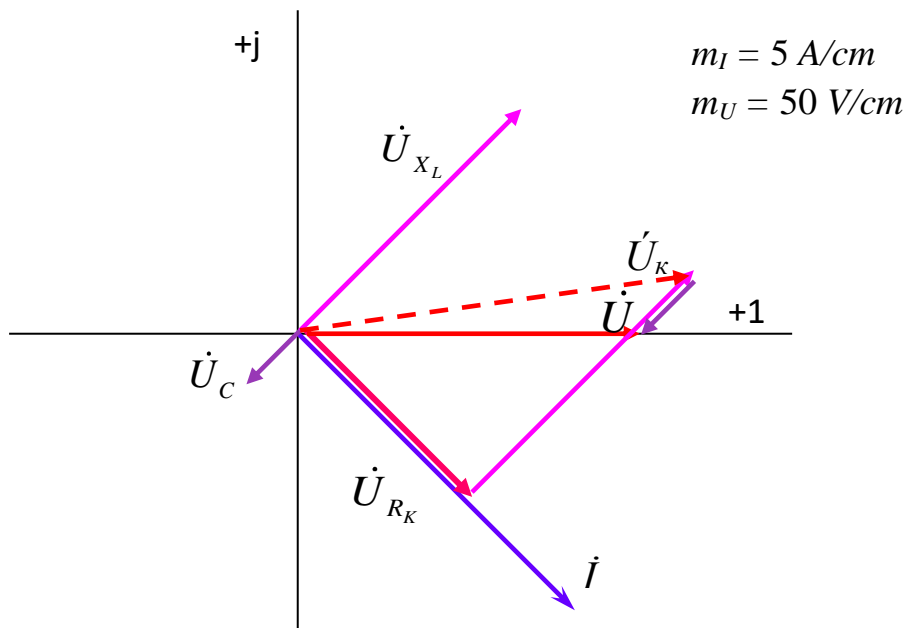


Рисунок 2.9 - Векторна діаграма напруг

Приклад 2.2.4

Для електричного кола, зображеного на рис. 2.10 а, визначити показання пристроїв і побудувати векторну діаграму. $U = 60 \text{ V}$; $R = 3 \Omega$; $X_L = 8 \Omega$; $X_C = 4 \Omega$.

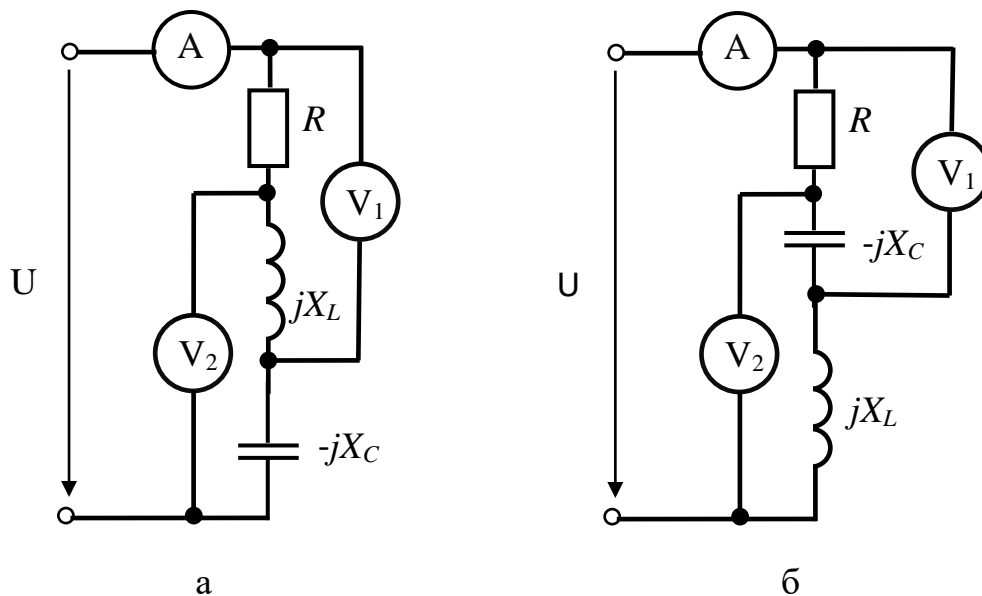


Рисунок 2.10 – Послідовне з'єднання резистора, індуктивного та ємнісного елементів

Визначимо опір всього кола

$$\underline{Z} = R + jX_L - jX_C = 3 + j8 - j4 = 3 + j4$$

Перекладаємо з алгебраїчної у показову форму комплексного числа $\underline{Z} = 5 e^{j53}$.

Визначимо комплексний струм

$$\dot{I} = \dot{U} / \underline{Z} = 60 / (5e^{j53}) = 12e^{-j53}.$$

Розрахуємо комплексний опір на першій ділянці

$$\underline{Z}_1 = R + jX_L = 3 + j8 = 8,5e^{j69}.$$

Тоді комплексне значення напругі на першому вольтметрі

$$\dot{U}_1 = \dot{I} \cdot \underline{Z}_1 = 12e^{-j53} \cdot 8,5e^{j69} = 102e^{j16}.$$

Визначимо комплексний опір на другій ділянці

$$\underline{Z}_2 = +jX_L - jX_C = +j8 - j4 = 4e^{+j90}.$$

Комплексне значення напругі на другому вольтметрі

$$\dot{U}_2 = \dot{I} \cdot \underline{Z}_2 = 12e^{-j53} \cdot 4e^{+j90} = 48e^{+j37}.$$

Рівняння для будови векторної діаграми:

$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C.$$

Комплексні значення напруг для будови векторної діаграми:

$$\dot{U}_R = \dot{I} \cdot R = 12e^{-j53} \cdot 3 = 36e^{-j53};$$

$$\dot{U}_L = \dot{I} \cdot \underline{Z}_L = 12e^{-j53} \cdot 8e^{j90} = 96e^{j37};$$

$$\dot{U}_C = \dot{I} \cdot \underline{Z}_C = 12e^{-j53} \cdot 4e^{-j90} = 48e^{-j143}.$$

Векторна діаграма напруг зображена на рис. 2.11.

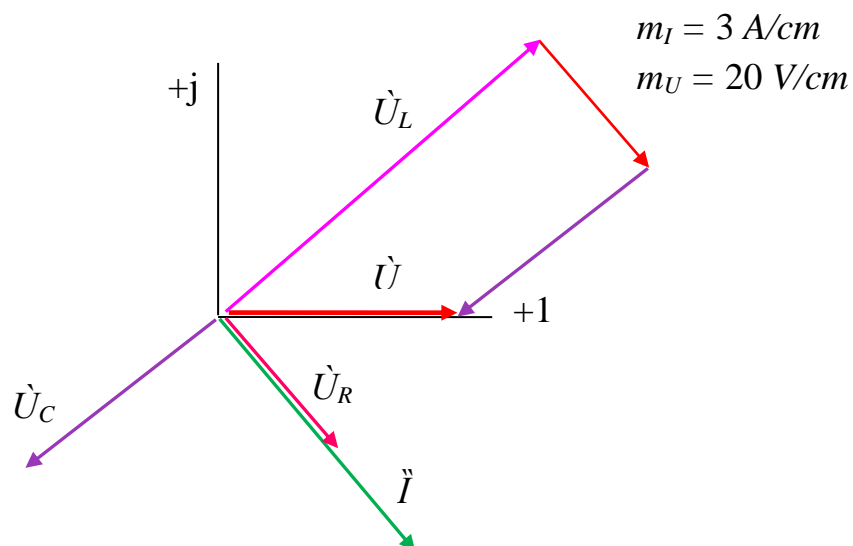


Рисунок 2.11 - Векторна діаграма напруг

2.3 Завдання для самостійної роботи

Завдання 2.3.1 На рис. 2.12 показана принципова схема підключення лампи розжарювання $H1$ через вимикач $S1$ к джерелу синусоїдальної напруги 220 V . Вимикач $S1$ – вимкнено. Одна з клем з'єднана з лінійним проводом, а інша - з нульовим. Яким може бути потенціал контактів лампи "a" і "b" щодо землі?

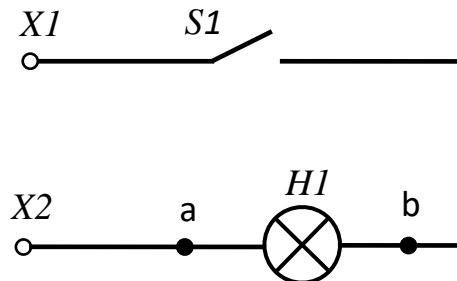


Рисунок 2.12 - Принципова схема підключення лампи розжарювання

Завдання 2.3.2 В електричному колі підключення котушки індуктивності к джерелу синусоїдальної напруги (рис.2.13) прилади показують: $P_W = 40\text{ W}$; $U_V = 100\text{ V}$; $I_A = 2\text{ A}$. Визначити параметри котушки індуктивності R_K и X_K .

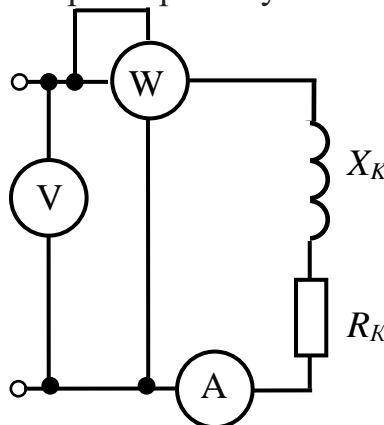


Рисунок 2.13 – Принципова схема підключення котушки індуктивності

Відповідь: $R_K = 10\ \Omega$; $X_K = 49\ \Omega$.

Завдання 2.3.3 В колі змінного струму (рис. 2.14) визначити показання приладів, якщо параметри кола дорівнюють: $R = 10\ \Omega$, $X_L = X_C = 7\ \Omega$, $P = 20\text{ W}$.

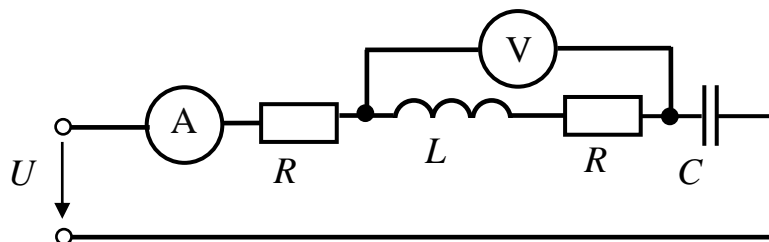


Рисунок 2.14 - Принципова схема послідовного з'єднання елементів

Відповідь: $I = 1 \text{ A}$, $U = 12,2 \text{ V}$.

Завдання 2.3.4. При замкненому та розімкненому вимикачі В в колі, зображеному на рис. 2.15, амперметр показує одне і теж значення струму $I = 10 \text{ A}$. Визначити опір R і X_L кола, якщо вольтметр показує 220 V , частота $f = 50 \text{ Hz}$, а ємність конденсатора $C = 159 \mu\text{F}$.

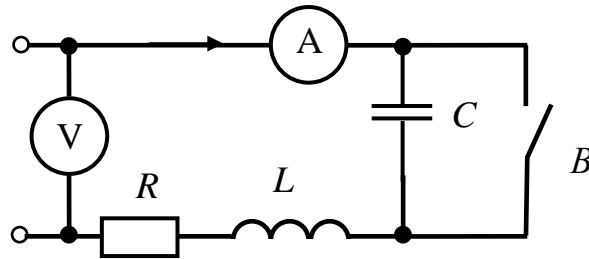


Рисунок 2.15 - Принципова схема послідовного з'єднання елементів

Відповідь: $R = 19,6 \Omega$; $X_L = 10 \Omega$.

Завдання 2.3.5 У мережу напругою 220 V включені послідовно котушка з активним опором 10Ω і індуктивністю 159 мН , а також батарея конденсаторів. Визначити ємність батареї, при якій в ланцюзі встановиться резонанс напруг. Знайти струм в колі і напругу на індуктивному і ємнісному елементах.

Відповідь: $C_{рез.} = 63,5 \mu\text{F}$, $I = 22 \text{ A}$; $U_L = U_C = 1100 \text{ V}$.

Завдання 2.3.6 Знайти струм I_1 в колах змінного струму, схеми яких зображені на рис. 2.16, а, б, якщо $I_2 = 3 \text{ A}$, $I_3 = 4 \text{ A}$.

Відповідь: Схема (а) $I_1 = 1 \text{ A}$, схема (б) $I_1 = 5 \text{ A}$.

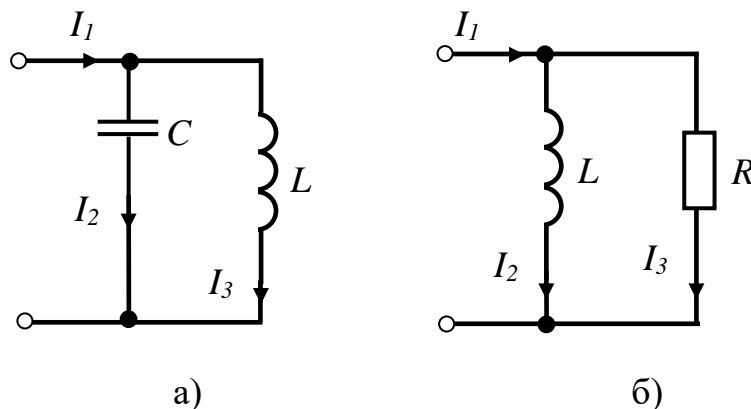


Рисунок 2.16 - Принципова схема паралельного з'єднання елементів

Завдання 2.3.7 В електричному колі змінного струму (рис. 2.17) Струм $I_2 = 2 \text{ A}$. Визначити показання амперметра, якщо параметри кола дорівнюють: $R = 10 \Omega$, $X_C = 20 \Omega$.

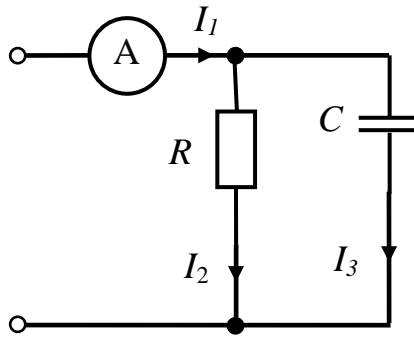


Рисунок 2.17 - Принципова схема паралельного з'єднання

Відповідь: $I_1 = 2,2 \text{ A}$.

Завдання 2.3.8 Знайти струми в колах змінного струму (рис. 2.18), якщо параметри кола рівні: $R = X_L = X_C = 10 \Omega$, а $U_{ab} = 100 \text{ V}$.

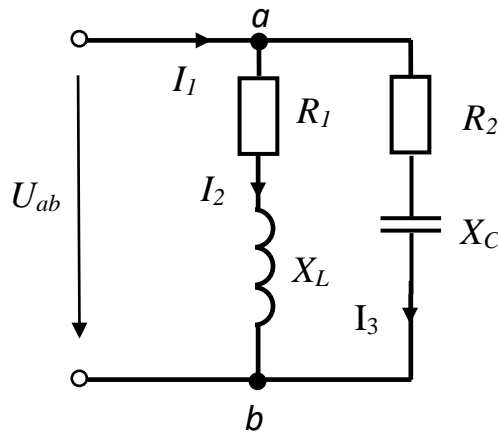


Рисунок 2.18 - Принципова схема паралельного з'єднання елементів

Відповідь: $I_2 = I_3 = 7,1 \text{ A}$, $I_1 = 10 \text{ A}$.

Завдання 2.3.9 В колі змінного струму (рис. 2.19) визначити показання усіх приладів, якщо параметри кола рівні: $U = 10 \text{ V}$, $R_1 = X_L = 2 \Omega$, $R_2 = X_C = 4 \Omega$.

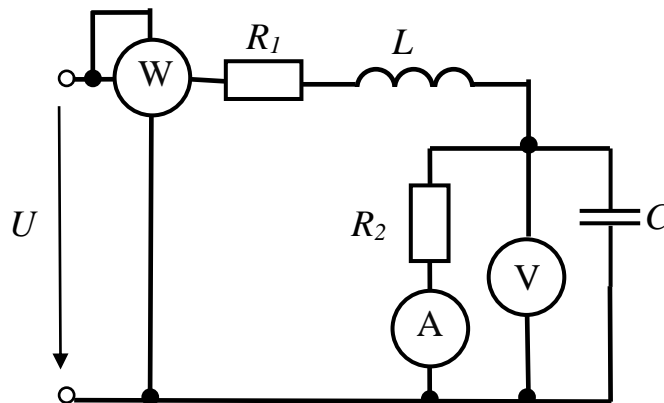


Рисунок 2.19 - Принципова схема змішаного з'єднання елементів

Відповідь: амперметр: $I_A = 1,75 \text{ A}$,
вольтметр: $U_V = 7 \text{ V}$,
ватметр: $P = 25 \text{ W}$.

Завдання 2.3.10 В колі змінного струму (рис. 2.20) визначити показання ватметра, якщо параметри кола рівні: $U = 20 \text{ V}$, $R = 6 \Omega$, $X_L = 8 \Omega$, $X_C = 6 \Omega$.

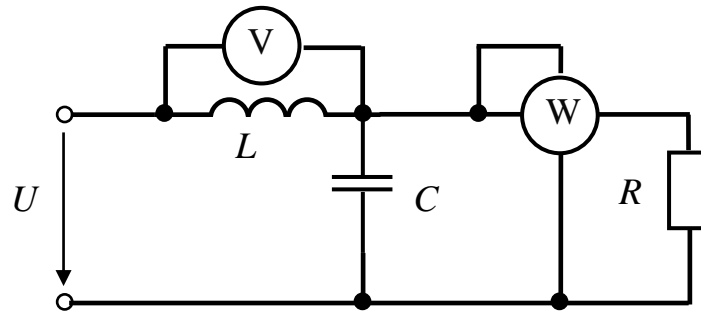


Рисунок 2.20 - Принципова схема змішаного з'єднання елементів

Відповідь: $P = 25 \text{ W}$.

Завдання 2.3.11 В електричному колі змінного струму послідовно з'єднано резистор, ідеальну котушку індуктивності та конденсатор. Вольтметри на кожному з цих елементів відповідно показують 30 V , 50 V , 90 V . Визначити напругу, прикладену до кола.

Відповідь: $U = 50 \text{ V}$.

2.4 Контрольні завдання

Завдання 2.4.1 Для електричного кола, зображеного на рис. 2.21 – 2.24 визначити показання пристроїв і побудувати векторну діаграму. Параметри електричного кола приведені в Таблиці 2.1

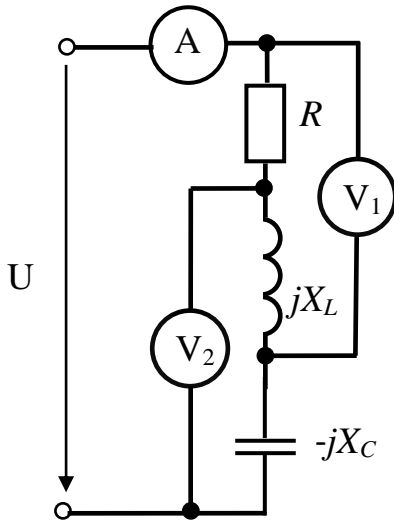


Рисунок 2.21

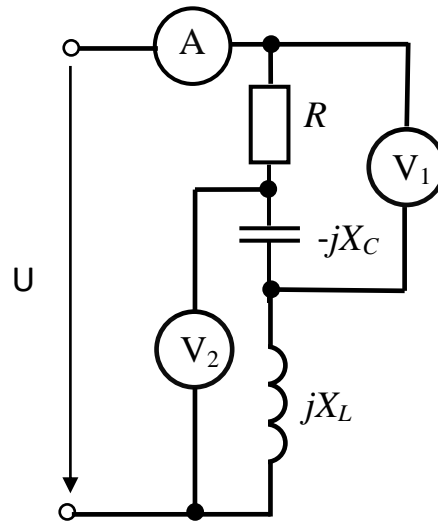


Рисунок 2.22

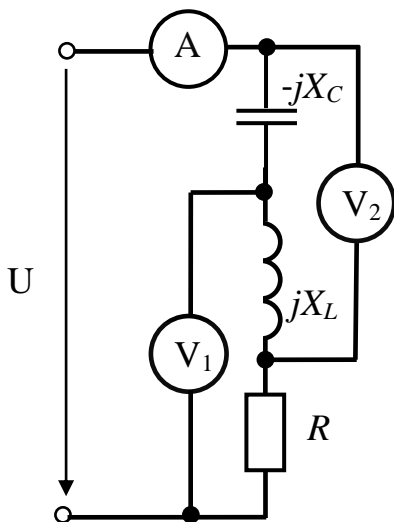


Рисунок 2.23

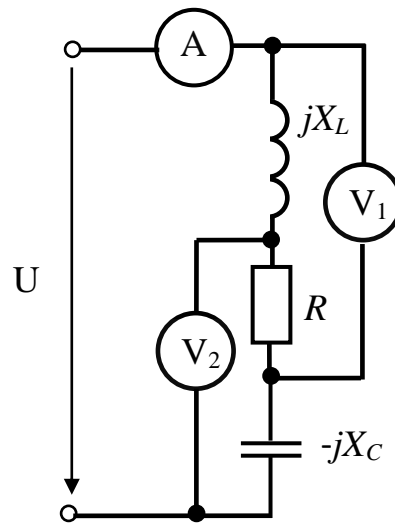


Рисунок 2.24

Таблиця 2.1

Вар-т	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Рис.	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	2.22	2.22	2.22	2.22	2.22
U, V	100	80	50	70	-	120	80	60	40	-
I, A	-	-	-	-	5	-	-	-	-	2
R, Ω	10	30	6	7	1	50	4	6	6	12
X_L, Ω	7	80	7	10	2	80	12	16	2	16
X_C, Ω	17	40	15	10	1	50	4	8	10	4

Вар-т	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Рис.	2.23	2.23	2.23	2.23	2.23	2.24	2.24	2.24	2.24	2.24
U, V	50	30	20	40	-	20	10	30	12	-
I, A	-	-	-	-	10	-	-	-	-	4
R, Ω	20	12	5	8	1	3	2	12	6	3
X_L, Ω	50	16	5	10	2	8	1	16	8	4
X_C, Ω	40	32	10	4	2	4	3	32	8	8

Завдання 2.4.2. Для електричного кола, зображеного на рис. 2.25 – 2.28 розрахувати в комплексній формі струми гілок, визначити показання приладів і побудувати векторну діаграму струмів.

Параметри електричного кола приведені в Таблиці 2.2

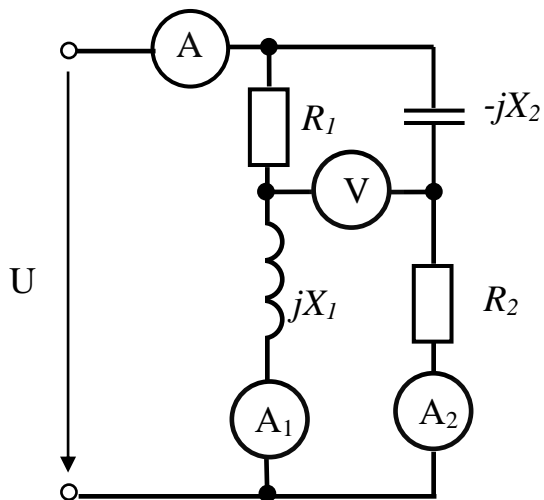


Рисунок 2.25.

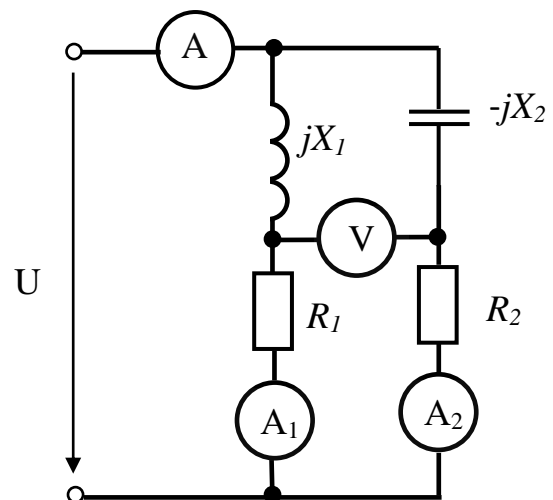


Рисунок 2.26.

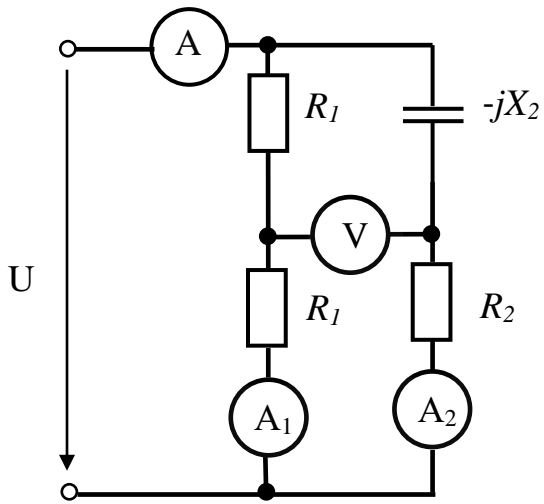


Рисунок 2.27.

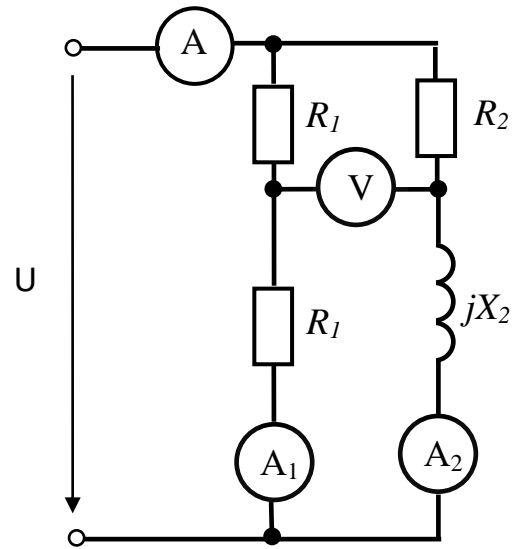


Рисунок 2.28.

Таблица 2.2

Вар-т	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Рис.	2.23	2.23	2.23	2.23	2.23	2.24	2.24	2.24	2.24	2.24
U, V	20	10	8	12	-	120	80	60	40	-
R_1, Ω	4	1	2	6	5	-	-	-	-	2
R_2, Ω	4	1	4	6	1	50	4	6	6	12
X_1, Ω	4	2	2	12	2	80	12	16	2	16
X_2, Ω	4	2	4	12	1	50	4	8	10	4

Вар-т	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Рис.	2.25	2.25	2.25	2.25	2.25	2.26	2.26	2.26	2.26	2.26
U, V	50	30	20	40	-	20	10	30	12	-
R_1, Ω	-	-	-	-	10	-	-	-	-	4
R_2, Ω	20	12	5	8	1	3	2	12	6	3
X_1, Ω	50	16	5	10	2	8	1	16	8	4
X_2, Ω	40	32	10	4	2	4	3	32	8	8

РОЗДІЛ 3. ТРИФАЗНІ ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА

3.1 Загальні теоретичні положення

Під трифазною симетричною системою Е.Р.С. розуміють сукупність трьох синусоїдальних Е.Р.С. однакової частоти і амплітуди, зрушених по фазі на 120° , миттєві значення яких:

$$e_A = E_m \sin(\omega t) \text{ V};$$

$$e_B = E_m \sin(\omega t - 120^\circ) \text{ V};$$

$$e_C = E_m \sin(\omega t - 240^\circ) = E_m \sin(\omega t + 120^\circ) \text{ V}.$$

Часова і векторна діаграми такої системи показані на рис. 3.1.

