

Міністерство освіти і науки України
Таврійський державний агротехнологічний університет
імені Дмитра Моторного

БОВК О. Ю.

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

Навчальний посібник для здобувачів вищої освіти

Мелітополь

2021

УДК 621.3
В 61

Рекомендовано Вченою радою Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного як навчальний посібник для здобувачів ступеня вищої освіти «Бакалавр» зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» закладів вищої освіти III-IV рівня акредитації (Протокол № 8 від 24 травня 2021 р.)

Рецензенти:

Островерхов М. Я., доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Теоретична електротехніка», Національний технічний університет України «Київський політехнічний університет імені Ігоря Сікорського»

Діордієв В. Т., доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Електроенергетика і автоматизація», Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

Вовк О. Ю.

В 61 Електротехніка: Навчальний посібник для здобувачів ступеня вищої освіти «Бакалавр» зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / О. Ю. Вовк, ТДАТУ. – Мелітополь : ВПЦ «Люкс», 2021. – 203 с.

ISBN 978-617-7218-54-7

У навчальному посібнику представлено матеріал з електричних і магнітних кіл постійного та змінного синусоїдного струмів, а також електричних машин постійного та змінного струмів і трансформаторів. Розглянуто основні поняття електротехніки, головні закони електричних кіл, одиниці вимірювання електричних та магнітних величин, умовні графічні та літерні позначення елементів в електричних колах, базові методи розрахунків лінійних кіл постійного струму, однофазного та трифазного змінних синусоїдних струмів, будови і принципи дій, фізичні явища і процеси в електричних машинах постійного та змінного струмів і трансформаторах.

ISBN 978-617-7218-54-7

УДК 621.3

© Вовк О.Ю.

© Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного, 2021

ЗМІСТ

ВСТУП	5
ТЕМА 1	
ЛІНІЙНІ НЕРОЗГАЛУЖЕНІ ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	6
1.1 Явище електризації тіл і закон збереження заряду	6
1.2 Явище взаємодії заряджених тіл і закон Кулона	7
1.3 Явище електричного струму і закон Ома	14
1.4 Явище теплової дії електричного струму і закон Джоуля – Ленца	18
1.5 Електричне коло і його елементи	21
1.6 Зображення електричного кола	22
1.7 Розрахунок нерозгалуженого електричного кола	24
1.8 Основні режими роботи електричного кола	30
ТЕМА 2	
ЛІНІЙНІ РОЗГАЛУЖЕНІ ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	32
2.1 Закони Кірхгофа	32
2.2 Застосування законів Кірхгофа для розрахунку розгалужених кіл	34
2.3 Еквівалентні перетворення схем з'єднань опорів	35
ТЕМА 3	
МАГНІТНІ КОЛА ПРИ ПОСТІЙНИХ НАМАГНІЧУЮЧИХ СИЛАХ	47
3.1 Явище і закон електромагнетизму	47
3.2 Напруженість магнітного поля і закон повного струму	52
3.3 Крива намагнічування	56
3.4 Петля гістерезису	57
3.5 Магнітне коло та його конструктивна схема	58
3.6 Електромагніти та їх розрахунок	59
ТЕМА 4	
НЕРОЗГАЛУЖЕНІ ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА СИНУСОЇДНОГО СТРУМУ	61
4.1 Основні фізичні поняття	61
4.2 Коло синусоїдного струму з резистором	71
4.3 Коло синусоїдного струму з ідеальною котушкою	75
4.4 Реальна котушка в колі синусоїдного струму	79
ТЕМА 5	
СИМЕТРИЧНІ НЕРОЗГАЛУЖЕНІ ТРИФАЗНІ КОЛА СИНУСОЇДНОГО СТРУМУ	85
5.1 Трифазний генератор	85
5.2 Трифазні системи	87

5.3 З'єднання фаз генератора зіркою	91
5.4 З'єднання фаз навантаження трикутником	95
5.5 Потужності трифазного кола	97
5.6 Розрахунок нерозгалужених трифазних кіл синусоїдного струму	99
5.7 Переключення навантаження із зірки