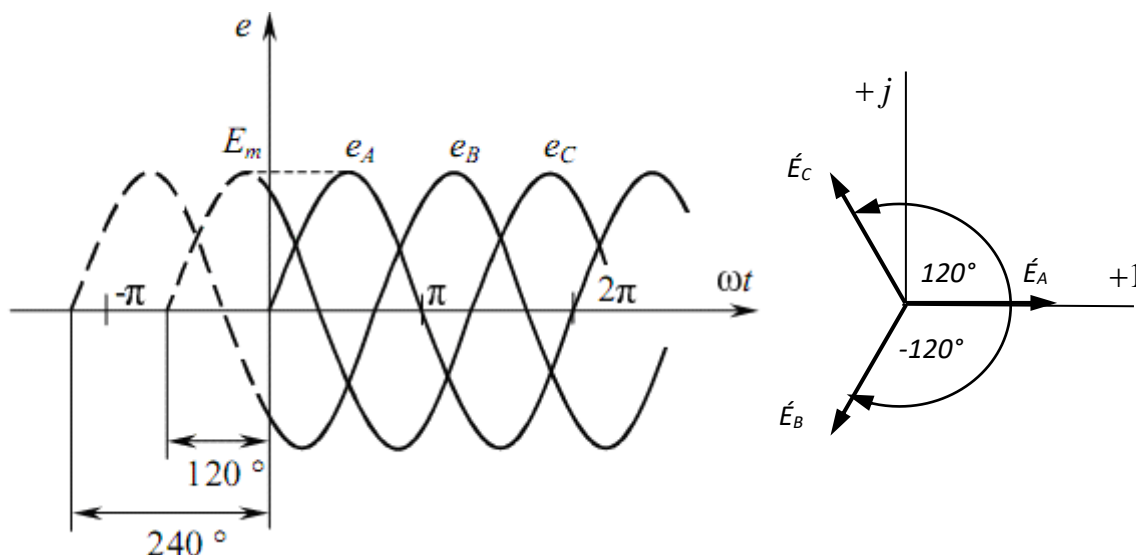


Рисунок 3.1 - Часова а) і векторна б) діаграми трифазної системи Е.Р.С.

Діючи значення цих Е.Р.С. в комплексній формі:

$$\dot{E}_A = E e^{j0^\circ} = E; \quad \dot{E}_B = E e^{-j120^\circ}; \quad \dot{E}_C = E e^{-j240^\circ} = E e^{j120^\circ}$$

Сукупність трифазної системи Е.Р.С., трифазного навантаження і з'єднуючих проводів називають трифазною системою.

Кожну частину такої системи, що складається з однієї Е.Р.С. і з'єднанням з нею навантаженням, називають фазою. Термін «фаза» застосовують і до самої Е.Р.С. джерела, і до підключеного до неї приймача.

Початки обмоток фазних Е.Р.С. (фаз генератора) позначають великими літерами А, В, С, початки фаз приймача - малими *a*, *b*, *c*.

Фази джерела і приймача можуть з'єднуватися по схемі «зірка» або «трикутник». Сполучення зіркою виходить при об'єднанні кінців фаз генератора (або фаз приймача) в одну точку, звану нейтральною або нульовою (на рис.3.2 N - нейтральна точка генератора, n - приймача). Провід, що сполучає спільні точки джерела і приймача, називають нейтральним або нульовим, решта проводів, які з'єднують приймач і генератор - лінійними.

Напруга між лінійними проводами називається лінійною і позначається $\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}$ (для генератора), $\dot{U}_{ab}, \dot{U}_{bc}, \dot{U}_{ca}$ (для приймача), напруга між лінійним дротом і нульовим, або інакше, між початком і кінцем кожної фази генератора (або приймача) $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ ($\dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c$) - фазним.

Струми в лініях (лінійні струми) позначають $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$, струми в кожній фазі навантаження (фазні струми) - $\dot{i}_a, \dot{i}_b, \dot{i}_c$, струм в нейтральному проводі - \dot{I}_{nN} .

Умовно позитивні напрями Е.Р.С., струмів і напруг показані на рис. 3.2.

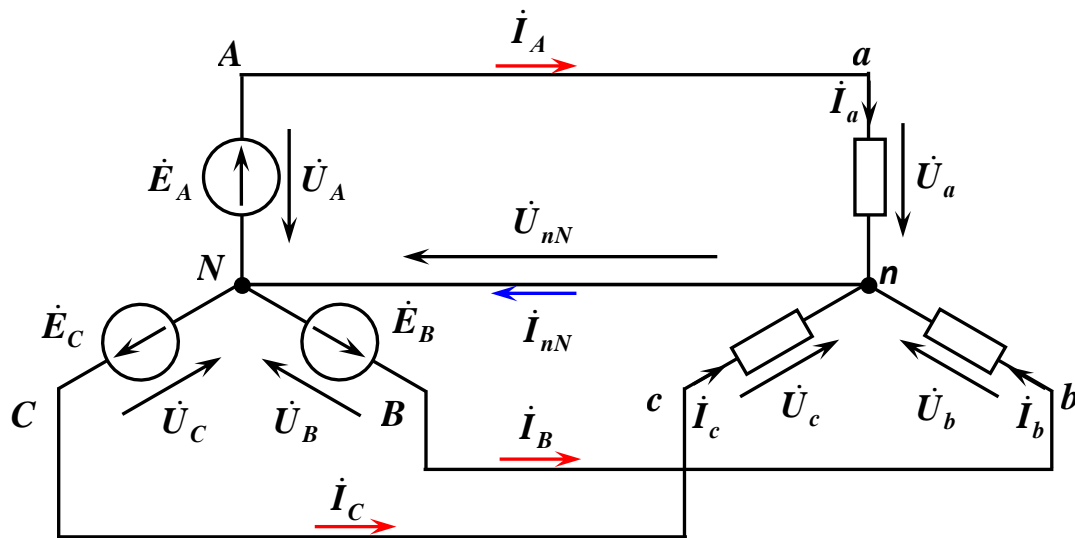


Рисунок 3.2 - Схема з'єднання «зірка» - «зірка» з нульовим проводом

На схемі рис. 3.3 як обмотки генератора, так і фази навантаження сполучені «трикутником». При такому з'єднанні кінець фази A генератора (приймача) з'єднується з початком наступної фази B , кінець фази B - з початком фази C , кінець фази C - з початком фази A .

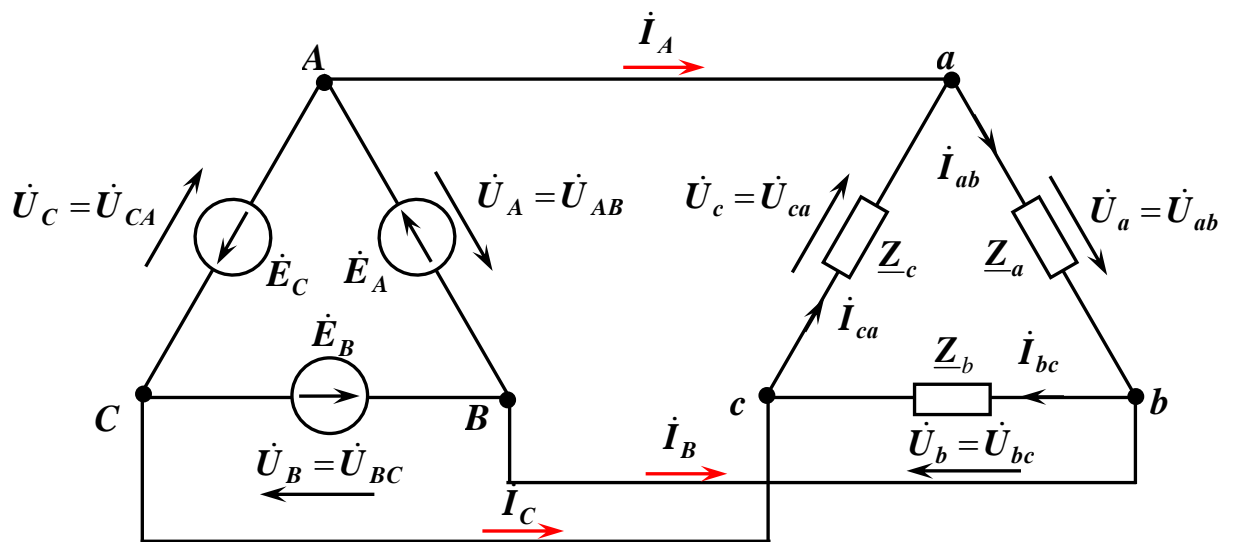


Рисунок 3.3 - Схема з'єднання «трикутник» - «трикутник»

У цій схемі всі проводи, що сполучають джерело з навантаженням, - лінійні. Якщо нехтувати їх опорами, то лінійна напруга на виводах обмоток генератора і затискач приймача буде рівною. У цій схемі відсутній нейтральний провід. Визначення фазних і лінійних напруг і струмів збігаються з наданими раніше.

Трифазні кола є різновидом кіл синусоїдного струму, і тому їх розраховують тими ж методами, що і однофазні кола, будують векторні і топографічні діаграми. Для їх аналізу введемо наступні допущення:

- система Е.Р.С. трифазного генератора симетрична;
- їх внутрішнім опором можна нехтувати;
- опір лінійних проводів дорівнює нулю.

Якщо до симетричного генератора підключити симетричний приймач, комплексні опори всіх фаз якого рівні: $\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c$, то в такому колі діє симетрична система струмів. Такий режим трифазного кола при симетричних системах напруги і струмів називають симетричним, інакше має місце несиметричний режим.

У симетричному колі при з'єднанні фаз генератора зіркою лінійні напруги \dot{U}_{AB} , \dot{U}_{BC} , \dot{U}_{CA} по модулю в $\sqrt{3}$ разів більше фазних :

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

а діючі значення комплексів лінійних струмів I_A , I_B , I_C дорівнюють діючим значенням фазних струмів

$$I_l = I_\phi$$

Самі лінійні струми однакові по модулю і зміщені по фазі щодо відповідної напруги на однаковий кут φ , величина якого визначається комплексним опором навантаження. В цьому випадку досить знайти струм в одній фазі, решта струмів буде зміщена по фазі на 120° . По першому закону Кирхгофа струм в нульовому дроті

$$I_{nN} = I_A + I_B + I_C = 0$$

Оскільки струм нейтрального дроту $I_{nN} = 0$, то і напруга \dot{U}_{nN} між центральними точками джерела і приймача дорівнює нулю. А значить, незалежно від наявності або відсутності нульового проводу і величини його опору, струми в кожній фазі приймача можуть бути визначені за законом Ома

$$\begin{aligned} \dot{i}_a &= \frac{\dot{U}_a}{\underline{Z}_a}; \\ \dot{i}_b &= \frac{\dot{U}_b}{\underline{Z}_b}; \\ \dot{i}_c &= \frac{\dot{U}_c}{\underline{Z}_c}. \end{aligned} \quad (3.1)$$

Для несиметричного кола при розрахунку зручно застосувати метод вузлової напруги в комплексній формі. Тоді напруга між нейтральними точками приймача і джерела визначається так:

$$\dot{U}_{nN} = \frac{\dot{U}_A \cdot \underline{Y}_A + \dot{U}_B \cdot \underline{Y}_B + \dot{U}_C \cdot \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + \underline{Y}_N}, \quad (3.2)$$

где $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ - комплексні фазні напруги джерел;

$\underline{Y}_A = \frac{1}{\underline{Z}_a}, \underline{Y}_B = \frac{1}{\underline{Z}_b}, \underline{Y}_C = \frac{1}{\underline{Z}_c}$ - комплексні провідності фаз (віток);

$\underline{Y}_N = \frac{1}{\underline{Z}_{nN}}$ - комплексна провідність нейтрального проводу.

На підставі другого закону Кирхгофа фазна напруга приймача

$$\dot{U}_a = \dot{U}_A - \dot{U}_{nN}, \quad \dot{U}_b = \dot{U}_B - \dot{U}_{nN}, \quad \dot{U}_c = \dot{U}_C - \dot{U}_{nN}.$$

Струми в лінійних проводах і фазах приймача визначаються за законом Ома

$$\begin{aligned}
 \dot{I}_A = \dot{I}_a &= \frac{\dot{U}_a}{\underline{Z}_a} = \frac{\dot{U}_A - \dot{U}_{nN}}{\underline{Z}_a}, \\
 \dot{I}_B = \dot{I}_b &= \frac{\dot{U}_b}{\underline{Z}_b} = \frac{\dot{U}_B - \dot{U}_{nN}}{\underline{Z}_b}, \\
 \dot{I}_C = \dot{I}_c &= \frac{\dot{U}_c}{\underline{Z}_c} = \frac{\dot{U}_C - \dot{U}_{nN}}{\underline{Z}_c},
 \end{aligned}
 \tag{3.3}$$

а струм в нейтральному проводі - по першому закону Кирхгофа

$$\dot{I}_N = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c$$

Якщо в схемі відсутній нейтральний провід, розрахунок лінійних (фазних) струмів проводять аналогічно, вважаючи у формулі (3.2) $\underline{Y}_N = 0$. В цьому випадку сума лінійних струмів, як і в симетричній системі

$$\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 0.$$

Якщо опором нейтрального проводу можна знехтувати, то напруга $\dot{U}_{nN} = 0$, і розрахунок струмів здійснюється так само, як в симетричному колі.

Якщо приймач сполучений по схемі «трикутник» (рис. 3.3), то незалежно від режиму роботи (симетричний або несиметричний) струми у фазах «*ab*, *bc*, *ca*» приймача визначаються так:

$$\begin{aligned}
 \dot{I}_{ab} &= \frac{\dot{U}_{AB}}{\underline{Z}_{ab}}, \\
 \dot{I}_{bc} &= \frac{\dot{U}_{BC}}{\underline{Z}_{bc}}, \\
 \dot{I}_{ca} &= \frac{\dot{U}_{CA}}{\underline{Z}_{ca}}
 \end{aligned}
 \tag{3.4}$$

де \dot{U}_{AB} , \dot{U}_{BC} , \dot{U}_{CA} - комплексні напруги джерела.

Лінійні струми визначаються геометричною побудовою або аналітично

$$\begin{aligned}
 \dot{I}_A &= \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}, \\
 \dot{I}_B &= \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}, \\
 \dot{I}_C &= \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}.
 \end{aligned}
 \tag{3.5}$$

У симетричному трифазному колі при з'єднанні приймача «трикутником» діючи значення комплексів струмів фаз навантаження $\dot{I}_{ab}, \dot{I}_{bc}, \dot{I}_{ca}$ в $\sqrt{3}$ разів менше лінійних $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$:

$$I_l = \sqrt{3}I_\phi$$

а діючи значення комплексів лінійних напруг $\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}$ дорівнюють діючим значенням фазних:

$$U_l = U_\phi$$

В трифазних колах розрізняють ті ж потужності, що і в однофазних: активну P , реактивну Q и повну S .

Потужності P і Q знаходять як суми потужностей трьох фаз:

$$P = \sum P_\phi;$$

$$Q = \sum Q_\phi.$$

Потужності кожної фази обчислюють по відомим з розрахунку однофазних кіл формулам (2.6 -2.12).

Споживаною є активна потужність. Активну потужність фази найпростіше визначити по формулі

$$P_\phi = I_\phi U_\phi \cos\varphi \text{ або } P_\phi = I_\phi^2 R_\phi.$$

Реактивну потужність фази шукають таким чином:

$$Q_\phi = I_\phi U_\phi \sin\varphi \text{ або } Q_\phi = I_\phi^2 X_\phi.$$

Повна потужність трифазного кола:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{(\sum P_\phi)^2 + (\sum Q_\phi)^2}.$$

У спільному випадку повна потужність трифазного кола є сумою потужностей окремих фаз:

$$\tilde{S} = \dot{U}_A^* \dot{I}_A + \dot{U}_B^* \dot{I}_B + \dot{U}_C^* \dot{I}_C = P + jQ.$$

При симетричному навантаженні потужності фаз однакові, тому

$$P = 3P_\phi = 3I_\phi U_\phi \cos\varphi;$$

$$Q = 3Q_\phi = 3I_\phi U_\phi \sin\varphi. \quad (3.6)$$

При з'єднанні зіркою $U_{\phi} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}}$ і $I_{\phi} = I_{\text{л}}$, а при з'єднанні трикутником $U_{\phi} = U_{\text{л}}$, а $I_{\phi} = \frac{I_{\text{л}}}{\sqrt{3}}$. Тому незалежно від схеми з'єднання фаз приймача можна отримати однакові формули потужностей, обчислених через лінійну напругу і струми:

$$\begin{aligned} P &= \sqrt{3}U_{\text{л}}I_{\text{л}}\cos\varphi; \\ Q &= \sqrt{3}U_{\text{л}}I_{\text{л}}\sin\varphi; \\ S &= \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{3}U_{\text{л}}I_{\text{л}}. \end{aligned} \quad (3.7)$$

3.2 Методика розв'язання типових завдань

Приклад 3.2.1 До трифазної мережі з лінійною напругою $U_{\text{л}} = 380 \text{ V}$ увімкнено трифазне симетричне навантаження $Z_1 = Z_2 = Z_3 = 22 \text{ }\Omega$, з'єднане «зіркою». Визначити фазні струми, струм в нейтральному проводі, активну потужність, споживану з мережі і побудувати векторну діаграму напруг і струмів.

Розв'язання

Приймач симетричний, тому в даному випадку не має значення наявність нейтрального проводу. Для більш загального випадку розглянемо алгоритм рішення при наявності нейтрального проводу.

Зобразимо схему підключення навантаження, з'єданого "зіркою" до трифазної мережі, що зображена на рис. 3.4.

При наявності нейтрального проводу потенціали точок N і n (см. рис. 3.4) рівні, тому фазні напруги джерела і приймача є однаковими:

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

Фазна напруга визначається з виразу

$$U_{\phi} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ V}.$$

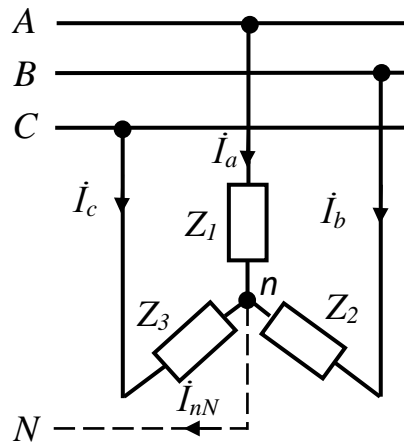


Рисунок 3.4 - Схема підключення навантаження, з'єднаного "зіркою"

Знаючи фазні напруги в комплексній формі, фазні струми визначають за законом Ома для ділянки кола в показовою формі комплексного числа

$$\dot{I}_a = \frac{\dot{U}_a}{\underline{Z}_1} = \frac{220e^{j0}}{22} = 10;$$

$$\dot{I}_b = \frac{\dot{U}_b}{\underline{Z}_2} = \frac{220e^{-j120}}{22} = 10e^{-j120};$$

$$\dot{I}_c = \frac{\dot{U}_c}{\underline{Z}_3} = \frac{220e^{j120}}{22} = 10e^{j120}.$$

Визначаємо струм в нейтральному проводі. Для цього переведемо отримані значення фазних струмів з показовою в алгебраїчну форму комплексного числа:

$$\dot{I}_a = 10 \cdot \cos 0 + j \cdot 10 \cdot \sin 0 = 10;$$

$$\dot{I}_b = 10 \cdot \cos(-120) + j \cdot 10 \cdot \sin(-120) = -5 - j8,7;$$

$$\dot{I}_c = 10 \cdot \cos(120) + j \cdot 10 \cdot \sin(120) = -5 + j8,7.$$

Струм в нейтральному проводі визначається як сума дійсної і уявної частин комплексного числа

$$\dot{I}_{nN} = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = (10 - 5 - 5) + j(8,7 - 8,7) = 0.$$

У симетричних приймачах активна потужність визначається за формулою

$$P = 3 \cdot P_\phi = 3 \cdot U_\phi \cdot I_\phi \cdot \cos \varphi = 3 \cdot 220 \cdot 10 = 6600 \text{ W}.$$

Побудову векторної діаграми починаємо з зображення фазних і лінійних напруг джерела в масштабі напруг на комплексній площині (рис. 3.5). На цієї же комплексної площині будемо вектора фазних струмів в масштабі струмів.

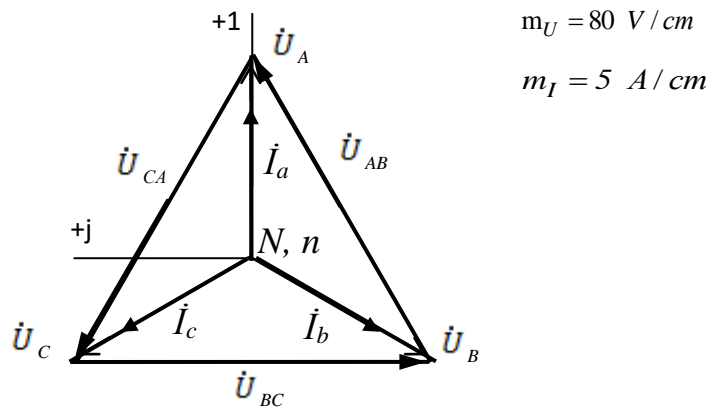


Рисунок 3.5 – Векторна діаграма напруг і струмів

Приклад 3.2.2

В трифазну трьохпровідну мережу з фазною напругою $U_\phi = 220 \text{ V}$ включено трифазне несиметричне навантаження $Z_1 = 10 + j10$; $Z_2 = 10 - j10$; $Z_3 = 20 \text{ }\Omega$, з'єднане за схемою "зірка" (рис. 3.6). Визначити фазні струми і показання ватметра.

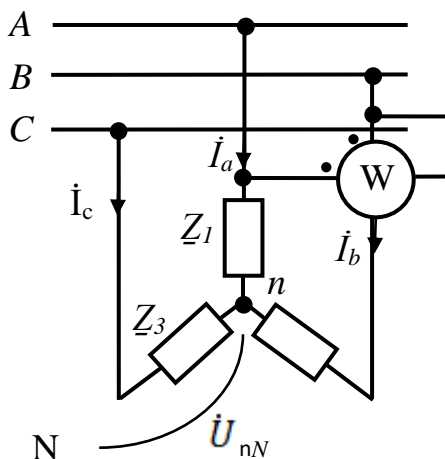


Рисунок 3.6 – Принципова схема підключення навантаження зіркою без нейтрального проводу.

Розв'язання

При відсутності в схемі нейтрального проводу та наявності несиметричного приймача розрахунок починаємо з визначення напруги між нейтральними точками n приймача та N джерела:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{nN} &= \frac{\dot{U}_a / \underline{Z}_a + \dot{U}_b / \underline{Z}_b + \dot{U}_c / \underline{Z}_c}{\frac{1}{\underline{Z}_a} + \frac{1}{\underline{Z}_b} + \frac{1}{\underline{Z}_c}} = \frac{220e^{j0} / 14.2e^{j45^\circ} + 220e^{-j120} / 14.2e^{-j45^\circ} + 220e^{j120} / 20}{\frac{1}{14.2e^{j45^\circ}} + \frac{1}{14.2e^{-j45^\circ}} + \frac{1}{20}} = \\ &= \frac{(11 - j11) + (4 - j15) + (-5.5 + j9.5)}{(0.05 - j0.05) + (0.05 + j0.05) + 0.05} = \frac{9.5 - j16.5}{0.15} = \frac{19e^{-j60}}{0.15} = 127e^{-j60} = 63,5 - j110 \end{aligned}$$

Фазні напруги приймача визначаємо за формулами:

$$\dot{U}_a = \dot{U}_A - \dot{U}_{nN} = 220 - (63,5 - j110) = 156,5 + j110 = 191e^{j35};$$

$$\dot{U}_b = \dot{U}_B - \dot{U}_{nN} = (-110 - j190,5) - (63,5 - j110) = -173,5 - j80,5 = 191e^{-j155};$$

$$\dot{U}_c = \dot{U}_C - \dot{U}_{nN} = (-110 + j190,5) - (63,5 - j110) = -173,5 + j300,5 = 347e^{j120}.$$

Визначаємо фазні струми:

$$\dot{I}_a = \dot{U}_a / \underline{Z}_a = 191e^{j35} / 14,2e^{j45} = 13,5e^{-j10};$$

$$\dot{I}_b = \dot{U}_b / \underline{Z}_b = 191e^{-j155} / 14,2e^{-j45} = 13,5e^{-j110};$$

$$\dot{I}_c = \dot{U}_c / \underline{Z}_c = 340e^{j120} / 20 = 17e^{j120}.$$

Для обчислення показів ватметра необхідно визначити лінійну напругу \dot{U}_{ab} :

$$\dot{U}_{ab} = \dot{U}_a - \dot{U}_b = (156,5 + j110) - (-173,5 - j80,5) = 330 + j190,5 = 381e^{j30}.$$

Визначаємо покази ватметра

$$P_W = U_{ab} I_b \cos(\dot{U}_{ab} \wedge \dot{I}_b) = 381 \cdot 13,5 \cdot \cos(30 - (-110)) = 381 \cdot 13,5 \cdot (-0,77) = -3940 \text{ W}.$$

Приклад 3.2.3

У трифазну мережу з лінійною напругою $U_{\text{Л}} = 380 \text{ V}$ (рис. 3.7) включені: трифазний активно-індуктивний симетричний приймач, сполучений «трикутником» з сумарною активною потужністю $P_{\Delta} = 4000 \text{ W}$ і коефіцієнтом потужності $\cos \varphi = 0,8$, та група з трьох однофазних приймачів з комплексними опорами фаз $\underline{Z}_a = 10 + j10$, $\underline{Z}_b = 14$, $\underline{Z}_c = -j14$.

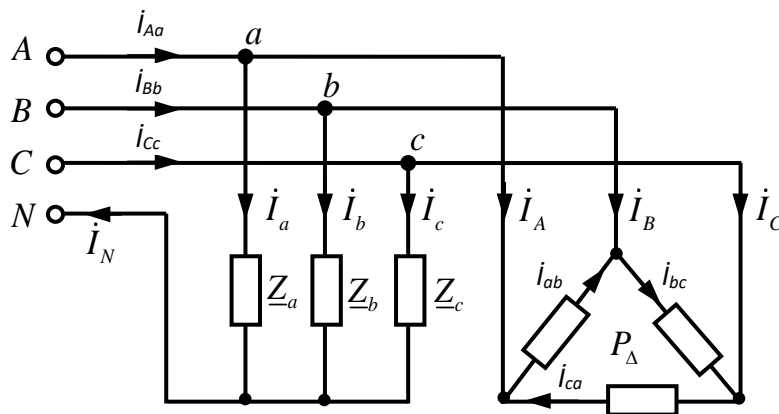


Рисунок 3.7 – Розрахункове трифазне коло

Комплексним методом розрахувати фазні та лінійні струми приймачів, активну потужність кожного однофазного приймача і сумарну активну потужність кола.

Побудувати окремо векторні діаграми:

- а) для групи однофазних приймачів, з'єднаних в схему «зірка»;
- б) для групи однофазних приймачів, з'єднаних в схему «трикутник»;
- с) поєднану векторну діаграму лінійних струмів для приймачів обох схем з'єднання.

Геометричною побудовою на поєднаній діаграмі знайти струми в лініях на ділянках Aa , Bb , Cc і в нейтральному дроті.

Прийmemo, що вектор фазної напруги U_A направлений по дійсній вісі «+1», тоді фазна напруга джерела запишеться таким чином:

$$\begin{aligned}\dot{U}_A &= U_\phi \cdot e^{j0^\circ} = 220 \cdot e^{j0^\circ}, \\ \dot{U}_B &= U_\phi \cdot e^{-j120^\circ} = 220 \cdot e^{-j120^\circ}, \\ \dot{U}_C &= U_\phi \cdot e^{j120^\circ} = 220 \cdot e^{j120^\circ},\end{aligned}$$

де

$$U_\phi = \frac{U_\Delta}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220V.$$

Лінійна напруга джерела розраховується так:

$$\begin{aligned}\dot{U}_{AB} &= \dot{U}_A - \dot{U}_B = 220 \cdot e^{j0^\circ} - 220 \cdot e^{-j120^\circ} = 380 \cdot e^{j30^\circ}; \\ \dot{U}_{BC} &= \dot{U}_B - \dot{U}_C = 220 \cdot e^{-j120^\circ} - 220 \cdot e^{j120^\circ} = 380 \cdot e^{-j90^\circ}; \\ \dot{U}_{CA} &= \dot{U}_C - \dot{U}_A = 220 \cdot e^{j120^\circ} - 220 \cdot e^{j0^\circ} = 380 \cdot e^{j150^\circ}.\end{aligned}$$

Оскільки опори з'єднуючих дротів $\underline{Z}_l = 0$, то фазні напруги приймачів будуть дорівнювати фазнім напругам джерела:

$$\text{в схемі «зірка»: } \dot{U}_a = \dot{U}_A; \quad \dot{U}_b = \dot{U}_B; \quad \dot{U}_c = \dot{U}_C;$$

$$\text{в схемі «трикутник»: } \dot{U}_{ab} = \dot{U}_{AB}; \quad \dot{U}_{bc} = \dot{U}_{BC}; \quad \dot{U}_{ca} = \dot{U}_{CA}.$$

Визначаємо фазні струми приймачів в схемі «трикутник»:

$$I_{\phi\Delta} = \frac{P_\Delta}{3 \cdot U_{\phi\Delta} \cdot \cos\varphi_\Delta} = \frac{4000}{3 \cdot 380 \cdot 0.8} = 4.38A.$$

В комплексному вигляді:

$$\dot{I}_{ab} = \dot{I}_{\phi_{\Delta}} \cdot e^{j(30^{\circ} - \varphi_{\Delta})} = 4.38 \cdot e^{j(30^{\circ} - 37^{\circ})} = 4.38 \cdot e^{-j7^{\circ}} = 4.35 - j0.53 ,$$

$$\dot{I}_{bc} = \dot{I}_{\phi_{\Delta}} \cdot e^{j(-90^{\circ} - \varphi_{\Delta})} = 4.38 \cdot e^{j(-90^{\circ} - 37^{\circ})} = 4.38 \cdot e^{-j127^{\circ}} = -2.63 - j3.49 ,$$

$$\dot{I}_{ca} = \dot{I}_{\phi_{\Delta}} \cdot e^{j(150^{\circ} - \varphi_{\Delta})} = 4.38 \cdot e^{j(150^{\circ} - 37^{\circ})} = 4.38 \cdot e^{j113^{\circ}} = -1.71 + j4.03 ,$$

тут $\varphi_{\Delta} = \arccos(\cos \varphi_{\Delta}) = \arccos(0.8) = 37^{\circ}$

В схемі «зірка»

$$\dot{I}_a = \frac{\dot{U}_a}{\underline{Z}_a} = \frac{220}{10 + j10} = 15.4 \cdot e^{-j45^{\circ}} = 11.1 - j11.1; \quad I_a = 15.4 \text{ A};$$

$$\dot{I}_b = \frac{\dot{U}_b}{\underline{Z}_b} = \frac{220 \cdot e^{-j120^{\circ}}}{14} = 15.4 \cdot e^{-j120^{\circ}} = -7.7 - j13.3; \quad I_b = 15.4 \text{ A};$$

$$\dot{I}_c = \frac{\dot{U}_c}{\underline{Z}_c} = \frac{220 \cdot e^{j120^{\circ}}}{-j14} = 15.4 \cdot e^{j210^{\circ}} = -13.3 - j7.7; \quad I_c = 15.4 \text{ A}.$$

Лінійні струми приймачів в схемі «трикутник»:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca} = (4.35 - j0.53) - (-1.71 + j4.03) = 6.06 - j4.56 = 7.58 \cdot e^{-j37^{\circ}} ;$$

$$I_A = 7.58 \text{ A} ;$$

$$\dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab} = (-2.63 - j3.49) - (4.35 - j0.53) = -6.98 - j2.96 = 7.58 \cdot e^{j201^{\circ}} ;$$

$$I_B = 7.58 \text{ A};$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc} = (-1.71 + j4.03) - (-2.63 - j3.49) = 0.92 + j7.52 = 7.58 \cdot e^{j83^{\circ}} ;$$

$$I_C = 7.58 \text{ A}.$$

В схемі «зірка» лінійні струми дорівнюють фазним.

Активні потужності однофазних приймачів:

$$P_a = U_A \cdot I_a \cdot \cos \varphi_a = 220 \cdot 15.4 \cdot \cos[0^{\circ} - (-45^{\circ})] = 220 \cdot 15.4 \cdot \cos 45^{\circ} = 2380 \text{ W}$$

$$P_b = U_B \cdot I_b \cdot \cos \varphi_b = 220 \cdot 15.4 \cdot \cos[-120^{\circ} - (-120^{\circ})] = 220 \cdot 15.4 \cdot \cos 0^{\circ} = 3400 \text{ W} ;$$

$$P_c = U_C \cdot I_c \cdot \cos \varphi_c = 220 \cdot 15.4 \cdot \cos[120^{\circ} - 210^{\circ}] = 220 \cdot 15.4 \cdot \cos(-90^{\circ}) = 0 \text{ W} .$$

Активна потужність всього кола:

$$P_{\Sigma} = P_{\Delta} + P_a + P_b + P_c = 4000 + 2380 + 3400 + 0 = 9780 \text{ W}$$

Векторні діаграми приведені на рис. 3.8 – 3.10.

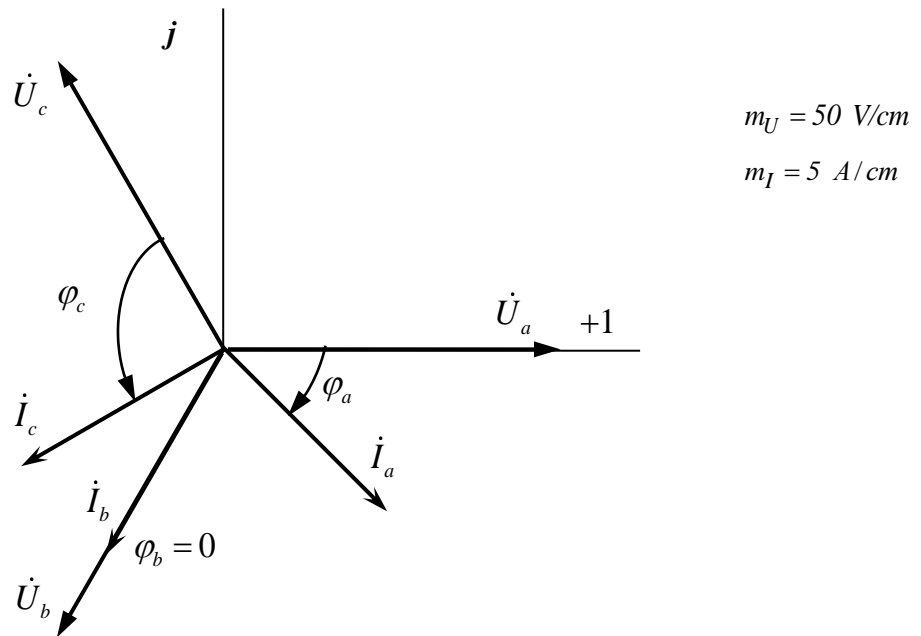


Рисунок 3.8 – Векторні діаграми струмів та напруги для групи

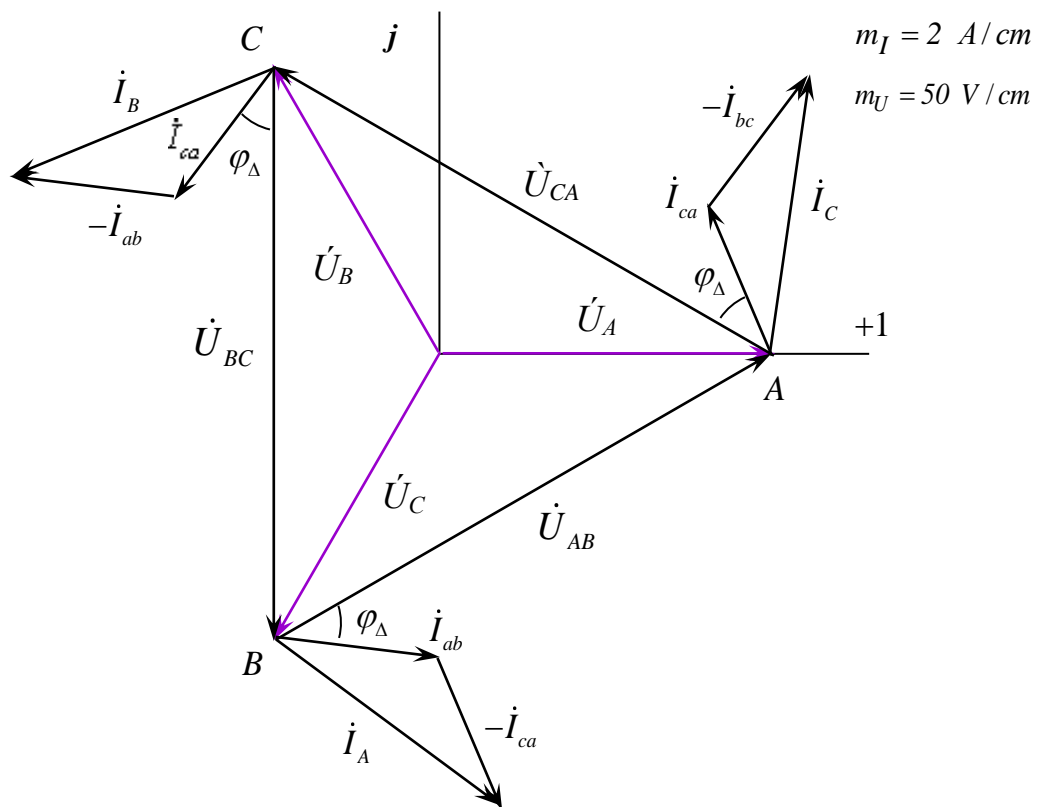


Рисунок 3.9 – Векторні діаграми струмів і напруги для групи споживачів, сполучених в схему «трикутник»

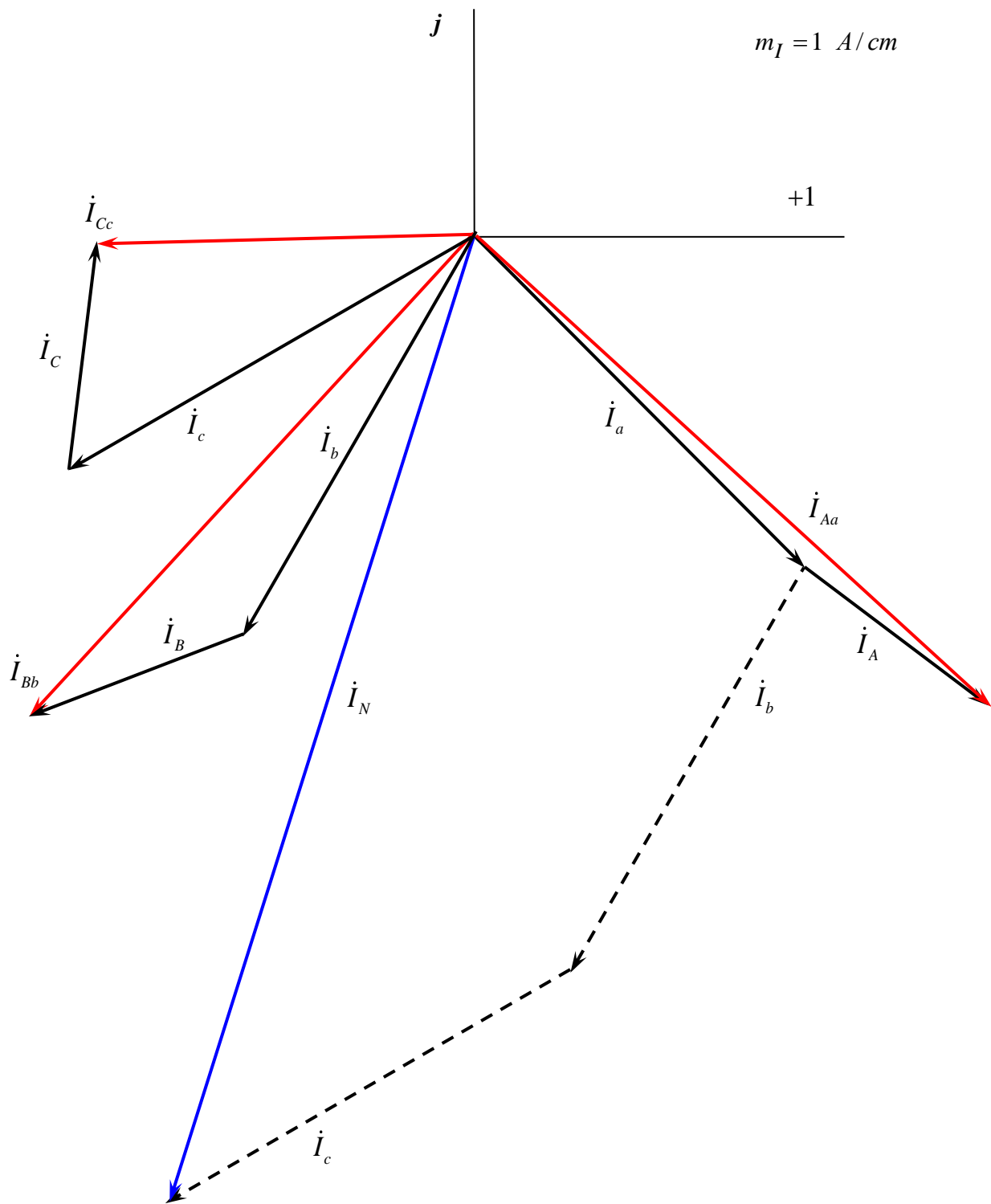


Рисунок 3.10 - Поєднана векторна діаграма лінійних струмів для приймачів обох схем з'єднання

3.3 Завдання для самостійної роботи.

Завдання 3.3.1 В трифазну мережу з лінійною напругою $U_L = 220 \text{ V}$ і частотою $f = 50 \text{ Hz}$ включені три конденсатори з'єднані за схемою "зірка". Ємності конденсаторів $C_1 = 5 \text{ } \mu\text{F}$; $C_2 = 10 \text{ } \mu\text{F}$; $C_3 = 15 \text{ } \mu\text{F}$. Визначити фазні струми і струм в нейтральному проводі.

Відповідь: $I_{1\phi} = 2 \text{ A}$; $I_{2\phi} = 0,4 \text{ A}$; $I_{3\phi} = 0,6 \text{ A}$; $I_0 = 0,33 \text{ A}$.

Завдання 3.3.2 Визначити повну S , активну P , і реактивну Q потужності трифазного струму, якщо при з'єднанні за схемою "зірка" $U_L = 34,6 \text{ kV}$, струм $I_\phi = 10200 \text{ A}$ і $\cos \varphi = 0,85$.

Відповідь: $S = 609550 \text{ kVA}$; $P = 518120 \text{ kW}$; $Q = 321000 \text{ kvar}$.

Завдання 3.3.3 Трифазне коло знаходилося у симетричному режимі. Навантаження з'єднане зіркою без нульового проводу. Як зміняться напруги U_a та U_c приймача при обриванні проводу фази В (навести аналітичні викладки).

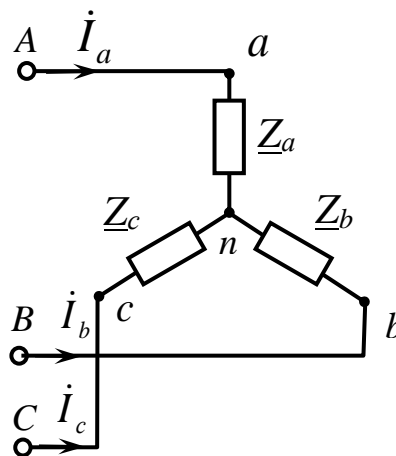


Рисунок 3.11 - Принципова схема підключення навантаження зіркою без нейтрального проводу

Відповідь: Напруга збільшиться в 0.87 разів

Завдання 3.3.4 Трифазне коло знаходилося у симетричному режимі. Навантаження з'єднане зіркою без нульового проводу. Як зміняться напруги U_a та U_c приймача при короткому замиканні проводу фази В приймача (навести аналітичні викладки).

Відповідь: Напруга збільшиться в 1.73 разів

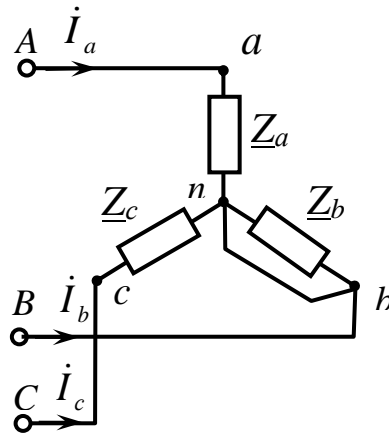


Рисунок 3.12 - Принципова схема підключення навантаження зіркою без нейтрального дроту.

Завдання 3.3.5 Визначити струм в нейтральному проводі, якщо $I_A = I_B = I_C = 5 \text{ A}$.

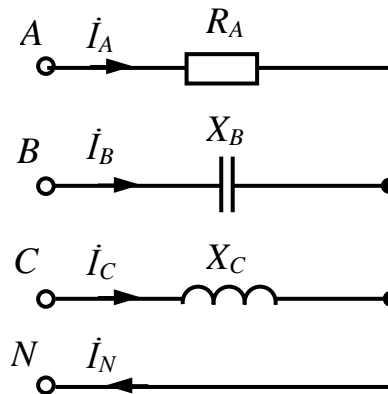


Рисунок 3.13 - Принципова схема підключення навантаження зіркою з нейтральним проводом

Відповідь: $I_N = 13,7 \text{ A}$

Завдання 3.3.6 В трифазну мережу з лінійною напругою $U_L = 220 \text{ V}$ підключене навантаження із 150 ламп розжарювання потужністю 60 W кожна, включених трикутником і розподілених рівномірно. Визначити струми I_L в проводах лінії.

Відповідь: $I_L = 23,6 \text{ A}$.

Завдання 3.3.7 Як зміниться струм в фазі ab при обриві лінійного проводу Aa (навести аналітичні викладки), якщо $Z_{ab} = Z_{bc} = Z_{ca}$?

Відповідь: струм зменшиться в 2 рази

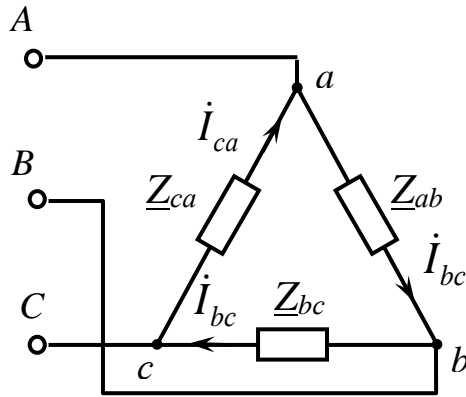


Рисунок 3.14 - Принципова схема підключення навантаження трикутником

Завдання 3.3.8 Знайти показання ватметра, якщо $U_l = 200\text{ V}$, $R = 20\ \Omega$.

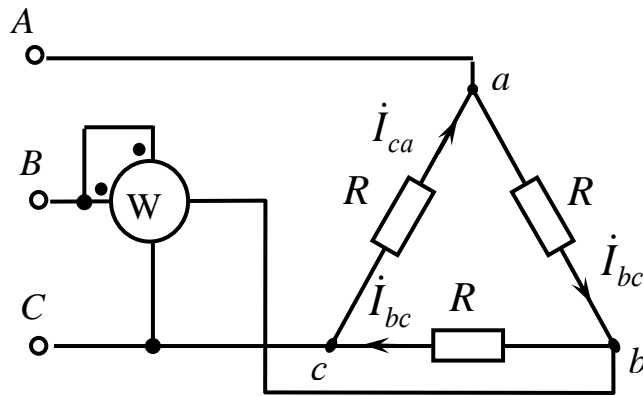


Рисунок 3.15 - Принципова схема підключення навантаження трикутником

Відповідь: $P = 3000\text{ W}$.

3.4 Контрольні завдання

Завдання 3.4.1 Для електричного кола, зображеного на рис. 3.16 визначити фазні струми і побудувати векторну діаграму напруг і струмів. Параметри електричного кола приведені в Таблиці 3.1.

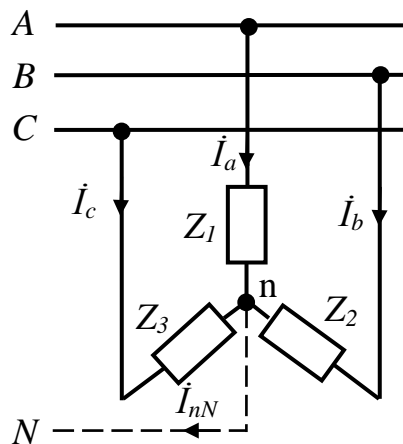


Рисунок 3.16 - Схема підключення навантаження з'єднаного "зіркою"

Таблиця 3.1.

№	Напруга джерела, V	Комплексне навантаження фаз приймача		
		\underline{Z}_1	\underline{Z}_2	\underline{Z}_3
1	2	3	4	5
1	$U_\phi = 127$	5	$3 + j4$	$3 - j4$
2	$U_\phi = 100$	10	10	$-j10$
3	$U_\phi = 127$	$+j10$	10	10
4	$U_\lambda = 200$	25	25	$-j25$
5	$U_\phi = 127$	$10 + j10$	$10 + j10$	$10 - j10$
6	$U_\lambda = 220$	30	$+j30$	30
7	$U_\lambda = 220$	17,3	$+j30$	$-j30$
8	$U_\lambda = 380$	10	$10e^{+j60}$	$10e^{+j60}$
9	$U_\lambda = 380$	$30e^{+j10}$	$40e^{+j10}$	$50e^{+j10}$
10	$U_\phi = 127$	$-j12,7$	$+j12,7$	12,7
11	$U_\phi = 220$	10	$-j10$	$+j10$
12	$U_\phi = 100$	$8 + j6$	$8 + j6$	10
13	$U_\lambda = 200$	$33 - j19$	40	$33 - j19$
14	$U_\lambda = 400$	$+j20$	$11 + j19$	$11 + j19$
15	$U_\phi = 36$	$9 - j5$	$9 + j5$	$9 + j5$
16	$U_\lambda = 38$	$1 + j1$	$1 - j1$	$1 + j1$
17	$U_\lambda = 22$	0,8	$0,8 + j0,6$	$0,8 + j0,6$
18	$U_\lambda = 220$	11	11	$11e^{+j30}$
19	$U_\lambda = 660$	100	$+j50$	$+j50$
20	$U_\lambda = 380$	$+j22$	$-j22$	22

Завдання 3.4.2 Для електричного кола, зображеного на рис. 3.17 визначити фазні та лінійні струми і побудувати векторну діаграму напруг і струмів. Параметри електричного кола приведені в Таблиці 3.1.

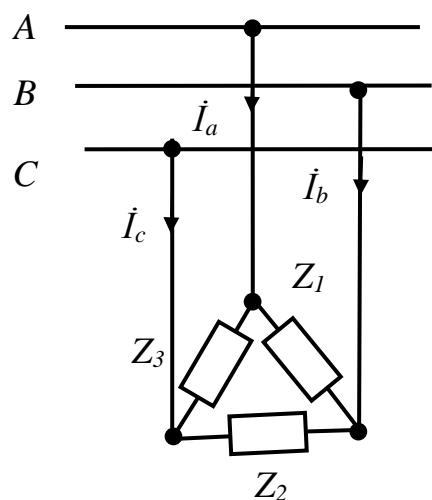


Рисунок 3.17 - Схема підключення навантаження з'єднаного "трикутником"

РОЗДІЛ 4. ЕЛЕКТРИЧНІ ВИМІРЮВАННЯ

4.1 Вступ

Пізнання людиною навколишнього світу нерозривно пов'язане зі спостереженнями та експериментами. Впродовж всієї історії розвитку науки і техніки перед людиною виникало і виникає безліч питань і проблем, для вирішення яких необхідно мати кількісну інформацію про ту чи іншу властивість об'єктів матеріального світу. Основним способом отримання такої інформації є вимірювання, при правильному виконанні яких знаходиться результат виміру, що з більшою або меншою точністю відображає властивості об'єкта пізнання.

В свою чергу точність результату вимірювання визначається ступенем досконалості вимірювань і вимірювальних приладів, який напряму залежить від розвитку сучасної науки.

Таким чином, вимірювання служать джерелом нашого наукового і практичного пізнання. Їх результати дуже часто виступають в якості критерію істини, оскільки критерієм істини завжди служить експеримент.

4.2 Основні метрологічні поняття

Вимірювання - процес знаходження значення фізичної величини дослідним шляхом за допомогою спеціальних технічних засобів.

Існують два види вимірювань: *прямі* та *непрямі*.

Якщо значення фізичної величини отримують без перетворення її роду та без використання рівнянь зв'язку з іншими величинами, а безпосередньо в вигляді показу вимірювального приладу, проградуйованого в одиницях цієї величини (вимірювання напруги вольтметром, сили струму – амперметром), або шляхом порівняння її розміру з розміром, що відтворюється мірою (вимірювання довжини метром, маси – на рівноплечих вагах), то таке вимірювання є *прямим*.

Якщо ж значення фізичної величини отримують після перетворення її роду або з використанням рівнянь зв'язку з іншими величинами, значення яких частіше за все визначають за допомогою прямого вимірювання, то це - *непряме вимірювання*.

Серед непрямих вимірювань найбільш поширені опосередковані, прикладом якого є обчислення електричного опору R резистора через напругу U та силу струму I за формулою

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

Взаємодія засобів вимірювання з об'єктом при вимірюванні засноване на фізичних явищах, сукупність яких становить *принцип вимірювання*, а сукупність прийомів використання принципів і засобів вимірювання називається *методом вимірювань*.

Принцип вимірювання - фізичне явище або ефект, покладені в основу вимірювання.

Метод вимірювань - це прийом або сукупність прийомів порівняння вимірюваної фізичної величини з її одиницею відповідно до реалізованим принципом вимірювань.

Залежно від сукупності прийомів використання принципів і засобів вимірювань всі методи поділяються на методи безпосередньої оцінки та порівняння з мірою.

Метод безпосередньої оцінки передбачає визначення вимірюваної величини безпосередньо по відліковому пристрою вимірювального приладу прямої дії.

Метод порівняння - метод, за яким вимірювана величина порівнюється з величиною, що відтворюється мірою. Характерна риса методу - безпосередня участь міри в процесі вимірювання. Ці методи забезпечують більшу точність вимірювання.

Залежно від потрібної точності результату всі вимірювання поділяють на такі класи:

еталонні – вимірювання якнайвищої точності (для відтворення основних одиниць фізичних величин, вимірювання фізичних констант);

контрольно-перевірні, похибка яких не може перевищувати певного значення (використовуються для контрольної перевірки інших засобів вимірювання);

технічні, які підрозділяються на *лабораторні*, що здійснюються під час проведення різних досліджень, та *виробничі*, які виконуються для здобуття інформації в системах керування технологічними процесами.

Засоби вимірювальної техніки – це технічні засоби, які застосовуються під час вимірювань і мають нормовані метрологічні характеристики. До них відносять міри, вимірювальні перетворювачі, вимірювальні пристрої.

Міра – зразок, який служить для дійсного відтворення одиниці вимірювання конкретної фізичної величини. Найточніша міра – еталон. За його допомогою перевіряють зразкові міри, які використовують для перевірки робочих мір, що застосовуються у лабораторній і виробничій практиці.

Вимірювальний перетворювач – засіб, призначений для перетворення вимірювальної величини в сигнал вимірювальної інформації у формі, придатній

для її передавання, подальшого перетворення, обробки та зберігання, але не придатній для безпосереднього сприйняття людиною.

Вимірювальний прилад – пристрій, за допомогою якого виробляється сигнал вимірювальної інформації і подається у формі, доступній сприйняттю спостерігачем.

За родом вимірювальної величини електровимірювальні прилади розподіляються на вимірники напруги – вольтметри, вимірники струму – амперметри, вимірники опору – омметри, вимірники активної потужності – ватметри, вимірники електроенергії – лічильники, вимірники зсуву фаз – фазометри, вимірники частоти – частотоміри та ін. Існують також комбіновані прилади.

За видом отриманої вимірювальної інформації розрізняють прилади, що показують, реєструють, друкують, інтегрують, а також самописні і підсумовуючі.

За видом представлення інформації прилади також поділяють на *аналогові* та *цифрові*.

В *аналогових* результат має вигляд неперервної функції вимірювальної величини; в *цифрових* автоматично виробляються дискретні сигнали і результати видаються в цифровій формі.

За принципом дії і конструктивною реалізацією прилади можуть бути електромеханічними або електронними. У перших використовуються елементи, що електромеханічно взаємодіють та переміщуються. У других основними функціональними елементами є електронні блоки.

4.3 Похибки вимірювань

Похибкою вимірювання називають відхилення виміряного значення фізичної величини від її справжнього значення.

Похибка вимірювань, в загальному випадку, може бути викликана наступними причинами:

- недоліком принципу дії і недостатньою якістю елементів використовуваного засобу вимірювання;
- недоліком методу вимірювань і впливом використовуваного засобу вимірювання на саму вимірювану величину, залежним від способу використання даного засобу вимірювання;
- суб'єктивними помилками експериментатора.

За способом вираження похибки поділяються на *абсолютні* та *відносні*. Класична метрологія виходить з позиції, що результат вимірювання завжди відрізняється від *істинного* значення вимірюваної величини.

Оскільки *істинне* значення вимірюваної величини залишається невідомим, то його заміняють *дійсним* значенням, тобто значенням величини, знайденим експериментальним шляхом і настільки наближеним до істинного значення, що може бути використано замість нього.

Абсолютною похибкою вимірювань називають різницю між вимірним і дійсним значеннями вимірюваної величини:

$$\Delta = X - X_D \quad (4.1)$$

де Δ - абсолютна похибка, X - вимірне значення, X_D - дійсне значення вимірюваної величини.

Абсолютна похибка має розмірність вимірюваної величини. Знак абсолютної похибки буде позитивним, якщо вимірне значення більше дійсного, і негативним в іншому випадку.

Для більш зручнішого порівняння метрологічних характеристик результатів, отриманих за допомогою різних приладів, розраховують значення відносної похибки.

Відотною похибкою називають відношення абсолютної похибки до дійсного значення вимірюваної величини:

$$\delta = \frac{\Delta}{X_D} = \frac{X - X_D}{X_D} \quad (4.2)$$

Відносна похибка може виражатися не тільки у відносних величинах, але й у відсотках (%)

$$\delta = \frac{\Delta}{X_D} \cdot 100\% = \frac{X - X_D}{X_D} \cdot 100\% \quad (4.3)$$

Аналіз останніх двох рівнянь дозволяє дійти висновку, що чим менша похибка вимірювання, тим вища його точність, отже, тим менша різниця між істинним значенням фізичної величини і результатом її вимірювань. Із збільшенням похибки зменшується точність.

Точність вимірювання - головна характеристика якості вимірювання, що відображає близькість результату вимірювання до істинного значення вимірюваної величини.

Кількісно точність вимірювання визначається як величина, обернена до відносної похибки:

$$T = \left[\frac{\Delta X}{X_D} \right]^{-1} = \frac{1}{\delta} \quad (4.4)$$

За причинами появи або місцем виникнення виділяють методичну, інструментальну та суб'єктивну складові похибок вимірювання.

Зрозуміло, що методична складова похибки виникає через недосконалість вимірювань: недосконалість методу вимірювання або деяких припущень чи наближень в розрахункових формулах.

Суб'єктивна складова може виникати через недосвідченість та неуважність спостерігача, через недосконалість органів чуття...

Інструментальна складова зумовлена властивостями засобів вимірювальної техніки та залежить від умов експлуатації.

Похибку, яка виникає за нормальних умов експлуатації засобу вимірювальної техніки називають *основною*. Наприклад нормальною областю температури для якогось приладу може бути температура $t = (20 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$, напруга $U = (220 \pm 8) \text{ V}$. Якщо засіб використовується в інших умовах, то це може привести до появи *додаткових* похибок.

Межі основної похибки, вплив умов експлуатації, що відрізняються від нормальних, вказують в технічній документації до кожного засобу.

Основною характеристикою, що визначає гарантовані межі значень основної та додаткової похибок, є *клас точності засобу вимірювальної техніки*, який може бути представлений в вигляді абсолютної Δ , відносної δ або зведеної γ похибок і його значення відображається на шкалі (см. Табл. 4.1).

Таблиця 4.1

Правила і приклади позначення класів точності

Формула для граничної основної похибки		Позначення класу точності на шкалі приладу	
		Загальний вигляд	приклад
$\Delta = \pm a$ $\Delta = \pm (a + b \cdot X)$	$\pm a$, од. величини X $\pm (a + b \cdot X)$, од. величини X	Римськими або латинськими літерами	L
$\delta = (100 \cdot \Delta) / X = \pm p$ $\delta = [c + d(X_{\max} / X - 1)]$	$\pm p, \%$ $\pm [c + d(X_{\max} / X - 1)], \%$	\textcircled{p} c/d	$\textcircled{1,5}$ 1,0/0,5
$\gamma = (100 \cdot \Delta) / X_{\text{н}} = \pm k$ якщо $X_{\text{н}} = L_{\text{шк}}$, то $\gamma = (100 \cdot \Delta') / L_{\text{шк}} = \pm k$	$\pm k, \%$ $\pm k, \%$ ✓	k k ✓	1,5 1,5 ✓

Для аналогових вимірювальних приладів зведена похибка $\gamma, \%$ виражається відношенням максимального значення абсолютної похибки для всього діапазону вимірювань $\Delta_{x \max}$ до нормованого значення $X_{\text{н}}$ цього приладу:

$$\gamma = \frac{\Delta_{X_{\max}}}{X_H} \cdot 100\%. \quad (4.5)$$

Для приладу, шкала якого має наявний нуль з початку, нормоване значення X_H дорівнює максимальному значенню шкали; для приладів з двобічної шкалою – арифметичної сумі обох діапазонів.

За найбільшим в межах робочої частини шкали приладу значенням γ визначають клас точності k . Для аналогових приладів встановлено такі класи точності: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5 (зразкові та точні прилади); 1,0; 1,5; 2,5; 4,0; 5,0 (робочі прилади). При цьому найбільша зведена похибка $\gamma_{\max} \leq k$.

Для підвищення точності вимірювання приладами з класом точності γ необхідно, щоб границя вимірювання приладу X_H була якомога ближчою до вимірюваного значення.

Значення похибки необхідно знати для грамотного запису результату вимірювання, який згідно стандарту України повинен бути представлений в формі

$$\bar{X} \pm \Delta, P_d.$$

\bar{X} - виправлений результат вимірювання, який дорівнює показу приладу з урахуванням постійної систематичної складової похибки – поправки ∇ :

$$\bar{X} = X + \nabla$$

Δ – похибка результату вимірювання;

P_d – довірна вірогідність оцінки достовірності результату похибки вимірювання (для технічних вимірювань приймається $P_d = 0,9$ або $0,95$).

Округлення результату вимірювання починається з округлення похибки, яка має бути представлена числом з двох значущих цифр (наприклад, 0,25; 0,017; $1,4 \cdot 10^3$; $2,3 \cdot 10^{-3}$). Якщо перша значуща цифра дорівнює чи більша 3, то можна залишати тільки одну цифру (наприклад, $0,35 \rightarrow 0,4$).

Результат вимірювання має закінчуватися цифрою того ж самого десяткового розряду, що і похибка.

Округлення результату і похибки виконують по правилам:

- остання цифра, яку залишають, не змінюється, якщо наступна за нею цифра менш ніж 5;
- цифра збільшується на одиницю, якщо наступна за нею цифра більш ніж 5;
- якщо цифра, яку відкидають, дорівнює 5, то цифра перед нею, яку залишають, не змінюється, якщо вона парна, збільшують на одиницю, якщо непарна.

Наприклад:

$$0,25 \pm 0,35 \rightarrow 0,2 \pm 0,4$$

$$0,25 \pm 0,053 \rightarrow 0,25 \pm 0,05$$

$$0,4 \pm 0,18 \rightarrow 0,40 \pm 0,18$$

$$0,25 \pm 0,017 \rightarrow 0,250 \pm 0,017$$

4.4 Вмикання електровимірювальних приладів і поширення границь вимірювання

Розглянемо три найбільш поширені прилади: амперметр, вольтметр та ватметр, схеми підключення яких і умовні позначення зображено на рис. 4.1.

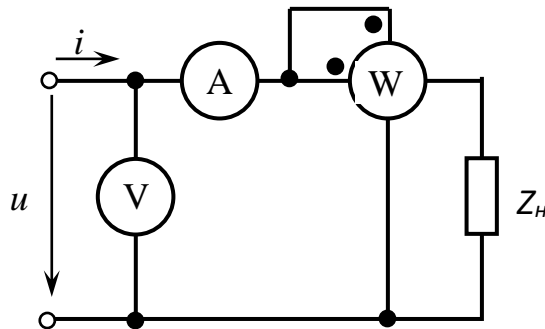


Рисунок 4.1 - Схема вимірювання струму, напруги і потужності приймача

Амперметр та струмові затискачі ватметра включаються послідовно з навантаженням Z_n і повинні мати відносно нього несумірно малий опір R_A . Вольтметр та виводи обмотки напруги ватметра вмикаються паралельно навантаженню і повинні мати відносно нього несумірно великий опір R_V . У приладів, які мають дві пари затискачів (ватметра, фазометра) однойменні виводи вимірювальних котушок напругі і струму маркуються зірочкою або точкою.

В аналогових приладах з одним вимірювальним колом (наприклад амперметр, вольтметр, омметр) ціну поділки шкали визначають через значення межі вимірювання приладу X_0 і кількість поділок шкали N :

$$C_{np} = \frac{X_0}{N}. \quad (4.6)$$

Якщо прилад має декілька незалежних вимірювальних кіл, ціну поділки визначають з урахуванням обраного діапазону кожного. Наприклад, для ватметра з нормованими (максимально можливими) значеннями U_n та I_n :

$$C_w = \frac{U_n \cdot I_n}{N_w}. \quad (4.7)$$

Для використання приладів в колах з напругами та струмами, значення яких перевищують границі U_n та I_n , в вимірювальне коло приладу підключають шунт

або трансформатор струму (TA) для поширення струмових границь, додатковий резистор або трансформатор напруги (TV) – границь напруги (рис. 4.2).

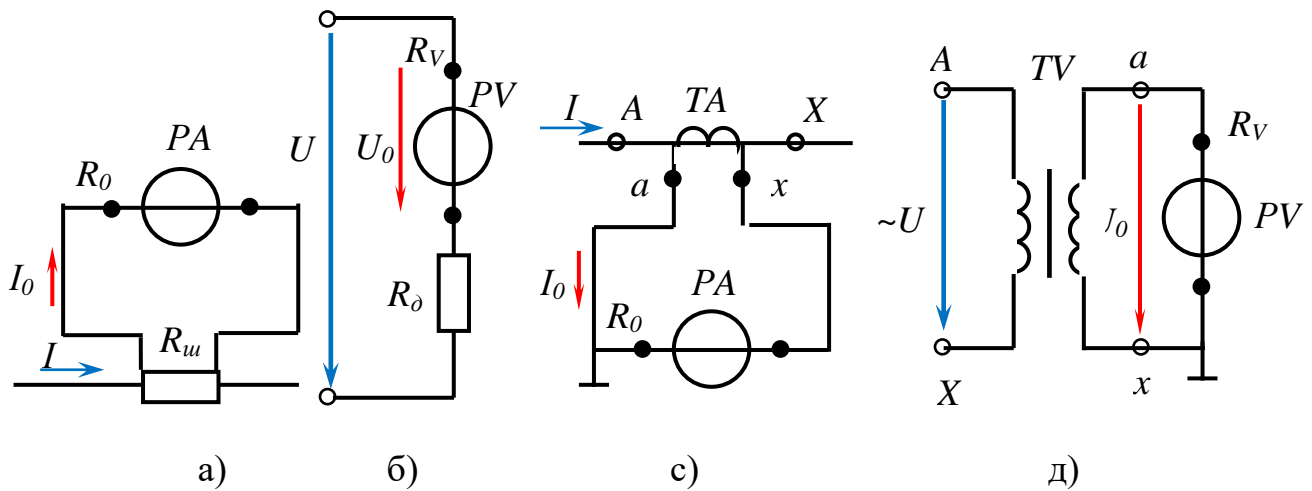


Рисунок 4.2 - Схеми розширення границь вимірювання струму та напруги

Значення опорів шунта та додаткового резистора знаходять за законами Кірхгофа:

$$R_{ш} = \frac{R_0}{\frac{I}{I_0} - 1} = \frac{R_0}{K_{ш} - 1} \quad (4.8)$$

$$R_д = \frac{U - U_0}{I_0} = R_0 \left(\frac{U}{U_0} - 1 \right) \quad (4.9)$$

де $K_{ш} = \frac{I}{I_0}$ - коефіцієнт шунтування;

$K_д = \frac{U}{U_0}$ – коефіцієнт розширення діапазону вимірювання.

При використанні вимірювальних трансформаторів виміряні значення струму та напруги складають:

$$I = k_I \cdot I_A, \quad (4.10)$$

$$U = k_U \cdot U_V, \quad (4.11)$$

де k_I та k_U коефіцієнти трансформації TA та TV .

4.5 Визначення результату опосередкованого вимірювання

При опосередкованому вимірюванні результат знаходять на підставі відомої залежності (рівняння вимірювань)

$$X = f(x_1, x_2, \dots, x_i)$$

між вимірюваною величиною X та іншими величинами (аргументами) x_1, x_2, \dots, x_i , значення яких здобувають будь-яким видом вимірювань, наприклад, прямими.

В цьому випадку визначення основної інструментальної похибки залежить від класів точності приладів, за допомогою яких здобувають значення допоміжних величин, та виду рівняння залежності між величинами.

Якщо таке рівняння є сумою вимірних величин $X = ax_1 + bx_2 + \dots + kx_i$, то абсолютна похибка результату знаходиться, як середньоквадратичне від суми основних абсолютних похибок допоміжних величин:

$$\Delta = \sqrt{(a\Delta_1)^2 + (b\Delta_2)^2 + \dots + (k\Delta_i)^2}. \quad (4.12)$$

Якщо ж рівняння є добутком вимірних величин $X = kx_1^a x_2^b \dots$, то спочатку знаходиться середньоквадратичне значення відносної похибки результату:

$$\delta = \sqrt{(a\delta_1)^2 + (b\delta_2)^2 \dots}. \quad (4.13)$$

Потім згідно формули (4.3), розраховується абсолютна похибка результату

$$\Delta = \frac{\delta \cdot X}{100}.$$

Результат вимірювання має бути представлений за стандартом України у формі

$$X = \bar{X} \pm \Delta, P_d.$$

4.6 Приклади організації електричних вимірювань

4.6.1 Вимірювання електричних опорів в колах постійного струму

Найпростіше опір будь якого елемента електричного кола постійного струму вимірюється опосередкованим методом - за допомогою вольтметра і амперметра. За законом Ома, якщо відомі напруга U на ділянці кола R_x і струм I , то її опір

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

Прилади можна підключити двома способами (рис. 4.3). Однак жодна з цих схем не забезпечує водночас двох шуканих значень – напруги та струму.

У першому випадку (рис. 4.3 а)) показ амперметра відповідає значенню I , проте показ вольтметра завищений: $U_V = U + I_A R_A$, де R_A – внутрішній опір амперметра.

У другому випадку (рис. 4.3 б)) показ вольтметра U_V відповідає значенню напруги U , проте показ амперметра завищений: $I_A = I + U_V/R_V$, де R_V – внутрішній опір вольтметра.

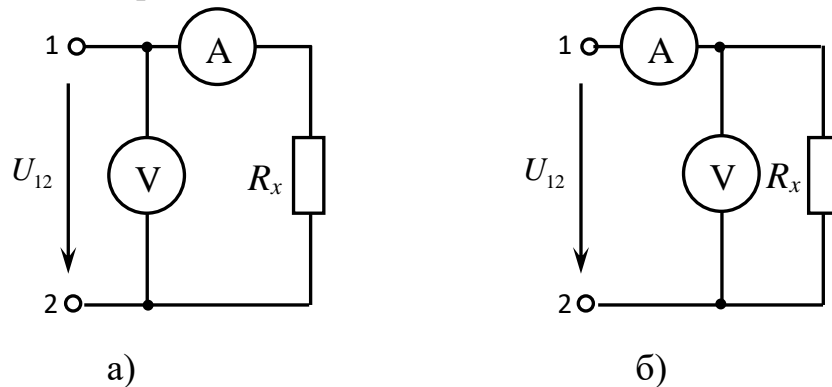


Рисунок 4.3 - Принципова схема вимірювання активного опору

Тому для отримання більш точних результатів при вимірюванні середніх і великих опорів належить застосовувати схему за рис. 4.3 а), а при вимірюванні невеликих опорів – схему за рис. 4.3 б).

До невеликих опорів можна віднести опори порядку 1Ω і менше, до середніх – опори від 1 до 10000Ω , до великих – опори 10000 до 100000Ω , до дуже великих – більше 100000Ω .

Для швидкого визначення опору елементів кола застосовують омметр, який являє собою магнітоелектричний міліамперметр PA . Послідовно з його обмоткою, яка має опір R_A , вмикається додатковий резистор з опором R_D і джерело живлення з ЕРС E і внутрішнім опором R_0 (рис. 4.4).

При незмінності ЕРС E струм у колі

$$I_x = \frac{E}{(R_A + R_D + R_0) + R_x}$$

і показання приладу залежать тільки від величини вимірюваного опору R_x . Тому шкала приладу може бути проградуїрована в омах.

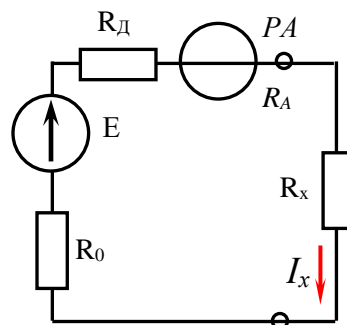


Рисунок 4.4 - Принципова схема вимірювання опору омметром

4.6.2 Вимірювання активної потужності в трифазних колах

Для вимірювання активної потужності в трифазних колах залежно від схеми з'єднання та симетричності навантаження може бути використано один,

два, три однофазних ватметрів або один трифазний прилад. Розглянемо найбільш поширені схеми.

У симетричному трифазному колі загальна потужність визначається за допомогою одного однофазного ватметра підключеного на фазні струм та напругу (рис. 4.5). Якщо нейтральна точка n «зірки» приймача недоступна, її створюють штучно трьома резисторами, з'єднаними симетричною «зіркою». Активна потужність всього кола

$$P = 3P_{\phi}.$$

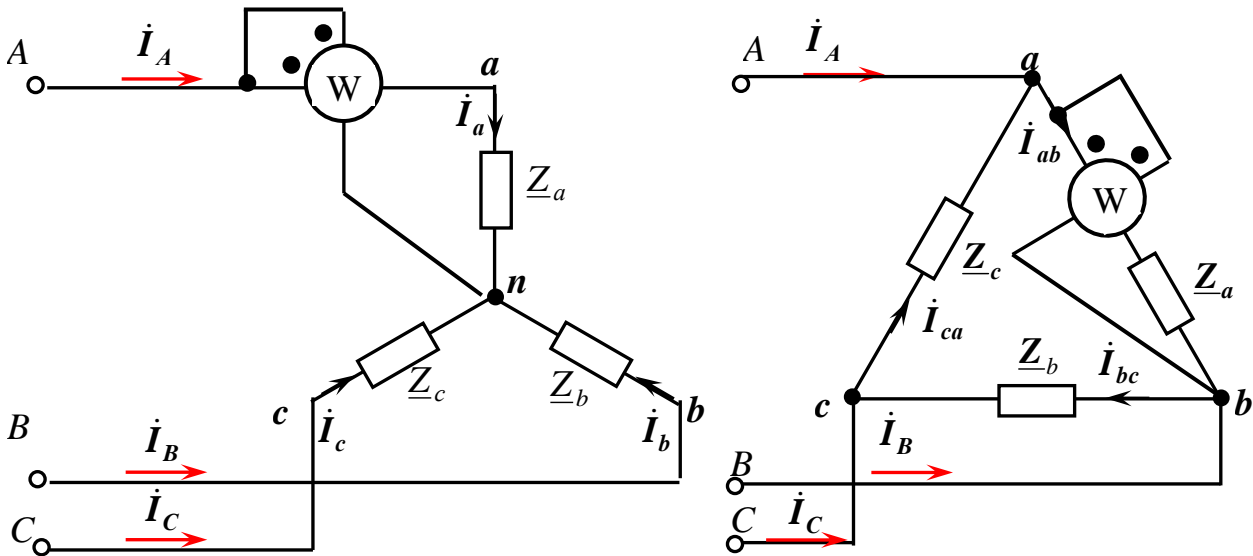


Рисунок 4.5 - Схема вимірювання активної потужності в симетричному колі

У чотириввідній системі при несиметричному навантаженні активна потужність вимірюється одним трифазним ватметром або трьома однофазними ватметрами, які вимірюють фазні активні потужності (рис. 4.6):

$$P = P_A + P_B + P_C.$$

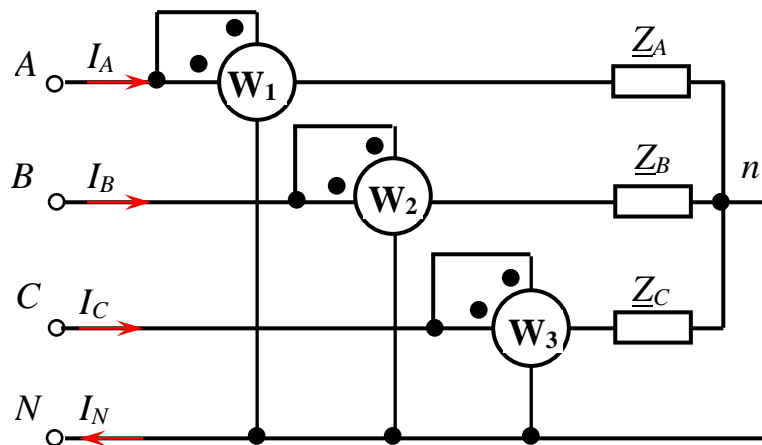


Рисунок 4.6 - Схема вимірювання активної потужності в чотириввідному несиметричному колі

У трипровідному трифазному колі, коли навантаження під'єднане «трикутником» або «зіркою» без нейтрального проводу для вимірювання активної потужності використовується універсальна схема з двома ватметрами (рис. 4.7).

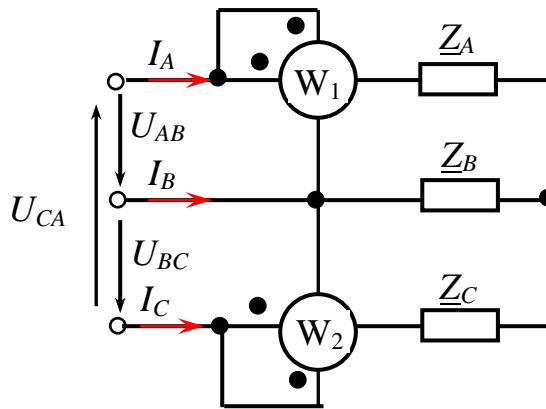


Рисунок 4.7 - Схема з двома ватметрами

Значення активної потужності в цьому випадку визначається, як

$$P = P_1 + P_2.$$

При підключенні приладів користуються наступним правилом: **попередні (струмові) обмотки ватметрів вмикають у будь - які дві лінії трифазного кола, а паралельні – на лінійні напруги початком у фазу, де розташований прилад, а кінцем – у фазу, вільну від обох приладів.**

4.6.3 Вимірювання реактивної потужності в трифазних колах

При повної симетрії електричного кола реактивну потужність можна виміряти одним ватметром, підключеним по схемі рис. 4.8 $P_1 = U_L I_L \sin\varphi$.

Значення реактивної потужності всього кола $Q = \sqrt{3}P_1$.

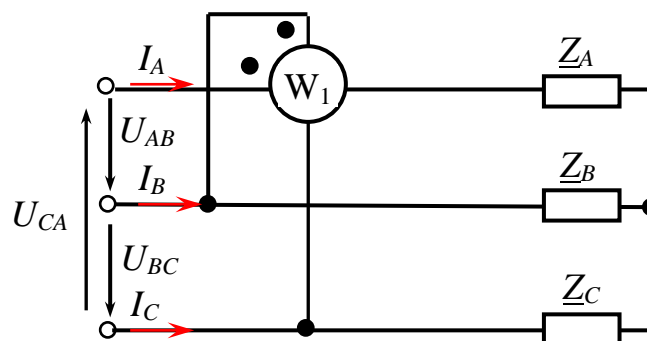


Рисунок 4.8 - Схема вимірювання реактивної потужності в симетричному колі

Схема з одним ватметром вже при дуже маленькій асиметрії дає дуже велику похибку вимірювання. Найкращі результати отримують при вимірюванні реактивної потужності за допомогою двох ватметрів (рис. 4.9).

Значення реактивної потужності всього кола

$$Q = \frac{\sqrt{3}}{2}(P_1 + P_2).$$

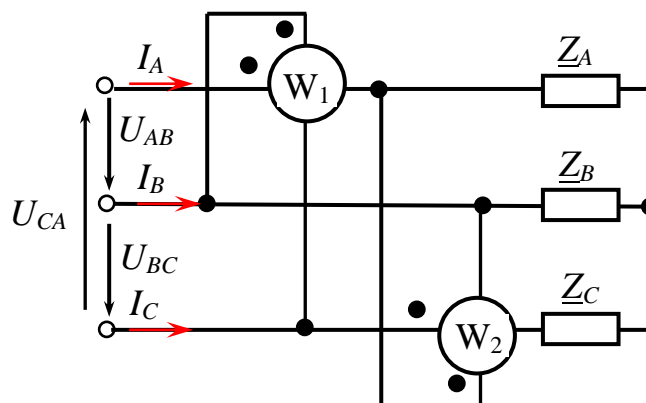


Рисунок 4.9 - Схема з двома ватметрами

При вимірюванні реактивної потужності в асиметричних колах може бути використана і схема з трьома ватметрами (рис. 4.10):

$$Q = \sqrt{3}(P_1 + P_2 + P_3).$$

Підключення обмоток кожного ватметра (двох або трьох) виконується за правилами:

- *струмову обмотку підключають в одну із фаз кола;*
- *початок обмотки напруги (+) цього ватметра підключають до наступної у порядку послідовності фази;*
- *кінцевий затискач обмотки напруги підключають до третьої фази.*

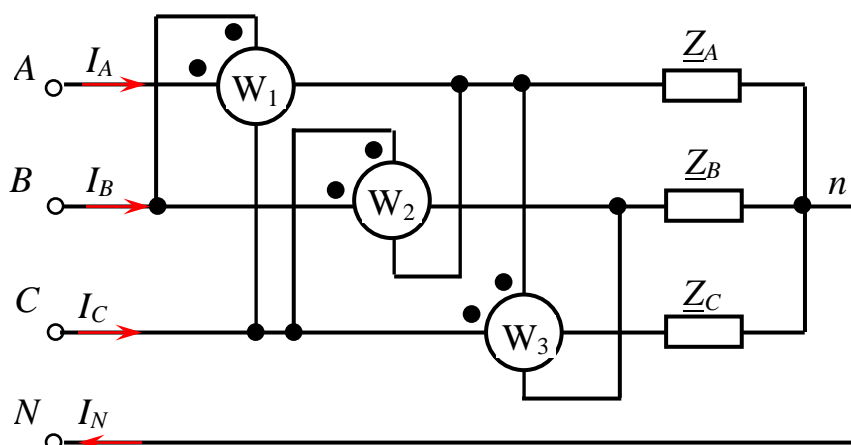


Рисунок 4.10 - Схема вимірювання реактивної потужності в чотирипровідному несиметричному колі

4.7 Методика розв'язання типових завдань

Приклад 4.7.1

Вольтметр з верхньою межею вимірювання $U_H = 10 \text{ V}$, числом поділок шкали $\alpha_{\max} = 100$ має клас точності 1,0. Під час вимірювання напруги стрілка приладу відхилилась на 75 поділок. Обчислите значення вимірюваної напруги та відносну похибку вимірювання. Згідно стандарту записати результат.

Розв'язання

Для визначення значення напруги необхідно обчислити ціну поділки вольтметра (4.6):

$$C_V = \frac{U_V}{\alpha_{\max}} = \frac{10}{100} = 0,1 \text{ V/div.}$$

Тоді значення вимірюваної напруги дорівнює

$$U = C_V \cdot \alpha = 0,1 \cdot 75 = 7,5 \text{ V.}$$

Максимальне значення абсолютної похибки вимірювання (4.5)

$$\Delta U_{\max} = \frac{\gamma \cdot U_H}{100\%} = \frac{1,0 \cdot 10}{100} = 0,1 \text{ A.}$$

Максимальна відносна похибка вимірювання (4.3)

$$\delta = \frac{\Delta U_{\max}}{U} 100\% = \frac{0,1}{7,5} 100\% = 1,3 \%$$

Результат вимірювання

$$U = (7,5 \pm 0,1) \text{ V}$$

Приклад 4.7.2

Амперметр з верхньою межею вимірювання $I_H = 5 \text{ A}$, числом поділок шкали $\alpha_{\max} = 100$ має абсолютну максимальну похибку $\Delta = \pm 0,024 \text{ A}$. Визначити клас точності приладу та відносну похибку вимірювання при відхиленні покажчика приладу на 20, 40, 60, 80, 100 поділок.

Розв'язання

Значення зведеної похибки амперметра (5.5)

$$\gamma = \frac{\Delta}{I_n} 100\% = \frac{0,024}{5} 100\% = 0,48\%$$

Згідно переліку Держстандарту України амперметр відповідає класу точності 0,5, що забезпечує співвідношення Кл. точності $\geq \gamma$.

Ціна поділки амперметра (4.6):

$$C_A = \frac{I_n}{\alpha_{\max}} = \frac{5}{100} = 0,05 \text{ A/div}$$

Відносна похибка вимірювання при заданих відхиленнях показчика приладу (4.3):

$$\delta = \frac{\Delta}{I_{20}} 100\% = \frac{\Delta}{C_A \cdot I_{20}} 100\% = \frac{\pm 0,024}{0,05 \cdot 20} 100\% = \pm 2,4\%$$

$$\delta = \frac{\Delta}{I_{40}} 100\% = \frac{\Delta}{C_A \cdot I_{40}} 100\% = \frac{\pm 0,024}{0,05 \cdot 40} 100\% = \pm 1,2\%$$

$$\delta = \frac{\Delta}{I_{60}} 100\% = \frac{\Delta}{C_A \cdot I_{60}} 100\% = \frac{\pm 0,024}{0,05 \cdot 60} 100\% = \pm 0,8\%$$

$$\delta = \frac{\Delta}{I_{80}} 100\% = \frac{\Delta}{C_A \cdot I_{80}} 100\% = \frac{\pm 0,024}{0,05 \cdot 80} 100\% = \pm 0,6\%$$

$$\delta = \frac{\Delta}{I_{100}} 100\% = \frac{\Delta}{C_A \cdot I_{100}} 100\% = \frac{\pm 0,024}{0,05 \cdot 100} 100\% = \pm 0,48\%$$

З отриманих результатів бачимо, що зі збільшенням значення вимірної величини відносна похибка зменшується і наприкінці шкали стає рівною зведеної.

Приклад 4.7.3

Лічильник електричної енергії має клас точності $\textcircled{1,0}$. Обчислити похибку, яку він може допустити протягом відліку 100 кВт·h.

Розв'язання

З умов завдання зрозуміло, що клас точності заданий в вигляді відносної похибки, тому (4.3)

$$\Delta = \frac{\delta \cdot P}{100\%} = \frac{1,0 \cdot 100}{100\%} = \pm 1 \text{ kW} \cdot \text{h}$$

Приклад 4.7.4

Цифровий амперметр класу точності $c/d = 0,02 / 0,01$ вимірює струм $I_A = 6$ А на межі $I_{NA} = 10$ А. Обчислити абсолютну похибку вимірювання.

Розв'язання

Знаходимо межі допустимої відносної похибки (см. табл. 4.1)

$$\delta_A = \left[c + d \left(\frac{X_{\max}}{X} - 1 \right) \right] \% = \left[0,02 + 0,01 \left(\frac{10}{6} - 1 \right) \right] \% = 0,027 \%$$

Абсолютна похибка вимірювання

$$\Delta_A = \frac{\delta_A \cdot I_A}{100\%} = \frac{0,027 \cdot 6}{100\%} = \pm 0,0016 \text{ А}$$

Приклад 4.7.5

Ватметр має границі вимірювання за струмом $I_{NW} = 5; 10$ А, за напругою $U_{NW} = 75; 150; 300$ V, кількість поділок шкали $\alpha_{W\max} = 100$. Він під'єднаний до електричного кола за схемою рис. 4.1. визначити раціональні границі вимірювання ватметра і значення активної потужності приймача $Z_H = R$, якщо показчик відхилився на $\alpha_W = 50$ поділок. Діапазони вимірювання амперметра – $I_{NA} = 7,5$ А, вольтметра - $U_{NV} = 300$ V. Їхні шкали містять $\alpha_{A\max} = 75$ та $\alpha_{V\max} = 150$ поділок, а стрілки відхилилися на $\alpha_A = 50$ поділок та $\alpha_V = 30$ поділок.

Розв'язання

Знайдемо ціну поділки вольтметра і значення напруги на затискачах навантаження:

$$C_V = \frac{U_{NV}}{\alpha_{V\max}} = \frac{300}{150} = 2 \text{ V/div}$$

$$U_V = C_V \cdot \alpha_V = 2 \cdot 30 = 60 \text{ V.}$$

Для ватметра обираємо найменшу границю $U_{NW} = 75$ V.

Ціна поділки амперметра і значення струму у колі:

$$C_A = \frac{I_{NA}}{\alpha_{A\max}} = \frac{7,5}{75} = 0,1 \text{ A/div}$$

$$I_A = C_A \cdot \alpha_A = 0,1 \cdot 50 = 5 \text{ A.}$$

Для ватметра обираємо струмову границю $I_{NW} = 5$ А.

Знаходимо ціну поділки ватметра для встановлених границь (4.7):

$$C_W = \frac{U_{NW} \cdot I_{NA}}{\alpha_{W\max}} = \frac{75 \cdot 5}{100} = 3,75 \text{ W/div.}$$

Тоді значення потужності приймача за показами приладу

$$P_W = C_W \cdot \alpha_W = 3,75 \cdot 50 = 187,5 \text{ W.}$$

Приклад 4.7.6

До мережі змінного струму через трансформатор напруги з коефіцієнтом трансформації $k_U = 1000/100$ і трансформатор струму з коефіцієнтом трансформації $k_I = 100/5$ під'єднані відповідно вольтметр і амперметр. Знайти значення напруги та струму, що вимірюються приладами, якщо показчик вольтметра відхилився на 30 поділок, а амперметра – на 70. Шкали обох приладів проградуйовані на 75 поділок, та $U_{NV} = 75 \text{ V}$ і $I_{NA} = 7,5 \text{ A}$.

Розв'язання

Знайдемо ціну поділки вольтметра і амперметра:

$$C_V = \frac{U_{NV}}{\alpha_{V \max}} = \frac{75}{75} = 1 \text{ V/div}$$

$$C_A = \frac{I_{NA}}{\alpha_{A \max}} = \frac{7,5}{75} = 0,1 \text{ A/div.}$$

З урахуванням коефіцієнтів трансформації вимірювальних трансформаторів $k_U = 1000 / 100 = 10$; $k_I = 100 / 5 = 20$, значення напруги та струму в мережі (4.10 - 4.11)

$$U_V = C_V \cdot \alpha_V \cdot k_U = 1 \cdot 30 \cdot 10 = 300 \text{ V}$$

$$I_A = C_A \cdot \alpha_A \cdot k_I = 0,1 \cdot 70 \cdot 20 = 140 \text{ A.}$$

Приклад 4.7.7

Міліамперметр має границю вимірювання $I_{NA} = 50 \text{ mA}$, внутрішній опір його вимірювального механізму $R_A = 0,5 \text{ }\Omega$. Визначити опір шунта для поширення границі вимірювання до $I = 1 \text{ A}$.

Розв'язання

Схема вимірювання струму I вимірювальним механізмом з шунтом надана на рис 4.2 а). Розрахуємо опір шунта (4.8)

$$R_w = \frac{R_A}{\frac{I}{I_{NA}} - 1} = \frac{0,5}{\frac{1}{0,05} - 1} = 0,026 \text{ }\Omega$$

Приклад 4.7.8

Вольтметр має границю вимірювання $U_0 = 75 \text{ V}$, внутрішній опір його вимірювального механізму $R_0 = 20 \text{ k}\Omega$. Визначити опір додаткового резистора для поширення границі вимірювання напруги електричного кола до $U = 220 \text{ V}$ та ціну поділки приладу з додатковим резистором ($\alpha_{V\max} = 150$ поділок).

Розв'язання

Схема вимірювання напруги U вимірювальним механізмом з додатковим опором надана на рис 4.2 б).

Ціна поділки створеного приладу з максимальним значенням шкали

$$U = 220 \text{ V} \text{ має бути } C_V = \frac{U}{\alpha_{V\max}} = \frac{220}{150} \approx 1,47 \text{ V/div}$$

Для зручності приймемо

$$C_V = 1,5 \text{ V/div}$$

Тоді нова границя вимірювання $U_{NV} = 1,5 \cdot 150 = 225 \text{ V}$

Розрахуємо опір додаткового резистора (4.9), але спочатку знайдемо максимально можливий струм вимірювального механізму I_0 :

$$I_0 = \frac{U_0}{R_0} = \frac{75}{20000} = 0,00375 \text{ A}$$

$$R_0 = \frac{U_{NV} - U_0}{I_0} = \frac{225 - 75}{0,00375} = 40000 \text{ }\Omega$$

Приклад 4.7.9 У разі вмикання електродвигуна в мережу з напругою $U_V = 120 \text{ V}$ він споживає струм $I_A = 15 \text{ A}$ (вольтметр класу точності 1,5 зі шкалою 0...150 V; амперметр класу точності 1,5 зі шкалою 0...20 A). Визначити повну потужність, яку споживає електродвигун.

Розв'язання

Повна потужність, яку споживає двигун

$$P_I = U_V \cdot I_A = 120 \cdot 15 = 1800 \text{ W}$$

Інструментальні відносні похибки приладів:

$$\delta_V = \frac{\gamma \cdot U_{Vн}}{U_V} = \frac{1,5 \cdot 150}{120} = 1,875 \text{ \%}$$

$$\delta_A = \frac{\gamma \cdot I_{An}}{I_A} = \frac{1,5 \cdot 20}{15} = 2,0 \%$$

Відносна похибка визначення повної потужності

$$\delta_{P_1} = \sqrt{(\delta_A)^2 + (\delta_V)^2} = \sqrt{1,875^2 + 2,0^2} = \sqrt{3,52 + 4} = 2,74 \%$$

$$\Delta_{P_1} = \frac{\delta_{P_1} \cdot P_1}{100} = \frac{2,74 \cdot 1800}{100} = 49,32 \text{ W}$$

Результат визначення повної потужності

$$P_1 = (1800 \pm 50) \text{ W}$$

Приклад 4.7.10 При вмиканні електродвигуна в мережу він споживає струм $I_A = 15 \text{ A}$ (амперметр класу точності 1,5 зі шкалою 0...20 A). Визначити потужність, що витрачається на нагрівання обмоток електродвигуна. Опір обмотки електродвигуна $R = (1,0 \pm 0,1) \Omega$.

Розв'язання

Потужність, що витрачається на нагрівання обмоток

$$P_R = I_A^2 \cdot R = 15^2 \cdot 1,0 = 225 \text{ W}$$

Знайдемо основну відносну похибку визначення опору

$$\delta_R = \frac{\Delta_R}{R} = \frac{0,1}{1,0} 100\% = 10 \%$$

Основну відносну похибку визначення струму амперметром знайдено в попередньому прикладі $\delta_A = 2,0 \%$.

Похибка визначення цієї потужності

$$\delta_{P_R} = \sqrt{(2\delta_A)^2 + (\delta_R)^2} = \sqrt{(2 \cdot 2,0)^2 + 10^2} = \sqrt{16 + 100} = 10,8 \%$$

$$\Delta_{P_R} = \frac{\delta_{P_R} \cdot P_R}{100} = \frac{10,8 \cdot 225}{100} = 24,23 \text{ W}$$

Результат визначення потужності, що витрачається на нагрівання обмоток

$$P_R = (225 \pm 24) \text{ W}$$

Приклад 4.7.11 Визначить корисну потужність двигуна, якщо споживана їм з мережі потужність $P_1 = (1800 \pm 50) \text{ W}$, а значення потужності, що витрачається на нагрівання обмоток електродвигуна $P_R = (225 \pm 24) \text{ W}$.

Розв'язання

Корисна потужність

$$P_2 = P_1 - P_R = 1800 - 225 = 1575 \text{ W}$$

Похибка визначення корисної потужності

$$\Delta_{P_2} = \sqrt{(\Delta_{P_1})^2 + (\Delta_{P_R})^2} = \sqrt{50^2 + 24^2} = 55,5 \text{ W}$$

Результат вимірювання корисної потужності

$$P_2 = (1575 \pm 56) \text{ W}$$

Приклад 4.7.12 Обчисліть ККД електродвигуна, якщо споживана їм з мережі потужність $P_1 = (1800 \pm 50) \text{ W}$, а значення корисної потужності $P_2 = (1575 \pm 56) \text{ W}$.

Розв'язання

ККД електродвигуна

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} 100\% = \frac{1575}{1800} 100\% = 87,5 \%$$

Похибка визначення ККД

$$\delta_{P_2} = \frac{\Delta_{P_2}}{P_2} = \frac{56}{1575} 100\% = 3,6 \%$$

$$\delta_{P_1} = \frac{\Delta_{P_1}}{P_1} = \frac{50}{1800} 100\% = 2,8 \%$$

$$\delta_\eta = \sqrt{\delta_{P_2}^2 + \delta_{P_1}^2} = \sqrt{3,6^2 + 2,8^2} = 4,6 \%$$

$$\Delta_\eta = \frac{\delta_\eta \cdot \eta}{100} = \frac{4,6 \cdot 87,5}{100} = 4,02 \%$$

Тоді результат вимірювання ККД

$$\eta = (88 \pm 4) \%$$

4.8 Завдання для самостійної роботи

Завдання 4.8.1 Амперметр з верхньою межею вимірювання $I_n = 1,0$ А, числом поділок шкали $\alpha_{\max} = 50$ має клас точності 1,0. Під час вимірювання напруги стрілка приладу відхилилась на 45 поділок. Обчислите значення виміряного струму та відносну похибку вимірювання. Згідно стандарту записати результат.

Відповідь: $I = (0.90 \pm 0.01)$ А; $\delta = 1,1$ %

Завдання 4.8.2 Вольтметр з верхньою межею вимірювання $U_n = 5$ V, числом поділок шкали $\alpha_{\max} = 50$ має абсолютну максимальну похибку $\Delta = \pm 0,02$ V. Визначити клас точності приладу та відносну похибку вимірювання при відхиленні покажчика приладу на 10, 20, 30, 40, 50 поділок.

Відповідь: клас точності - 0,5
 $\delta_{10} = 2$ %; $\delta_{20} = 1$ %; $\delta_{30} = 0,67$ %;
 $\delta_{40} = 0,5$ %; $\delta_{50} = 0,4$ %

Завдання 4.8.3 Під час перевірки вольтметра класу точності 1,0 із кінцевим значенням шкали $U_n = 50$ V у точках шкали 10, 20, 30, 40, 50 добуто відповідно такі покази зразкового приладу: 10,6; 20,4; 29,7; 39,8; 50,2. З'ясувати, чи зберігся клас точності вольтметра.

Відповідь: $\Delta_x = 0,5$ V; $|\Delta_1| > |\Delta_x|$

Завдання 4.8.4 Вольтметром класу точності 1,5 з верхньою межею вимірювання $U_n = 100$ V виміряно напругу 70 V. Обчислити абсолютну та відносну похибки вимірювання.

Відповідь: $\Delta_U = \pm 1,5$ V; $\delta_U = 2,1$ %

Завдання 4.8.5 Прилад має шкалу 0...150 V; його клас точності 1,5. За одноразового прямого вимірювання показ приладу становить $U = 100$ V. Записати результат прямого вимірювання.

Відповідь: $U = (100,0 \pm 2,2)$ V

Завдання 4.8.6 Прилад має шкалу 0...150 V; його клас точності $\textcircled{1,5}$. За одноразового прямого вимірювання показ приладу становить $U = 100$ V. Записати результат прямого вимірювання.

Відповідь: $U = (100,0 \pm 1,5)$ V

Завдання 4.8.7 Вольтметр розрахований на вимірювання напруг до $U_{VH} = 0,5 \text{ V}$. Власний опір приладу $R_V = 100 \ \Omega$. Кількість поділок шкали $\alpha_{Vmax} = 100$. Якою буде ціна поділки приладу, якщо використовувати його як амперметр?

Відповідь: $C_A = 0,05 \text{ mA/div}$

Завдання 4.8.8 Амперметр з верхньою межею вимірювання $I_H = 5 \text{ A}$ і шкалою на $\alpha_{Amax} = 100$ поділок під'єднаний до вторинної обмотки трансформатора струму з коефіцієнтом трансформації $k_I = 50/5$. Визначити ціну поділки приладу та значення виміряного струму, якщо покажчик відхилився на 50 поділок?

Відповідь: $C_A = 0,05 \text{ A/div}; I = 25 \text{ A}$

Завдання 4.8.9 Вольтметр з верхньою межею вимірювання $U_{VH} = 75 \text{ V}$ і шкалою на $\alpha_{Vmax} = 150$ поділок під'єднаний до вторинної обмотки трансформатора напруги з коефіцієнтом трансформації $k_U = 6000/100$. Визначити ціну поділки приладу та значення виміряної напруги, якщо покажчик відхилився на 60 поділок?

Відповідь: $C_V = 0,5 \text{ V/div}; U = 1800 \text{ V}$

Завдання 4.8.10 Обчислити активну потужність споживача, якщо покажчик приладу відхилився на 120 поділок. Межі вимірювання: $U_H = 150 \text{ V}$, $I_H = 5 \text{ A}$, кількість поділок шкали $\alpha_{max} = 300$.

Відповідь: $P_W = 300 \text{ W}$

Завдання 4.8.11 Цифровий вольтметр класу точності $c/d = 0,2 / 0,1$ вимірює напругу $U_V = 50 \text{ V}$ на межі $U_{NV} = 75 \text{ V}$. Обчислити абсолютну похибку вимірювання.

Відповідь: $\Delta_U = \pm 0,12 \text{ V}$

Завдання 4.8.12 Міліамперметр має границю вимірювання $I_{NA} = 100 \text{ mA}$, внутрішній опір його вимірювального механізму $R_A = 1,5 \ \Omega$. Визначити опір шунта для поширення границі вимірювання до $I = 5 \text{ A}$.

Відповідь: $R_0 = 0,031 \ \Omega$

Завдання 4.8.13 Вольтметр має границю вимірювання $U_0 = 50 \text{ V}$, внутрішній опір його вимірювального механізму $R_0 = 20 \text{ k}\Omega$. Визначити опір додаткового резистора для поширення границі вимірювання напруги електричного кола до $U = 220 \text{ V}$ та ціну поділки приладу з додатковим резистором ($\alpha_{Vmax} = 100$ поділок).

Відповідь: $U_{NV} = 250 \text{ V}; C_V = 2,5 \text{ V/div}; R_0 = 80 \text{ k}\Omega$

4.9 Контрольні завдання

Завдання 4.9.1 У разі вмикання електродвигуна в мережу з напругою U_V він споживає струм I_A (вольтметр класу точності 1,5; амперметр класу точності 1,5). Визначити повну потужність, яку споживає електродвигун. Опір обмотки електродвигуна $R = (R \pm \Delta_R) \Omega$.

Визначити активну потужність, яку споживає електродвигун, потужність, що витрачається на нагрівання його обмоток, та ККД. Вихідні дані для розрахунку наведено у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Вихідні дані

№ варіанта	U_V, V	I_A, A	R, Ω	№ варіанта	U_V, V	I_A, A	R, Ω
1	120	16	1.5	11	120	25	1.1
2	115	12	1.3	12	118	16	1.4
3	125	15	1.1	13	112	20	1.0
4	110	20	1.4	14	120	18	1.5
5	120	18	1.2	15	122	16	1.1
6	124	16	1.5	16	115	12	1.2
7	115	15	1.0	17	125	25	1.4
8	120	15	1.0	18	120	16	1.5
9	110	12	1.3	19	115	12	1.4
10	122	21	1.1	20	125	16	1.0

Примітка: $I_{Ah} = 30 A$; $U_{Vh} = 150 V$; $\Delta_R = 0,1 \Omega$

РОЗДІЛ 5. ТРАНСФОРМАТОРИ ТА ЕЛЕКТРИЧНИ МАШИНИ

5.1 Трансформатори

Трансформатором (Тр) називається статичний електромагнітний пристрій, призначений для перетворення за допомогою магнітного поля електричної енергії змінного струму однієї напруги в електричну енергію змінного струму іншої напруги за умови збереження частоти.

Відомо, що одну і ту ж електричну енергію вигідніше передавати при підвищеній напрузі і зменшеному струмі, так як при цьому знижуються втрати потужності на нагрівання проводів, пропорційні квадрату струму, а отже, є можливість застосовувати дроти менших перетинів, або виготовляти їх на більш дешевих, ніж мідь матеріалів.

Залежно від різноманітності ознак класифікації трансформаторів вони можуть поділятися на такі типи і конструктивні виконання:

- **за призначенням** - силові (для живлення силового та освітлювального навантажень), спеціальні (для електропечей, зварювальних апаратів та ін.), вимірювальні (для підключення вимірювальних приладів), захисні (для захисту електромереж);

- **за кількістю фаз** - однофазні, трифазні, багатофазні;
- **за кількістю обмоток** - двохобмоткові й багатообмоткові;
- **по перетворенню напруги** - підвищувальні і знижувальні;
- **за конструкції магнітопроводу** - стрижневі й броньові;
- **за способом охолодження** - сухі, масляні, водневі і т. п.

Розглядаючи фізичні процеси, що виникають в трансформаторі, необхідно звернути особливу увагу на те положення, що при зміні навантаження трансформатора в широкому діапазоні (від неробочого ходу до номінального режиму) магнітний потік може вважатися практично постійним і рівним магнітному потоку в режимі неробочого ходу. Це у свою чергу визначає постійність втрат в сталі, які легко визначаються з режиму неробочого ходу.

Найпростіший **однофазний стержньовий двохобмотковий трансформатор**, принципова схема котрого наведена на рис. 5.1, складається з замкнутого магнітопроводу і двох обмоток.

Магнітопровід збирають (шихтують) з окремих пластин електротехнічної сталі товщиною 0,35 або 0,5 mm, ізольованих один від одного, для зменшення втрат від вихрових струмів, лаком або оксидним покриттям.

Обмотка Тр, що приймає електричну енергію з мережі, називається **первинною**, а обмотка, що відає енергію приймачу називається **вторинною**. Вводи обмотки вищої напруги (ВН) прийнято означати більшими латинськими літерами **A, X**, а вводи обмотки нижчої напруги (НН) малими літерами **a, x**.

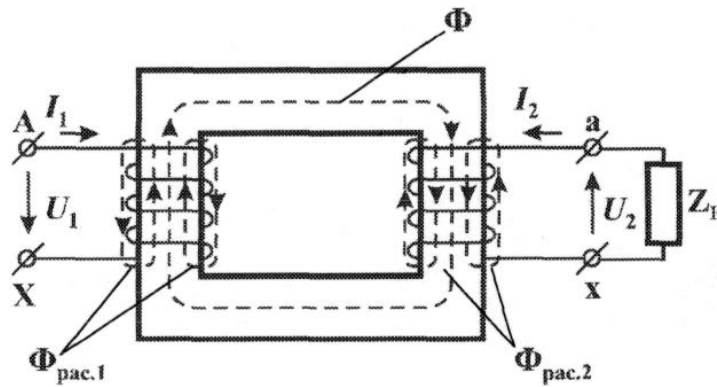


Рисунок 5.1 - Принципова схема однофазного трансформатора

Якщо до первинної обмотки з числом витків w_1 підвести змінну напругу U_1 , при розімкненій вторинній обмотці, то по ній буде протікати струм I_{10} , який створить магніторушійну силу (МРС) первинної обмотки і магнітний потік Φ та $\Phi_{рас.1}$. **Потік Φ** зчеплений із витками обох обмоток трансформатора називають **основним**, а **потік $\Phi_{рас.1}$** зчеплений тільки з витками первинної обмотки називають **потокком розсіяння первинної обмотки**.

Основний змінний магнітний потік Φ , зчіплюючись із витками первинної і вторинної обмоток, наводить у них **електрорушійну силу (ЕРС)**

$$E_1 = 4,44 f_1 w_1 \Phi_m - \text{первинної, та}$$

$$E_2 = 4,44 f_1 w_2 \Phi_m - \text{вторинної обмоток,}$$

де E_1 і E_2 - діюче значення ЕРС первинної та вторинної обмоток, V; f_1 - частота струму мережі, Hz; w_1 і w_2 число витків первинної та вторинної обмоток Tr; Φ_m - максимальне значення основного магнітного потіку, Wb.

Відношення діючих значень ЕРС первинної та вторинної обмоток називають **коефіцієнтом трансформації k трансформатора**

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} \approx \frac{U_1}{U_{20}}$$

де $U_{20} \approx E_2$, при розімкненій вторинній обмотці трансформатора.

При роботі **трансформатора під навантаженням** його вторинна обмотка замкнена на зовнішній опір Z_n та по колу проходить струм I_2 який створює потік $\Phi_{рас.2}$, зчеплений тільки з витками вторинної обмотки, і його називають **потокком розсіяння вторинної обмотки трансформатора**. Крім того, ЕРС вторинної обмотки E_2 створює напругу U_2 на зовнішньому опорі Z_n .

Для аналізу властивостей трансформаторів використовують **систему рівнянь його електричної рівноваги**, яка має такий вигляд:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 \bar{Z}_1$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 \bar{Z}_2$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{10} - \dot{I}_2 \frac{w_2}{w_1},$$

де \dot{E}_1 і \dot{E}_2 - діюче комплексне значення ЕРС первинної та вторинної обмоток Тр;

\dot{U}_1 і \dot{U}_2 - діюче комплексне значення напруги первинної та вторинної обмоток Тр;

\bar{Z}_1 і \bar{Z}_2 - повне значення опірив первинної та вторинної обмоток Тр у комплексному вигляді;

\dot{I}_1 , \dot{I}_{10} , \dot{I}_2 - комплексні значення струмів первинної обмотки, неробочого ходу та вторинної обмотки Тр.

При цьому будь-яка зміна вторинного навантаження трансформатора супроводжується зміною первинного струму I_1 за рахунок зміни його складової струму вторинної обмотки таким чином, щоб магнітний потік Φ залишився незмінним. У цьому існує принцип саморегулювання магнітного потоку Φ .

Активна потужність P_1 , що поступає із мережі в первинну обмотку трансформатора, частково витрачається на **електричні та магнітні втрати в ньому**. Електричні втрати пропорційні квадрату струму і визначаються сумою електричних втрат у його первинній та вторинній обмотках $P_{\text{ел}}$. Магнітні втрати відбуваються у магнітній системі трансформатора внаслідок перемагнічування його змінним магнітним полем і складаються з втрат на гістерезис та втрат на вихрові струми $P_{\text{маг}}$. Для зменшення втрат на гістерезис магнітну систему трансформатора виконують із магнітном'якої сталі з вузькою петлею гістерезису. При незмінній первинній напрузі магнітні втрати постійні і не залежать від навантаження трансформатора.

Коефіцієнт корисної дії (ККД) трансформатора визначають як відношення активної потужності на виході вторинної обмотки P_2 (корисна потужність) до активної потужності на вході первинної обмотки P_1 (споживана потужність)

$$\eta' = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 \%$$

ККД трансформаторів досягає значень (92-99)%, а ККД трансформаторів малої потужності – (60-80)%.

Залежність ККД трансформатора від навантаження наведена на рис. 5.2. Де коефіцієнт навантаження трансформатора дорівнює:

$$\beta = \frac{U_2}{U_{2H}} = \frac{P_2}{P_{2H}}.$$

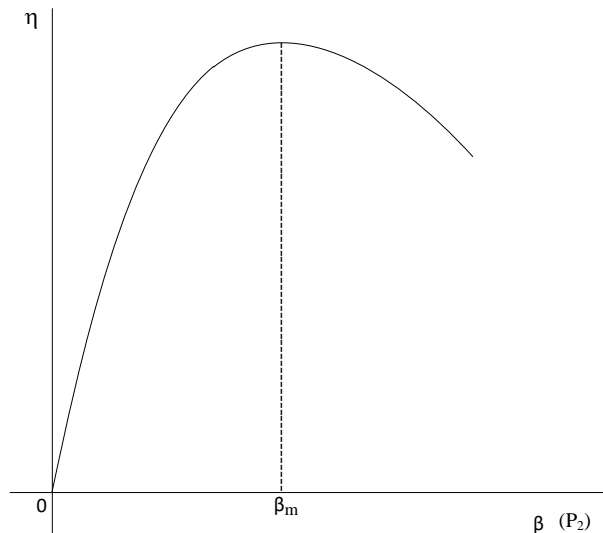


Рисунок 5.2 - Залежність ККД від навантаження

Одним з засобів, полегшуючим дослідження електромагнітних процесів і розрахунок трансформаторів, є застосування **електричної схеми заміщення приведенного трансформатора**, яка задовольняє всі рівняння ЕРС та струмів і являє собою сукупність трьох гілок рис.5.3 :

- первинної з повним опором $\bar{Z}_1 = r_1 + jx_1$ і струмом \dot{I}_1 ;
- намагнічуючої з повним опором $\bar{Z}_m = r_m + jx_m$ і струмом \dot{I}_{10} ;
- вторинної із повним приведеним опорам вторинної гілки $\bar{Z}'_2 = r'_2 + jx'_2$ та приведеним опором навантаження $Z'_H = r'_H \pm jx'_H$ і приведеним струмом I'_2

У таких трансформаторів всі параметри вторинної обмотки приводяться до числа витків первинної обмотки w_1 . При цьому всі фізичні процеси у приведеному трансформаторі повинні залишатися такими ж, як у реальному.

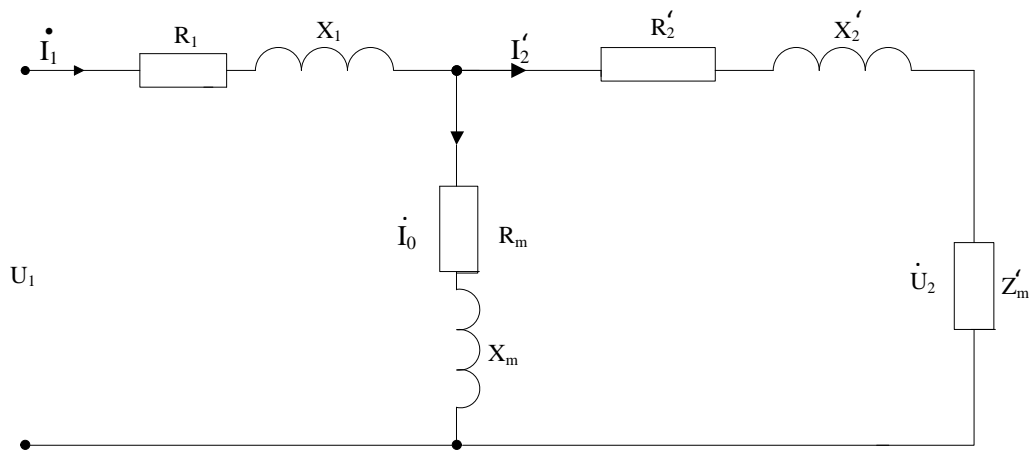


Рисунок 5.3 - Електрична схема заміщення приведенного трансформатора

Параметри схеми заміщення, за винятком $Z'_H = r'_H \pm jx'_H$, є постійними для даного трансформатора і можуть бути визначені з дослідів неробочого ходу та короткого замикання.

Для проведення дослідів неробочого ходу (НХ) збирається схема рис.5.4.

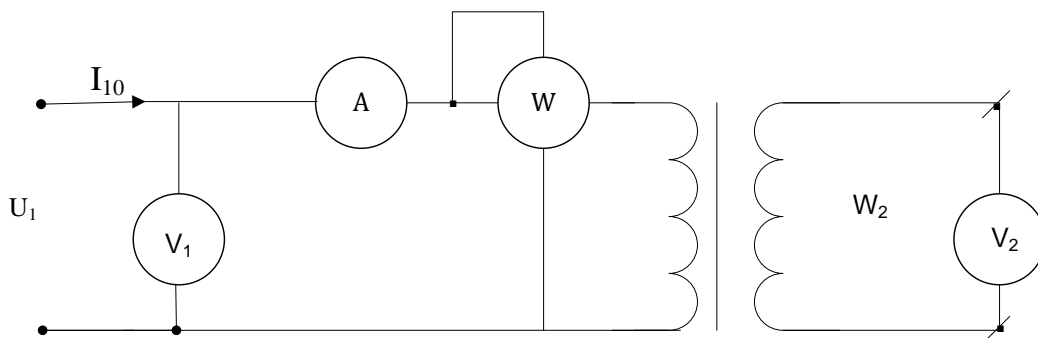


Рисунок 5.4 - Схема дослідів неробочого ходу

Напруга, що підводиться до первинної обмотки в досліді (НХ) дорівнює $U_{10} = U_{1H}$. За даними вимірів неробочого ходу розраховують такі величини:

- коефіцієнт трансформації
- $k = \frac{U_{10}}{U_{20}}$;
- відсоткове значення струму НХ $i_0 = \frac{I_{10}}{I_{1H}} \cdot 100\%$;
- втрати НХ, які дорівнюють магнітним втратам трансформатора $P_0 = P_{mag}$;

- параметри гілки намагнічування схеми заміщення T_r , які дорівнюють

$$\text{параметрам дослід НХ: } z_m = z_0 = \frac{U_{10}}{I_{10}},$$

$$r_m = r_0 = \frac{P_0}{I_{10}^2},$$

$$x_m = x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2}.$$

Крім того дослід НХ трансформатора дозволяє зробити висновок про його ступень насичення та про якість збирання магнітної системи.

Дослід короткого замикання (КЗ) проводиться при замкненні накоротко вторинної обмотки трансформатора або через амперметр рис.5.5. При цьому вторинна напруга $U_2 = 0$. На первинну обмотку подають знижену напругу, яка дорівнює значення U_K , при якому по обмотках протікають струми короткого замикання рівні номінальним струмам T_r .

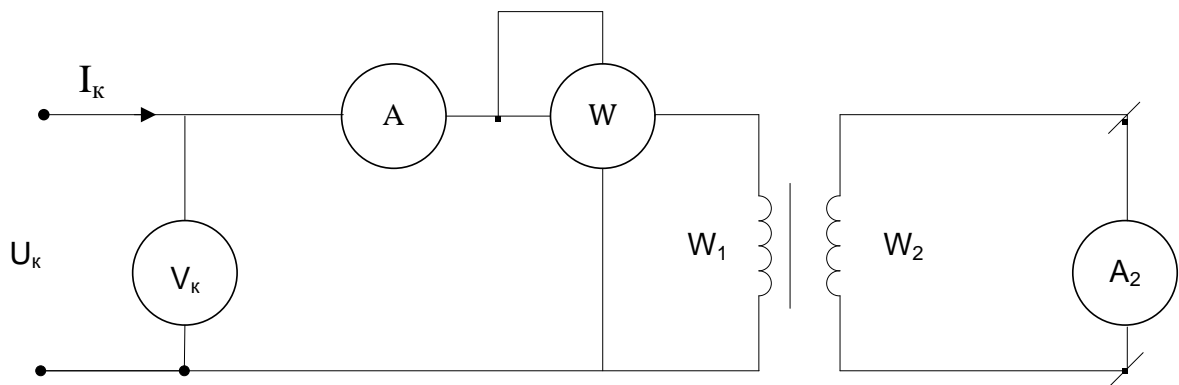


Рисунок 5.5 - Електрична схема дослід КЗ.

При розгляді дослідного режиму короткого замикання виходить, що магнітний потік в осередді трансформатора настільки малий, що їм можна нехтувати, а отже, при цьому режимі втрати в сталі трансформатора практично дорівнюють нулю, втрати в міді (електричні втрати в обмотках трансформатора) дорівнюють електричним втратам при номінальному навантаженні трансформатора.

За даними вимірів дослід короткого замикання трансформатора розраховують такі величини:

- відсоткове значення номінальної напруги КЗ $u_k = \frac{U_K}{U_{1H}} \cdot 100\%$;
- втрати досліду КЗ, які дорівнюють електричним втратам трансформатора $P_K = P_{\text{ЕЛ}}$;
- параметри досліду КЗ:

$$z_k = \frac{U_K}{I_{1H}}, \quad r_k = \frac{P_K}{I_{1H}^2}, \quad x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2}$$

- параметри гілок первинної та вторинної обмоток схеми заміщення Тр,

$$r_1 = r_2' = \frac{r_k}{2}, \quad x_1 = x_2' = \frac{x_k}{2}.$$

Залежність вторинної напруги U_2 трансформатора від струму навантаження I_2 називають **зовнішньою характеристикою**. Вигляд зовнішньої характеристики залежить від характеру навантаження трансформатора рис.5.6.

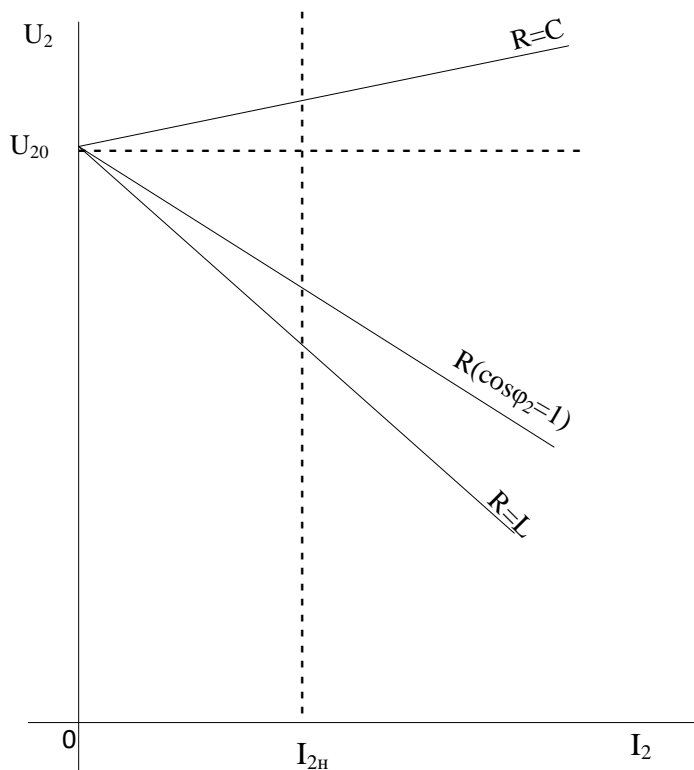


Рисунок 5.6 - Зовнішня характеристика трансформатора.

Приклад 5.1.1

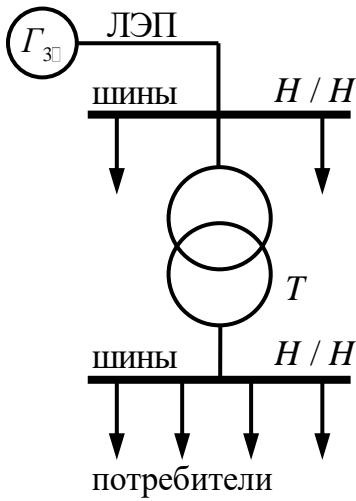


Рисунок 5.7

Для трифазного трансформатора потужністю $S_H = 180 \text{кВА}$ із з'єднанням обмоток високої і низької напруги за схемою Y/Δ у паспортних даних вказуються: номінальна первинна і вторинна напруга $U_{1H} = 10 \text{кВ}$, $U_{2H} = 0.525 \text{кВ}$, напруга короткого замикання $u_k = 5.5 \%$, потужності холостого ходу і короткого замикання $P_0 = 1.6 \text{кВт}$, $P_K = 3 \text{кВт}$, струм холостого ходу $i_0 = 4 \%$. Визначити: номінальні струми обмоток, опори обмоток і ланцюга, що намагнічує. Розрахувати і побудувати залежності вторинної напруги U_2 і коефіцієнта корисної дії від коефіцієнта навантаження β при заданому

коефіцієнті потужності навантаження $\cos \phi_2 = 0.7$. Побудувати в масштабі спрощену векторну діаграму $\beta = 0.8$ и $\cos \phi_2 = 0.7$.

Розв'язання

Номінальні лінійні струми:

$$\dot{I}_{1H} = \frac{S_H}{\sqrt{3} \cdot U_{1H}} = \frac{180 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 10^3} = 10.4 \text{ А}$$

$$\dot{I}_{2H} = \frac{S_H}{\sqrt{3} \cdot U_{2H}} = \frac{180 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 0.525 \cdot 10^3} = 198 \text{ А}$$

Номінальні фазні струми для схем з'єднання обмоток Y/Δ

$$\dot{I}_{1\phi} = \dot{I}_{1H} = 10.4 \text{ А};$$

$$\dot{I}_{2\phi} = \frac{\dot{I}_{2H}}{\sqrt{3}} = \frac{198}{\sqrt{3}} = 114 \text{ А}.$$

Опір короткого замикання згідно схеми заміщення фази трансформатора для режиму дослідного короткого замикання (у зневазі магнітним потоком в сердечнику):

$$Z_K = \frac{U_{\kappa\phi}}{I_\kappa} = \frac{317}{10.4} = 30.4\Omega,$$

$$R_K = \frac{P_{\kappa\phi}}{I_\kappa^2} = \frac{1 \cdot 10^3}{(10.4)^2} = 9.2\Omega,$$

$$X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2} = \sqrt{(30.4)^2 - (9.2)^2} = 29\Omega$$

Тут

$$U_{\kappa\phi} = \frac{u_k}{100} \cdot U_{1\phi} = \frac{5.5}{100} \cdot 5780 = 317V$$

$$U_{1\phi} = \frac{U_{1H}}{\sqrt{3}} = \frac{10 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} = 5780V$$

$$P_{\kappa\phi} = \frac{P_K}{3} = 1kW$$

$$I_\kappa = I_{1\phi} = 10.4A$$

Опір первинної обмотки:

$$R_1 = R_2' = \frac{R_K}{2} = \frac{9.2}{2} = 4.6\Omega,$$

$$X_1 = X_2' = \frac{X_K}{2} = \frac{29}{2} = 14.5\Omega.$$

Опір вторинної обмотки:

$$R_2 = \frac{R_2'}{k^2} = \frac{4.6}{11^2} = 0.038\Omega,$$

$$X_1 = \frac{X_2'}{k^2} = \frac{14.5}{11^2} = 0.12\Omega.$$

где $k = \frac{U_{1\phi}}{U_{2\phi}} = \frac{5780}{525} = 11$ - коефіцієнт трансформації, $U_{2\phi} = U_{2H}$ для з'єднання Δ .

Опори гілці, що намагнічує:

$$Z_0 = \frac{U_{1\phi}}{I_0} = \frac{5780}{0.416} = 13900\Omega,$$

$$R_0 = \frac{P_{0\phi}}{I_{0\phi}^2} = \frac{0.53 \cdot 10^3}{(0.416)^2} = 3060\Omega.$$

Тут

$$I_{o\phi} = \frac{i_0}{100} \cdot I_{1\phi} = \frac{4}{100} \cdot 10.4 = 0.416 \text{ A}$$

$$P_{0\phi} = \frac{P_0}{3} = \frac{1.6}{3} = 0.53 \text{ kW}$$

Потенційне зниження напруги на вторинній обмотці залежно від коефіцієнта навантаження β визначається так:

$$\Delta u_2 = \beta \cdot (u_a \cdot \cos \phi_2 + u_p \cdot \sin \phi_2) = 0.8 \cdot (1.67 \cdot 0.7 + 5.2 \cdot 0.71) = 3.89\%.$$

Тут u_a , u_p - активна і реактивна складова u_K

$$u_a = u_K \cdot \cos \phi_K = u_K \frac{R_K}{z_K} = 5.5 \cdot \frac{9.2}{30.4} = 1.67\%,$$

$$u_p = u_K \cdot \sin \phi_K = u_K \frac{X_K}{z_K} = 5.5 \cdot \frac{29}{30.4} = 5.2\%.$$

Тоді напруга на вторинній обмотці залежно від навантаження визначиться вираженням

$$U_2 = U_{2H} - \frac{\Delta u_2}{100} \cdot U_{2H} = 525 - \frac{3.89}{100} \cdot 525 = 503 \text{ V}.$$

Розрахунок ККД виконується по формулі

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{\beta S_H \cdot \cos \phi_2}{\beta S_H \cdot \cos \phi_2 + P_0 + \beta^2 P_K} \cdot 100\% .$$

Задаючись значеннями β от 0 до 1.2, розраховуємо по наведених вище формулах U_2 і η . Результати розрахунку приведені в табл. 5.1.

Таблиця 5.1.

№№ п/п	β	U_2, V	$\eta, \%$	№№ п/п	β	U_2, V	$\eta, \%$
1	0	525	0	6	0.6	509	96.5
2	0.05	523	77.0	7	0.73	505	96.7
3	0.1	522	86.6	8	0.8	503	96.6
4	0.2	520	93.6	9	1.0	497	96.5
5	0.4	514	96.0	10	1.2	491	96.2

Максимальне значення ККД має місце при рівності втрат холостого ходу і короткого замикання, що відповідає

$$\beta = \sqrt{\frac{P_0}{P_K}} = \sqrt{\frac{1.6}{3}} = 0.73 \quad \text{і складає } \eta_{\max} = 96.7\% .$$

!На Рис. 5.8. приведені залежності U_2 і $\eta = f(\beta)$.

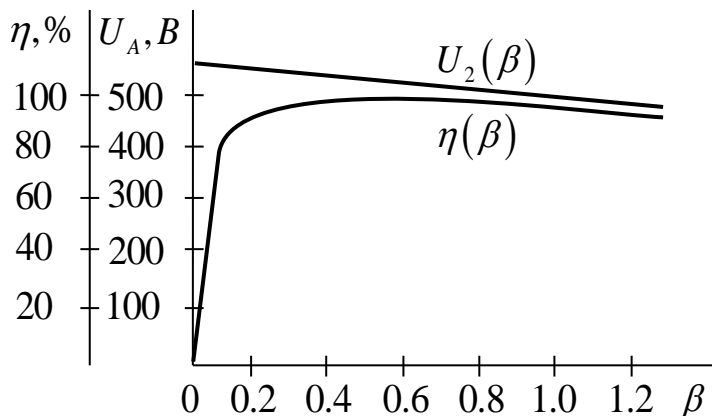


Рисунок 5.8 – Зовнішня характеристика та ККД.

Річний ККД визначає відношення енергії, відданому трансформатором навантаженню в перебігу робочого годинника $T_p = 4000h$ одного року експлуатації, до отриманої з мережі за весь рік $T = 8760h$.

$$\eta_z = \frac{w_2}{w_2 + w_0 + w_K} \cdot 100\% = \frac{50500 \cdot 100}{50500 + 14000 + 7700} = 70\%$$

де w_2 ; w_0 ; w_K - енергії, віддані відповідно навантаженню і витрачені на покриття магнітних і електричних втрат в трансформаторі:

$$w_2 = S_H \cdot \cos \phi_2 \cdot T_p = 180 \cdot 0.7 \cdot 4000 = 50500 \text{кWh} \cdot$$

$$w_0 = P_0 \cdot T = 1.6 \cdot 8760 = 14000 \text{кWh} \cdot$$

$$w_K = \beta^2 \cdot P_K \cdot T = 0.8^2 \cdot 3 \cdot 4000 = 7700 \text{кWh} \cdot$$

Спрощена векторна діаграма будується в зневазі струмом холостого ходу при $\dot{I}_1 = -\dot{I}_2$. Тоді для схеми заміщення на Рис. 5.9 рівняння електричної рівноваги набере вигляду

$$\dot{U}_1 = -\dot{U}_2' + (R_1 + R_2') \cdot \dot{I}_1 + j \cdot (X_1 + X_2') \cdot \dot{I}_1 = -\dot{U}_2' + R_K \cdot \dot{I}_1 + j \cdot X_K \cdot \dot{I}_1.$$

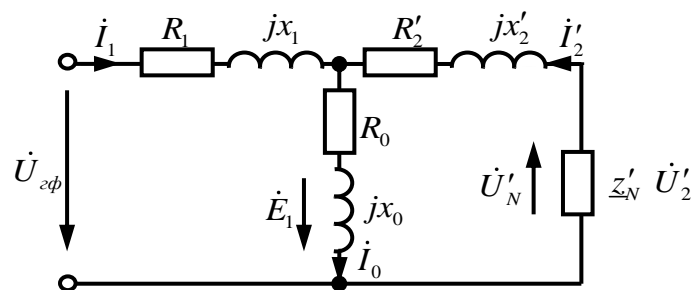


Рисунок 5.9 – Схема заміщення

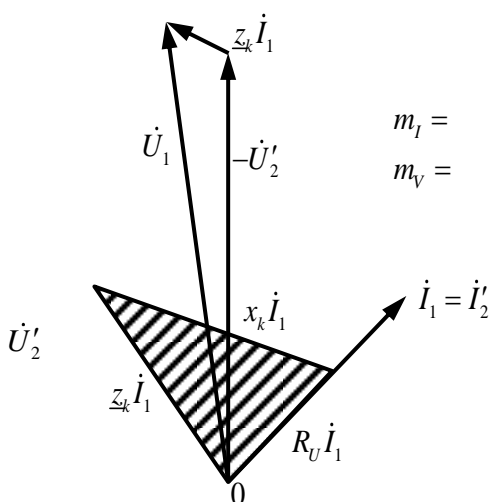


Рисунок 5.10.

Побудову векторної діаграми (Рис.5.10.) починаємо з вектора фазної напруги \dot{U}_2' відповідно до табл. 5.1.

$$\dot{U}_2' = U_2 \cdot k = 503 \cdot 11 = 5530 \text{ V}.$$

Вектор струму відстає по фазі від вектора на кут ϕ_2 і рівний при $\beta = 0.8$

$$i'_2 = \beta \frac{I_{2\phi}}{k} = 0.8 \frac{114}{11} = 8.3 \text{ A.}$$

Розраховуємо падіння напруги

$$R_k I_1 = 9.2 \cdot 8.3 = 77 \text{ V,}$$

$$X_k I_1 = 29 \cdot 8.3 = 242 \text{ V;}$$

будуємо вектор \dot{U}_1 по наведеному вище рівнянню.

Примітка. На Рис.5.10. трикутник падіння напруги в обмотках показаний в збільшеному розмірі (заштрихований). Фактично величини \dot{U}_1 і \dot{U}'_2 мало відрізняються, і ці вектори майже збігаються.

5.2 Асинхронні двигуни

Асинхронні двигуни здійснюють перетворення електричної енергії змінного струму в механічну енергію на валу. До аналізу процесів, що відбуваються при цьому перетворенні, можна личити аналогічно з трансформатором, враховуючи особливості:

1. Первинна обмотка статора створює магнітне поле, що обертається.
2. Ротор обертається в полі статора з ковзанням, яке є функцією моменту навантаження.
3. Між статором і ротором є повітряний зазор.

Векторна діаграма і схема заміщення асинхронного двигуна відповідають такому трансформатору, в якого параметри вторинної обмотки залежать від ковзання.

Розрахунок параметрів схеми заміщення і побудови векторної діаграми виробляється по методичке, викладеною в п. 5.1.

Експлуатаційні властивості двигуна характеризують механічними і робочими характеристиками.

Механічні характеристики $M(s)$ або $n(M)$ можуть бути розраховані по формулі моменту, що обертає.

$$M = \frac{m_1 \cdot p \cdot U_{1\phi}^2 \cdot R'_2 / S}{2\pi \cdot f_1 \cdot [(R_1 + R'_2 / S)^2 + (x_1 + x'_2)^2]}$$

де M - момент двигуна, що обертає;

$R_1; R'_2; x_1; x'_2$ - опори статором і приведеною до роторної обмотки статора;

m_1 - число фаз статора;

$U_{1\phi}; f_1$ - величина і частота фазної напруги обмотки статора;

S - ковзання.

Частота обертання ротора (валу) двигуна пов'язана з ковзанням залежністю

$$n = n_0 \cdot (1 - S);$$

де $n_0 = \frac{60 \cdot f}{P}$ - частота обертання магнітного поля;

Механічна характеристика $M(S)$ може бути побудована по довідкових даними каталогу по формулі Клосса

$$M = \frac{2M_{\max}}{\frac{S_{kp}}{S} + \frac{S}{S_{kp}}};$$

де $M_{\max}; S_{kp}$ - максимальний момент і відповідне йому критичне ковзання.

Якщо заданий коефіцієнт, що визначає перевантажувальну здатність електродвигуна, $\lambda = \frac{M_{\max}}{M_H}$, то з формули Клосса отримаємо

$$S_{kp} = S_H (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}),$$

де $S_H; M_H$ - номінальний момент і відповідне йому номінальне ковзання.

У асинхронному двигуні з фазним ротором включення в ланцюг ротора додаткового опору дозволяє регулювати частоту обертання валу при заданому характері зміни моменту навантаження і змінити пускові властивості. Отримані

при цьому механічні характеристики називаються *штучними*. При цьому максимальний момент і перевантажувальна здатність не змінюється. Електричні схеми включення асинхронного двигуна показані на Рис.5.11.

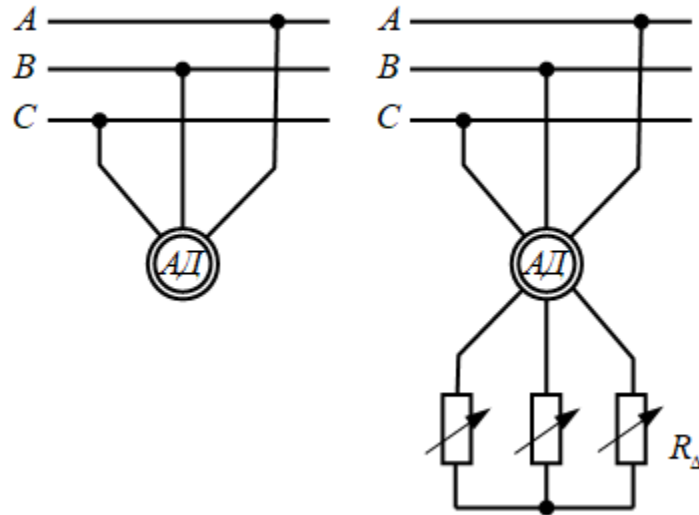


Рисунок 5. 11.

Приклад 5.2.1

Трифазний асинхронний електродвигун з короткозамкнутим ротором номінальною потужністю $P_H = 2.8 \text{ kW}$ включений в електричну мережу змінного струму з напругою $U_H = 220 \text{ V}$, частотою $f = 50 \text{ Hz}$. Його паспортні дані при номінальному навантаженні: коефіцієнт корисної дії $\eta_n = 82.5\%$; коефіцієнт потужності $\cos \phi_n = 0.78$; ковзання $S_n = 5\%$.

Визначити споживану з мережі активну потужність, номінальний і пусковий струми, номінальний, пусковий і максимальний моменти; якщо кратність пускового струму, кратність пускового моменту і перевантажувальна здатність складають відповідно $k_1 = 5$; $k_n = 1.3$; $\lambda = 1.8$, а число пар полюсів $P = 3$. Побудувати механічні характеристики $n = f_1(M)$ при $U = U_n$ и $n = f_2(M)$ при $U = 0.8 \cdot U_n$.

Визначити мінімальну напругу, при якій ще можливий запуск двигуна при номінальному навантаженні.

Розв'язання

Споживана з мережі активна потужність при номінальному навантаженні

$$P_{1H} = \frac{P_H}{\eta_H} = \frac{2.8 \cdot 10^3}{82.5} = 3.4 \text{ kW}$$

Номінальний і пусковий струми:

$$I_H = \frac{P_{1H}}{\sqrt{3} \cdot U_H \cdot \cos \phi_H} = \frac{3.4 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 0.78} = 6.6 \text{ A},$$

$$I_{II} = k_1 \cdot I_H = 5 \cdot 6.6 = 33 \text{ A}$$

Частота обертання магнітного поля:

$$n_0 = \frac{60 \cdot f}{p} = 60 \cdot \frac{50}{3} = 1000 \text{ r / min}$$

Номінальна частота обертання ротора (валу):

$$n = n_0 \cdot \left(1 - \frac{S_H}{100}\right) = 1000 \cdot \left(1 - \frac{5}{100}\right) = 950 \text{ r / min}$$

Номінальний, пусковий і максимальний моменти:

$$M_H = \frac{P_H}{\frac{\pi \cdot n_H}{30}} = \frac{2.8 \cdot 10^3 \cdot 30}{3.14 \cdot 950} = 28.2 \text{ N} \cdot \text{м}$$

$$M_{II} = k_{II} \cdot M_H = 1.3 \cdot 28.2 = 36.6 \text{ N} \cdot \text{м}$$

$$M_M = \lambda \cdot M_H = 1.8 \cdot 28.2 = 51 \text{ N} \cdot \text{м}$$

Робоча частина механічної характеристики $n = f_1(M)$ розраховуємо по формулі Клосса при зміні значень ковзання S від 0 до S_{kp} :

$$M = \frac{2M_{\max}}{\frac{S_{kp}}{S} + \frac{S}{S_{kp}}} = \frac{2 \cdot 51}{\frac{S}{0.165} + \frac{0.165}{S}},$$

$$\text{де } S_{kp} = S_n (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}) = 5 (1.8 + \sqrt{1.8^2 - 1}) = 16.5 \text{ \%}.$$

Механічна характеристика $n = f_2(M)$ при зниженій напрузі розраховується з умови, що момент двигуна, що обертає, пропорційний квадрату напруги. Тому момент при напрузі, відмінній від номінального, розраховується для кожного значення по співвідношенню

$$M' = M \cdot \left(\frac{U}{U_H} \right)^2 = M \cdot 0.64.$$

Результати розрахунку обох характеристик приведені в табл.5. 2.

Таблица 5.2

S	%	0	5	10	15	16.5	100
n	r/min	1000	950	900	850	835	0
M	Nм	0	28.2	45.4	50.8	51.0	36.6
M'	Nм	0	18.0	29.1	32.5	32.6	23.4

Розраховані механічні характеристики змальовані на Рис.5.12.

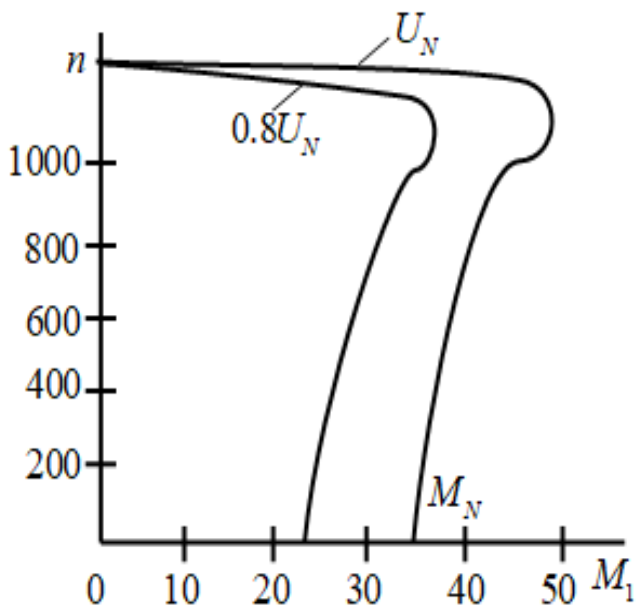


Рисунок 5.12.

Запуск двигуна при номінальному навантаженні можливий, якщо виконується умова $U > U_{\min}$,

$$U_{\min} = U_H \sqrt{\frac{M_H}{M_{II}}} = 220 \sqrt{\frac{28.2}{36.6}} = 194 \text{ V}$$

де $U = 0.8U_H = 0.8 \cdot 220 \text{ V}$.

5.3 Машини постійного струму

Електричні машини постійного струму працюють в 2-х режимах: генератора, виробляючи електричну енергію, і двигуна, механічну потужність (момент) на валу. Ця машина обратима. Електрична схема включення машини в режимі генератора (а) і двигуна (б) показана на Рис.5.13. У обмотці якоря генерується змінна в часі ЕДС, яка випрямляється колектором. Основним типом генератора є генератор паралельного збудження (з самозбудженням).

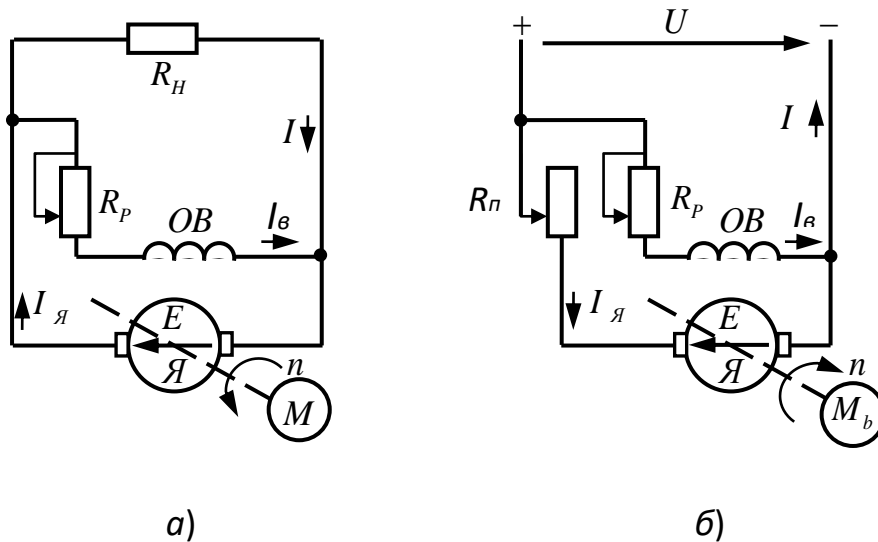


Рисунок 5.13.

Рівняння електричної рівноваги генератора:

$$U = E - R_a \cdot I_a = C_E \cdot n \cdot \Phi - R_a \cdot I_a,$$

звідси

$$I_a = \frac{C_E \cdot n \cdot \Phi}{R_a}.$$

Для схеми з паралельним збудженням

$$I_\phi = \frac{U}{R_\phi},$$

$$I_H = I_a - I_\phi.$$

Тут U ; E - напруга і ЕДС на затисках якірної обмотки;

C_E ; Φ - конструктивна постійна і магнітний потік;

$I_{я}; I_{\epsilon}; I_{H}$ - струми обмоток якоря і збудження, навантаження;

$R_{я}; R_{\epsilon}$ - опори обмоток якоря і збудження;

n - частота обертання якоря.

При вирішенні завдань не враховується дія реакції якоря і приймається, що потік Φ створюється лише струмом обмотки збудження I_{ϵ} . Взаємний зв'язок між струмом $I_{я}$ і потоком Φ задається табличний в умовах завдань.

Робота генератора описується характеристиками: холостого ходу, зовнішньою і регулювальною. Розрахунок характеристик ведеться по рівняннях, приведених вище.

Рівняння електричної рівноваги машини в режимі двигуна:

$$U = E + R_{я} \cdot I_{я} = C_E \cdot n \cdot \Phi + R_{я} \cdot I_{я}$$

Звідси частота обертання

$$n = \frac{U - R_{я} \cdot I_{я}}{C_E \cdot \Phi}$$

і струму якоря

$$I_{я} = \frac{U - C_E \cdot n \cdot \Phi}{R_{я}}$$

Для схеми з паралельним збудженням:

$$I_{\epsilon} = \frac{U}{R_{\epsilon}},$$

$$I = I_{я} + I_{\epsilon};$$

електромагнітний момент двигуна

$$M = C_M \cdot \Phi \cdot I_{я}.$$

Тут C_M - конструктивна постійна.

Безпосередній пук двигуна паралельного збудження від мережі недопустимий із-за великого струму і обмотці якоря. Для його обмеження в ланцюг якоря на час пуску включається пусковий опір R_{Π} .

Для регулювання частоти обертання при заданому моменті навантаження (або струмі якоря) в ланцюг обмотки збудження включається регулювальний реостат.

Робота двигуна описується за допомогою регулювальних, механічних і робочих характеристик, розрахованих по виразах, приведеніх вище. При аналізі дією реакції якоря нехтують. Не можна змішувати регулювання частоти як примусову зміну з природною її зміною унаслідок зміни навантаження на валу. У контрольному завданні передбачено регулювання зміною потоку Φ , тобто струму збудження.

Приклад 5.3.1

Генератор паралельного збудження має номінальні дані: $P_H = 115\text{kW}$, $U_H = 115\text{V}$. Опори обмоток якоря і збудження відповідно $R_A = 0.07\Omega$; $R_B = 20\Omega$. Механічні і магнітні втрати в сумі складають 5% від номінальної потужності.

Визначити для номінального режиму струми навантаження I_H якорі $I_{ян}$ і збудження $I_{ен}$, коефіцієнт корисної дії η_n . Розрахувати механічну потужність P_{1H} і момент M_H приводного електродвигуна, якщо частота обертання не змінюється рівна $n = 1460\text{r/min}$.

Побудувати зовнішню характеристику генератора.

Вказівка. При рішенні задачі скористатися залежністю магнітного потоку від струму збудження.

Розв'язання

При номінальному навантаженні:

- струм навантаження:

$$I_H = \frac{P_H}{U_H} = \frac{11.5 \cdot 10^3}{115} = 100 \text{ A};$$

- струм збудження:

$$I_B = \frac{U}{R_B} = \frac{115}{20} = 5.75 \text{ A};$$

- струм якоря:

$$I_{\text{яH}} = I + I_{\text{BH}} = 100 + 5.75 = 105.75 \text{ A}.$$

- ЕДС якорі:

$$E_H = U_H + R_{\text{я}} \cdot I_{\text{яH}} = 115 + 0.07 \cdot 105.75 = 122.4 \text{ V};$$

- втрати електричні в обмотках:

$$P_{\text{яH}} = R_{\text{я}} \cdot I_{\text{яH}}^2 = 0.07 \cdot (105.75)^2 = 840 \text{ W};$$

$$P_{\text{BH}} = R_B \cdot I_{\text{BH}}^2 = 20 \cdot (5.75)^2 = 660 \text{ W};$$

- втрати механічні і магнітні:

$$P_{\text{MM}} = \frac{5}{100} \cdot P_H = \frac{5}{100} \cdot 11.5 \cdot 10^3 = 575 \text{ W};$$

- потужність механічна приводного двигуна

$$P_{1H} = P_H + P_{\text{яH}} + P_{\text{BH}} + P_{\text{MM}} = 13575 \text{ W};$$

- ККД генератора:

$$\eta_n = \frac{P_n}{P_{1n}} \cdot 100 = \frac{11500}{13575} \cdot 100 = 84.7 \text{ \%};$$

- момент двигуна:

$$M_H = \frac{P_{1H}}{\frac{\pi \cdot n_H}{30}} = \frac{13575 \cdot 30}{3.14 \cdot 1460} = 89 \text{ N} \cdot \text{м}.$$

При розрахунку зовнішньої характеристики $U(I)$ використовуємо стандартну криву намагнічення $\Phi(I_B)$ (табл.5.3), еквівалентну характеристиці холостого ходу генератора $E(I_B)$.

Таблиця 5.3

I_{ϵ}	%	0	20	40	60	80	100	120	150
Φ	%	5	45	73	88	95	100	103	107

Задаючись різними значеннями I_{ϵ} від 0 до 150 %, розраховуємо для кожного значення:

- струм збудження

$$I_{\epsilon} = I_{\epsilon\%} \cdot I_{\epsilon H};$$

- ЕРС

$$E = \Phi_{\%} \cdot E_H;$$

- напруга

$$U = R_{\epsilon} \cdot I_{\epsilon};$$

- струм навантаження

$$I = \frac{E - U}{R_{я}} \cdot I_{\epsilon}.$$

Результати розрахунку приведені в табл. 5.4

Таблиця 5.4

I_{ϵ}	A	0	1.15	2.3	3.45	4.6	5.75	6.9	8.6
E	V	6	55	89	108	116	122.4	12	131
U	V	0	23	46	69	92	115	137	172.5
I	A	86	456	612	554	338	100	-	-

Зовнішня характеристика побудована на Рис.5.14

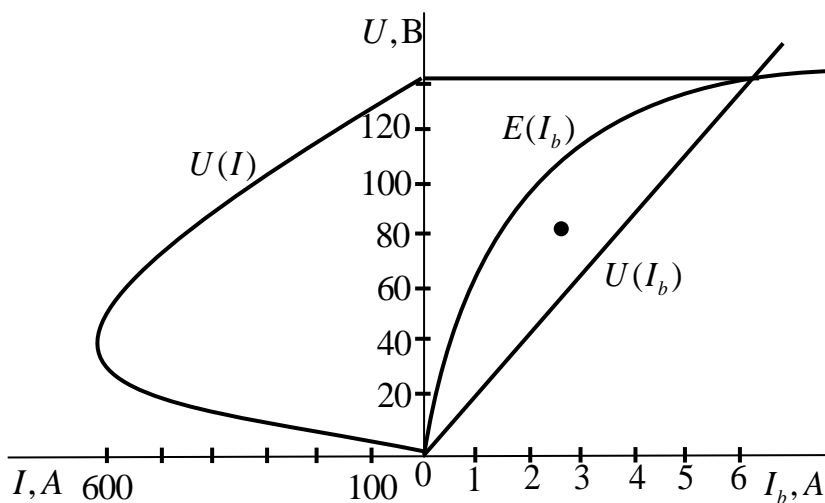


Рисунок 5.14 -Зовнішня характеристика

Приклад 5.3.2

Електродвигун постійного струму з паралельним збудженням характеризується номінальними даними: $P_H = 2.2\text{kW}$; $U_H = 110\text{V}$; $n = 1500\text{r/min}$; $\eta_H = 80\%$ і має опір обмоток якоря і збудження $R_{\text{я}} = 0.5\Omega$, $R_B = 110\Omega$.

Визначити:

- струми обмоток, споживану потужність і момент, що обертає, для номінального режиму;

- пусковий момент, опори і потужність пускового реостата для здобуття кратності пускового струму $K_I = 2.5$.

Побудувати природну $n = f_1(M)$ і штучну $n = f_2(M)$ механічні характеристики при введенні в ланцюг збудження регулювального реостата, що збільшує опори ланцюгу збудження на 20%.

Вказівка. При рішенні скористатися даною в табл. 3 залежністю магнітного потоку від струму збудження.

За 100% набути номінальних значень магнітного потоку і струму збудження.

Розв'язання

Номінальний режим. Споживана з мережі потужність:

$$P_{1H} = \frac{P_H}{\eta_H} = \frac{2.2}{0.8} = 2.75\text{kW}.$$

Споживаний з мережі струм:

$$I_H = \frac{P_{1H}}{U_H} = \frac{2.75 \cdot 10^3}{110} = 25\text{A}.$$

Струм збудження:

$$I_{BH} = \frac{U_H}{R_B} = \frac{110}{110} = 1\text{A}.$$

Струм якоря:

$$I_{\text{яH}} = I_H - I_{BH} = 25 - 1 = 24\text{A}$$

Момент, що обертає:

$$M_H = \frac{P_H}{\frac{\pi \cdot n_H}{30}} = \frac{2.2 \cdot 10^3 \cdot 30}{3.14 \cdot 1500} = 14 N \cdot m.$$

Пусковий режим. Опір і потужність пускового реостата в ланцюзі якоря:

$$R_{\Pi} = \frac{U_H}{I_{яп}} - R_{я} = \frac{110}{2.5 \cdot 24} - 0.5 = 1.33 \Omega$$

$$P_{\Pi} = R_{\Pi} \cdot I_{яп}^2 = 1.33 \cdot 60^2 = 4788 W$$

де, $I_{яп} = 2.5 \cdot 24 = 60 A$

Пусковий момент:

$$M_{\Pi} = M_H \cdot \frac{I_{яп}}{I_H} = 14 \cdot 2.5 = 35 N \cdot m$$

Природна механічна характеристика $n = f_1(M)$ є прямолінійною, тому вона будується по двох крапках:

1) при номінальному навантаженні $M_H = 14 N \cdot m$ і частоті обертання $n_H = 1500 r/ min$

2) при холостому ході $M_0 = 0$ і частоті обертання

$$n_0 = \frac{U_H}{C_E \cdot \Phi_M} = n_H \cdot \frac{U_H}{U_H - I_{яп} \cdot R_{я}} = 1500 \cdot \frac{110}{110 - 24 \cdot 0.5} = 1684 r/ min .$$

Штучна механічна характеристика розраховується при введенні в коло ротора R_p , що наводить до зміни струму збудження

$$I_{\epsilon} = \frac{U_H}{R_{\epsilon} + R_p} = \frac{110}{110 + 0.2 \cdot 110} = 0.83 A.$$

Це наводить до зміни потоку згідно табл.5.3 $\Phi = 95\%$.

Штучна механічна характеристика будується по двох крапках:

а. при холостому ході $M_0 = 0$ і частоті обертання

$$n'_0 = \frac{n_0}{\Phi/\Phi_H} = \frac{1684}{0.95} = 1773 r/ min ;$$

б. при номінальному навантаженні $M'_H = M_H = 14 \text{ Н} \cdot \text{м}$ і частоти обертання

$$n'_H = n'_0 \cdot \frac{U_H - \frac{I_{я} \cdot R_{я}}{\Phi / \Phi_H}}{U_H} = 1773 \cdot \frac{110 - \frac{24 \cdot 0.5}{0.95}}{110} = 1569 \text{ r/ min.}$$

Механічні характеристики приведені на Рис.5.15

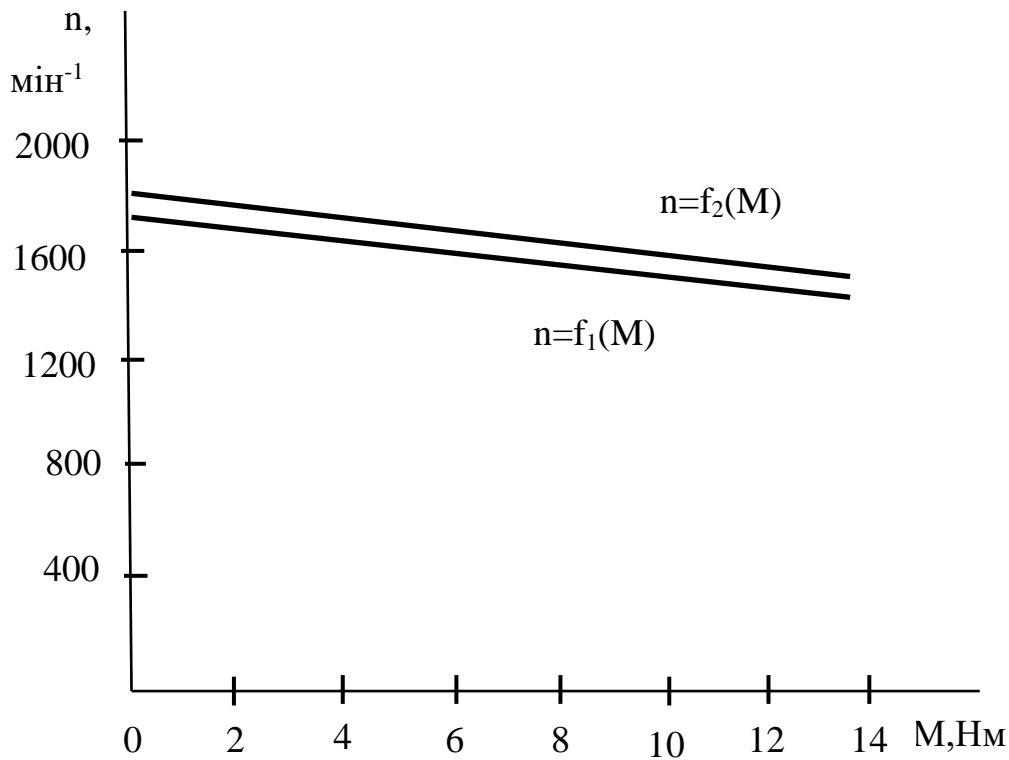


Рисунок 5.15 - Механічні характеристики

5.4 Вибір електричного двигуна для приводу виробничого механізму

З багаточисельних типів електродвигунів змінного і постійного струму для приводу тієї або іншої виробничої машини має бути вибраний той, який якнайповніше задовольняв би техніко-економічним вимогам. Це означає, що двигун має бути найбільш простим по управлінню, надійним в експлуатації і з найменшою вартістю, масою і габаритами, а також з високими енергетичними показниками. Порівняно зі всіма існуючими типами двигунів цим вимогам в найбільшій мірі відповідають асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором. При виборі двигуна такого типу необхідно з'ясувати, чи задовольняються технічні вимоги: допустиме зменшення швидкості при

збільшенні навантаження, допустима частота повторних включень, можливість швидкого і надійного пуску.

У напружених режимах роботи приводу, з великою частотою включень, де вимагає підвищені або обмежений пусковий момент, а також регулювання частоти, у вузьких межах застосовують асинхронні двигуни з контактними кільцями. Для нерегульованих приводів середньої і великої потужності, що працюють в позитивному режимі з рідкими пусками, рекомендується застосовувати синхронні двигуни. Вони відрізняються вищим ККД і допускають регулювання коефіцієнта потужності. При необхідності плавного і глибокого регулювання швидкості, а також при великій частоті включень застосовуються двигуни постійного струму.

При виборі потужності двигуна основними вихідними даними є необхідні моменти навантажень, які мають бути прикладені до валу механізму, тобто необхідно мати діаграми навантажень електроприводу $P(t)$ або $M(t)$. Які можуть бути дані у вигляді графіка або таблиці.

Залежно від характеру діаграми навантаження режими роботи двигунів можна звести до трьох: тривалому – $S1$, короткочасному - $S2$ і повторно-короткочасному - $S3$.

Повторно-короткочасний режим вважається тривалим при тривалості робочого циклу механізму більше 10 min. Якщо механізм працює з частотою обертання, що мало змінюється, то вибір електродвигуна здійснюється по еквівалентній потужності робочого циклу. Асинхронний двигун обов'язково перевіряється на перевантажувальну здатність і пусковий момент, оскільки для цього двигуна їх величина зазвичай невелика.

Приклад 5.4.1

Визначити потужність електродвигуна для приводу механізму, режим роботи якого заданий діаграми навантаження на Рис.5.16. За технологічними умовами має бути застосований асинхронний двигун з короткозамкнутим ротором. Двигун повинен мати частоту обертання $n = 2800 r / \text{min}$ і встановлений в сухому приміщенні без пилу і грязі.

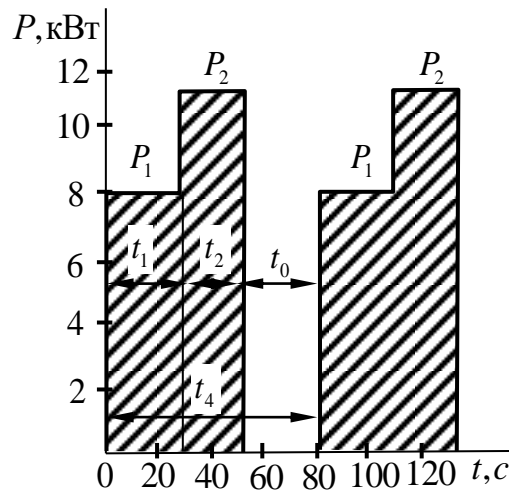


Рисунок 5.16 – Діаграма навантаження

Розв'язання

Еквівалентна потужність навантаження визначається з умови допустимого нагріву двигуна

$$P_E = \sqrt{\frac{P_1^2 \cdot t_1 + P_2^2 \cdot t_2 + \dots + P_n^2 \cdot t_n}{t_p}} = \sqrt{\frac{8^2 \cdot 30 + 12^2 \cdot 20}{50}} = 9.8 \text{ kW}$$

де t_p - сумарний час роботи механізму:

$$t_p = t_1 + t_2 = 30 + 20 = 50 \text{ s}.$$

Тривалість включення

$$ПВ = \frac{t_p}{t_u} = \frac{50}{80} \cdot 100\% = 62.5\%.$$

Тут t_u - тривалість циклу, що включає робочий час t_p і паузи t_0 :

$$t_u = t_p + t_0 = 50 + 30 = 80 \text{ s}.$$

Стандартні значення $ПВ$ прийняті рівними 15, 25, 40 и 60 %. Якщо $ПВ$ відрізняється від стандартного значення, то потужність перераховується на найближче стандартне $ПВ$

$$P'_E = P_E \cdot \sqrt{\frac{ПВ}{ПВ_{cm}}} = 9.8 \cdot \sqrt{\frac{62.5}{60}} = 10 \text{ kW}.$$

По каталогу вибираємо асинхронний к.з. електродвигун типа 4АС132М2 с номінальними даними при $PB = 60\%$; кратність пускового моменту $P_H = 11кW$; $U_H = 380 / 220V$, кратність пускового моменту $K_{II} = 2.1$, кратність максимального моменту $\lambda = 2.5$, синхронна частота обертання $n_0 = 3000 r / \text{min}$.

Вибраний двигун перевіряємо на перевантажувальну здатність з врахуванням можливого зниження напруги в мережі з умови, аби максимальний момент двигуна був більше максимального моменту навантаження.

Номінальний момент двигуна

$$M_H = \frac{P_H}{\frac{\pi \cdot n_H}{30}} = \frac{11 \cdot 10^3 \cdot 30}{3.14 \cdot 2800} = 37.5 N \cdot m,$$

тоді максимальний момент двигуна

$$M_M = \lambda \cdot M_H = 2.5 \cdot 37.5 = 94 N \cdot m.$$

Максимальний момент механічного навантаження знаходиться по максимальній потужності діаграми навантаження

$$M_{M.mex.} = \frac{P_{M.mex.}}{\frac{\pi \cdot n_H}{30}} = \frac{12 \cdot 10^3 \cdot 30}{3.14 \cdot 2800} = 41 N \cdot m.$$

Пуск двигуна після зупинки можливий, якщо його пусковий момент M_{II} більше моменту навантаження $M_{вкл.мех.}$, створюваного механізмом при його включенні після паузи.

$$M_{II} = K_{II} \cdot M_H = 2.1 \cdot 37.5 = 78.8 N \cdot m,$$

$$M_{вкл.мех.} = \frac{P_{вкл.мех.}}{\frac{\pi \cdot n_H}{30}} = \frac{8 \cdot 10^3 \cdot 30}{3.14 \cdot 2800} = 27.3 N \cdot m.$$

Перевірка здійснюється з умови

$$M_{M.mex.} \leq 0.8 \cdot M_M (N \cdot m);$$

$$M_{вкл.мех.} \leq 0.8 \cdot M_{II} (N \cdot m)$$

$$41 \leq 0.8 \cdot 94 = 75.2 N \cdot m;$$

$$27.3 \leq 0.8 \cdot 78.8 = 63 N \cdot m.$$

З розрахунку виходить, що двигун вибраний вірно, оскільки

$$41 \leq 75.2N \cdot \text{м} \qquad 27.3 \leq 63N \cdot \text{м}.$$

Якщо вибраний двигун не проходить перевірку, то по каталогу вибирається наступний потужніший, і перевірка виконується знову.

5.5 Контрольні завдання

Завдання 5.5.1. Для трифазного трансформатора, електрична схема якого змальована на Рис.5.7, визначити номінальні струми, опори обмоток і гілки, що намагнічує.

Побудувати зовнішню характеристику $U_2 = f_1(\beta)$ і залежність ККД від навантаження $\eta = f_2(\beta)$. Побудувати спрощену векторну діаграму для навантаження $\beta = 0.8$. Накреслити Т-подібну схему заміщення. Розрахувати річний ККД $\beta = 0.8$ і $T_p = 4000h$.

Дані для розрахунку приведені в табл.5.5.

Завдання 5.5.2. Трифазний асинхронний двигун з короткозамкненим ротором, електрична схема якого змальована на Рис.5.11, включений в мережу змінного струму на напругу U_H і частотою $f = 50\text{Hz}$.

Визначити споживану з мережі активну потужність, номінальний і пусковий струми; номінальний, максимальний і пусковий моменти. Чи можливий запуск двигуна з номінальним навантаженням при зниженні напруги в мережі на 20%? Побудувати механічну характеристику $n = f(M)$ двигуна.

Дані для розрахунку приведені в табл. 5.6.

Завдання 5.5.3. (варіанти 0-25) Генератор постійного струму з паралельним збудженням, номінальна напруга якого U_H , розвиває при частоті обертання n_H , номінальну потужність P_H . Задані опори обмотки якоря R_a і обмотки збудження. Механічні і магнітні втрати потужності складають 5% від мінімальної потужності. Визначити для номінального режиму струм навантаження, струм обмоток якоря, збудження, ККД. Розрахувати механічну потужність і момент приводного двигуна. Побудувати зовнішню характеристику.

Дані для розрахунку приведені в табл. 5.7.

Завдання 5.5.4. (варіанти 26-50). Двигун постійного струму з паралельним збудженням, номінальна напруга якого U_n , розвиває номінальну потужність P_n . Задані опори обмотки якоря R_α і обмотки збудження R_B , номінальний ККД і частота обертання n_n . При номінальному навантаженні. Визначити для номінального режиму споживані в мережі струм і потужність, струми обмоток якоря і збудження, що обертає момент. Розрахувати пусковий момент, опір і потужність пускового реостата, що забезпечує задану кратність пускового струму.

Побудувати природну механічну характеристику і штучну, отриману при введенні в ланцюг обмотки збудження регульовального реостата R_p . Опір R_p заданий у відсотках від опору обмотки збудження.

Дані для розрахунку приведені в табл. 5.8.

Завдання 5.5.5. Розрахувати потужність електричного двигуна для приводу виробничого механізму, діаграма навантаження якого і частота обертання n показані в

табл. 5.9. Вибрати по каталогу асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором і виконати його перевірку на перевантажувальну здатність і можливість запуску після зупинки.

Накреслити діаграму навантаження механізму.

Таблиця 5.5.

Варіант	Схема з'єднання	Дані для розрахунку							
		S_H	U_{1n}	U_{2n}	u_k	P_k	P_0	i_0	$\cos \phi_2$
		кВА	V	V	%	W	W	%	
0	Y/Y ₀	10	6300	400	5.0	335	105	10.0	0.7
1	Y/Δ	20	6300	230	5.0	600	180	9.0	0.9
2	Y/Y ₀	30	10000	400	5.0	850	300	9.0	0.6
3	Y/Y ₀	50	10000	400	5.0	1325	440	8.0	1.0
4	Y/Y ₀	75	10000	230	5.0	1875	590	7.5	0.8
5	Y/Y ₀	100	10000	525	5.0	2400	730	7.5	0.75
6	Y/Y ₀	180	10000	525	5.0	4100	1200	7.0	0.7
7	Y/Δ	240	10000	525	5.0	5100	1600	7.0	0.8
8	Y/Y ₀	320	35000	10500	6.5	6200	2300	7.5	0.9
9	Y/Δ	420	10000	525	5.5	7000	2100	6.6	1.0
10	Y/Y ₀	25	6000	230	4.5	600	125	3.0	1.0
11	Y/Y ₀	25	10000	230	4.7	690	125	3.0	0.6
12	Y/Δ	25	6000	400	4.5	600	125	3.0	0.8
13	Y/Δ	25	10000	400	4.7	690	125	3.0	0.75
14	Y/Y ₀	40	10000	230	4.5	880	180	3.0	0.7
15	Y/Y ₀	40	6000	230	4.5	880	180	3.0	0.6
16	Y/Y ₀	40	6000	400	4.7	1000	180	3.0	0.9
17	Y/Δ	40	10000	400	4.0	690	125	3.9	1.0
18	Y/Δ	63	6000	230	4.5	1280	260	2.8	0.7
19	Y/Δ	63	6000	400	4.5	1280	260	2.8	0.6
20	Y/Δ	63	10000	230	4.7	1470	260	2.8	0.75
21	Y/Y ₀	63	10000	400	4.7	1470	260	2.8	0.9
22	Y/Y ₀	63	2000	400	4.7	1470	260	2.8	1.0
23	Y/Y ₀	63	20000	230	4.7	1470	260	2.8	0.8
24	Y/Y ₀	63	2000	400	4.5	1280	260	2.8	0.7
25	Y/Δ	100	10000	230	4.7	2270	365	2.6	1.0
26	Y/Δ	100	10000	400	4.7	2270	365	2.6	0.9
27	Y/Δ	100	6000	230	4.5	1970	365	2.6	0.75
28	Y/Y ₀	100	6000	400	4.5	1970	365	2.6	0.6
29	Y/Δ	100	20000	230	4.7	2270	465	2.6	0.8
30	Y/Y ₀	100	20000	400	4.7	2270	465	2.6	0.7
31	Y/Δ	100	35000	230	4.7	2270	465	2.6	0.75
32	Y/Y ₀	100	35000	400	4.7	2270	465	2.6	0.9
33	Y/Δ	160	6000	230	4.5	2650	540	2.4	0.8
34	Y/Δ	160	6000	400	4.5	2650	540	2.6	0.6
35	Y/Y ₀	160	10000	230	4.5	3100	540	2.6	0.75

36	Y/Y_0	160	10000	400	4.5	3100	540	2.6	0.7
37	Y/Δ	160	6000	690	4.5	2650	540	2.6	0.8
38	Y/Δ	250	6000	230	4.5	3700	780	2.3	0.6
39	Y/Δ	250	6000	400	4.5	3700	780	2.3	0.75
40	Y/Δ	250	10000	230	4.7	4200	780	2.3	0.9
41	Y/Y_0	250	10000	690	4.7	4200	780	2.3	1.0
42	Y/Y_0	400	3000	400	4.5	5500	1080	3.2	0.8
43	Y/Y_0	400	6000	400	4.5	5500	1080	3.2	0.7
44	Y/Y_0	400	6000	690	4.5	5500	1080	3.2	0.6
45	Y/Y_0	400	6000	400	4.5	5500	1080	3.2	0.75
46	Y/Y_0	400	10000	230	4.5	5500	1080	3.2	0.8
47	Y/Y_0	400	10000	400	4.5	5500	1080	3.2	0.9
48	Y/Y_0	400	10000	690	4.5	5500	1080	3.2	1.0
49	Y/Y_0	630	3000	400	5.0	7600	1080	3.2	0.7
50	Y/Y_0	630	6000	400	5.0	7600	1080	3.2	0.5

Таблиця 5.6.

Варіант	Дані для розрахунку								
	U_H	P_H	p	η_n	$\cos \phi_n$	S_n	k_I	k_{II}	λ
	V	кW		%		%			
0	380	1.1	3	72.0	0.8	5.0	5.0	1.1	2.0
1	380	0.8	1	78.0	0.86	3.0	7.0	1.9	2.2
2	380	75.0	2	92.5	0.92	3.5	6.0	1.1	2.0
3	500	2	6	68.5	0.76	11.7	3.3	2.6	2.6
4	3000	430	2	93.0	0.87	1.3	4.5	0.9	1.8
5	380	190	1	91.5	0.86	1.4	5.5	1.0	2.1
6	220	135	3	90.8	0.88	2.0	5.5	1.3	2.2
7	220	95	4	89.0	0.83	3.4	4.5	1.2	1.9
8	380	100	4	91.0	0.85	2.0	4.5	1.1	2.0
9	220	280	3	92.3	0.88	2.0	5.1	1.2	2.1
10	3000	500	2	93.0	0.87	1.3	4.8	1.0	1.9
11	3000	380	3	92.0	0.86	1.5	4.5	0.9	1.8
12	3000	600	3	93.0	0.87	1.5	4.0	1.1	1.65
13	6000	310	3	91.0	0.85	1.5	6.0	1.2	2.6
14	3000	260	4	91.5	0.81	2.0	4.0	1.1	1.8
15	3000	500	4	92.5	0.85	2.0	4.0	1.1	1.7
16	6000	200	4	89.5	0.80	2.0	4.6	1.2	1.9
17	3000	200	5	90.5	0.81	2.5	4.2	0.9	1.8
18	3000	520	5	92.5	0.84	2.5	4.2	1.0	1.8
19	6000	260	5	90.0	0.80	2.5	4.5	1.1	2.0
20	6000	400	5	91.5	0.83	2.5	4.5	1.0	1.9
21	3000	140	6	89.0	0.76	3.0	3.9	0.9	1.8
22	3000	320	6	91.5	0.79	3.0	3.8	0.9	1.7
23	380	5.0	6	75.0	0.75	9.0	4.3	2.9	3.1
24	220	7.5	8	78.0	0.70	9.1	4.5	2.9	3.0
25	220	11.0	6	81.0	0.78	8.0	5.1	3.2	3.4
26	380	22.0	8	82.5	0.77	7.8	5.0	2.8	3.1
27	220	1.0	1	79.0	0.86	5.0	5.5	1.8	2.2
28	220	1.7	1	81.5	0.87	5.0	6.0	2.0	2.4
29	220	2.8	1	84.0	0.88	4.4	5.5	1.6	2.2
30	220	4.5	1	85.5	0.88	4.3	6.0	1.8	2.4
31	220	7.0	1	87.0	0.89	3.7	6.0	1.5	2.2
32	220	10.0	1	87.5	0.89	3.7	6.5	1.6	2.4
33	220	14.0	1	87.5	0.89	2.6	5.5	1.2	2.5
34	220	20	1	88.5	0.90	2.7	6.0	1.3	2.7
35	220	28	1	89.0	0.90	2.3	5.0	1.0	2.2
36	220	40	1	90.0	0.91	2.3	5.5	1.1	2.4
37	220	0.6	2	74.0	0.77	6.0	5.0	1.8	2.0

38	380	1.7	2	81.5	0.83	5.4	5.5	1.7	2.0
39	380	4.5	2	85.5	0.86	4.0	6.0	1.4	2.0
40	380	10	2	87.0	0.88	3.3	5.0	1.2	2.0
41	380	14	2	88.0	0.88	3.3	5.0	1.3	2.0
42	220	28	2	90.0	0.89	3.3	5.5	1.2	2.1
43	220	40	2	90.0	0.84	2.6	4.5	1.1	1.8
44	220	100	2	92.0	0.9	2.6	5.0	1.0	2.0
45	380	2.8	3	82.5	0.78	5.0	4.5	1.3	1.9
46	380	7.0	3	86.0	0.81	3.0	4.5	1.2	1.9
47	220	10	3	86.5	0.82	3.0	4.5	1.2	2.0
48	220	20	3	88.0	0.85	3.0	4.5	1.2	2.0
49	380	40	3	90.0	0.87	2.5	4.5	1.3	2.4
50	220	28	4	88.5	0.83	2.7	4.5	1.3	2.0

Таблиця 5.7.

Варіант	Дані розрахунку					
	P_n	U_n	n_n	η_n	R_γ	R_B
	кВт	V	r/min	%	Ω	Ω
0	0,37	230	950	80	12	1100
1	0,37	115	1450	75	4.56	320
2	0,6	230	1450	70	8.40	770
3	0,9	110	2850	85	1.30	150
4	1,1	160	2850	80	1.30	150
5	1,25	230	2850	72	3.06	390
6	1,5	320	2850	76	3.40	1050
7	1,87	220	2850	80	1.85	460
8	2,1	110	1450	75	0.87	65
9	2,6	115	2850	72	0.25	66
10	3,0	160	2850	75	0.22	90
11	3,4	220	1450	70	1.24	171
12	3,9	110	2850	85	0.21	65
13	4,8	160	2850	84	0.21	65
14	5,0	115	1450	80	0.14	32
15	56,8	220	1450	72	0.14	72
16	6,2	115	2850	76	0.09	30
17	7,2	115	2850	82	0.07	50
18	9,0	110	2850	80	0.05	61
19	11,0	115	2850	78	0.04	43
20	14,0	230	2850	72	0.01	134
21	18,0	230	2850	75	0.08	120
22	22,0	220	2850	80	0.09	198
23	35,0	115	1500	75	0.026	10
24	50,0	115	1450	78	0.01	11
25	70,0	230	1450	82	0.23	32

Таблиця 5.8.

Варіант	Дані розрахунку							
	P_n	U_n	η_n	n_n	R_d	R_B	k_I	R_p
	кW	V	%	r/min	Ω	Ω	-	%
26	0.3	110	63.4	1500	3.84	176	2.0	20
27	0.45	220	71.0	1500	0.9	810	2.5	30
28	0.7	110	73.0	3000	1.0	176	3.0	40
29	1.0	110	77.0	3000	0.64	158	2.0	50
30	2.2	220	81.9	3000	0.95	412	2.5	25
31	3.2	110	82.6	3000	0.13	285	3.0	20
32	4.5	220	80.2	3000	0.29	280	2.0	30
33	6.0	110	81.9	3000	0.07	62	2.5	40
34	7.4	220	84.5	3000	0.13	136	3.0	50
35	8.0	110	84.6	1500	0.05	158	2.0	35
36	11.0	220	86.5	1500	0.135	36	2.5	20
37	14.0	220	86.5	1500	0.09	116	3.0	40
38	19.0	220	86.3	3000	0.04	102	2.0	25
39	25.0	220	88.8	3000	0.03	100	2.5	30
40	32.0	220	86.6	3000	0.04	102	3.0	20
41	42.0	220	88.4	3000	0.02	118	2.0	40
42	55.0	220	88.3	1000	0.02	38	2.5	25
43	75.0	220	2.1	1500	0.01	32	3.0	50
44	100.0	440	90.1	1500	0.04	38	2.0	30
45	125.0	220	92.5	1500	0.006	33	2.5	40
46	85.0	220	90.0	750	0.02	24	3.0	20
47	110.0	220	91.7	1350	0.003	56	2.0	25
48	65.0	220	93.1	970	0.02	33	2.5	50
49	90.0	110	91.5	550	0.003	8.4	2.0	20
50	60.0	220	89.4	980	0.02	49.0	3.0	30

Таблиця 5.9.

Варіант	Дані для розрахунку								
	t_1	t_2	t_3	t_4	P_1	P_2	P_3	P_4	n
	S	S	S	S	кW	кW	кW	кW	r/min
0	30	40	100	20	10	7	3	0	2800
1	40	30	70	20	18	12	6	0	1420
2	40	60	70	60	22	8	0	14	730
3	60	20	100	120	8	26	0	17	960
4	30	50	80	130	20	0	16	10	1440
5	90	35	70	20	22	15	3	0	2850
6	80	60	100	50	0	2	4	1	950
7	30	80	90	60	0	3	2	1	720
8	60	50	140	100	7	4	0	12	1420
9	80	70	50	40	15	0	17	9	730
10	40	20	90	10	2	7	0	8	1420
11	100	120	50	180	1	5	0	10	725
12	90	10	30	60	8	0	17	5	2800
13	120	70	50	180	21	12	0	25	920
14	40	30	70	240	32	15	6	0	1460
15	100	160	50	20	3	0	12	4	960
16	30	140	50	240	11	10	0	21	1420
17	80	70	120	30	0	13	12	7	950
18	90	30	110	40	25	17	0	10	1440
19	130	80	25	60	30	15	12	0	725
20	40	70	200	50	11	9	0	10	930
21	70	40	120	80	0	6	11	4	715
22	50	100	30	70	12	0	7	9	960
23	30	120	40	120	0	19	10	22	700
24	50	90	60	240	3	1	0	3	920
25	70	80	100	150	4	0	9	5	1440
26	110	60	30	120	21	12	0	15	1420
27	80	100	60	60	9	5	7	0	2880
28	160	90	70	50	14	4	16	0	2850
29	30	40	120	180	0	12	8	18	725
30	25	50	180	25	8	0	5	12	960
31	40	90	110	120	13	11	0	9	940
32	100	60	70	20	1	0	4	7	730
33	90	50	150	75	0	21	19	15	2880
34	30	200	30	200	17	20	0	25	1440
35	160	60	100	80	24	21	15	0	2880
36	50	120	120	90	30	0	19	10	725
37	80	40	130	210	5	12	17	0	1440
38	40	70	90	210	0	7	12	14	960
39	100	40	180	90	13	0	9	16	1420

40	60	150	50	110	21	13	0	15	2880
41	30	40	90	70	8	19	0	11	1440
42	50	40	120	180	9	0	13	17	730
43	130	120	90	40	0	17	21	30	2870
44	30	40	70	20	14	0	12	7	1450
45	120	60	180	20	21	15	0	17	720
46	50	150	200	100	13	21	16	0	960
47	20	40	180	200	6	4	0	5	1440
48	120	70	150	60	0	13	6	25	730
49	30	60	120	90	19	5	0	10	960
50	110	90	30	60	0	12	4	18	2840

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Мілих В.І., Шавьолкін О.О. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка: Підручник. – К.: Каравела, 2008. – 688 с.
2. Гамола О.Є., Коруд В.І., Мадай В.С., Муси хіна Н.П. Електротехнічний практикум: Навч. посіб. – Львів: “Магнолія 2006”, 2013. – 194 с.
3. Головка Д.Б., Реґо К.Г., Скрипник Ю.О. Основи метрології та вимірювань: Навч. посіб. – К.: Либідь, 2001. – 408 с.
4. Монтік П.М. Електротехніка та електромеханіка: Навч. посібник. – Львів: «Новий світ-2000», 2012. – 500с.
5. Методичні вказівки і контрольні завдання з курсу «Електротехніка та електроніка» для студентів за напрямом 6.00502, 6.00503, 6.070106, 6.050603, 7.090504 заочної форми навчання / Укл.: В.В. Гололобов, О.Ф. Винаков, І.В. Меркулов, Е.В. Савьолова. - Одеса: ОНПУ, 2015. - 74 с.
6. Методичні вказівки до практичних занять з дисципліни «Електротехніка та електроніка» для студентів не електротехнічних спеціальностей. «Кола постійного струму» / Укл.: О.Ф. Винаков, Е.В. Савьолова, І.В. Меркулов. – Одеса: ОНПУ, 2017. – 17 с.
7. Методичні вказівки до практичних занять з дисципліни «Електротехніка та електроніка» для студентів не електротехнічних спеціальностей. «Кола змінного струму» / Укл.: О. Ф. Винаков, Е.В. Савьолова, І.В. Меркулов., Д.А.Івлєв – Одеса: ОНПУ, 2018. – 13 с.
8. Методичні вказівки до лабораторних занять до розділу «Дослідження однофазного трансформатора» з курсу електротехніки для студентів не електротехнічних спеціальностей. /Укл.: О. Ф. Винаков, Е.В. Савьолова, І.В. Меркулов., Д.А.Івлєв – -Одеса:ОНПУ,2018.-13с.
9. Методичні вказівки до лабораторних занять до розділу «Електричні машини постійного струму» з курсу електротехніки для студентів не електротехнічних спеціальностей./ Укл.: О. Ф. Винаков, Е.В. Савьолова, І.В. Меркулов – -Одеса:ОНПУ,2016.-20с.
10. Методичні вказівки до лабораторних занять до розділу «Дослідження трифазних двигунів з коротко замкнутим та фазним роторами» з курсу електротехніки для студентів не електротехнічних спеціальностей / Укл.: О.Ф. Винаков, І.В. Меркулов, Е.В. Савьолова. – Одеса: ОНПУ, 2020. – 21 с.
11. Яковлев О.В., Желіба Т.О. Основи метрології і електричні вимірювання: Учбовий посібник. – Одеса: АО БАХВА, 2003. – 72 с.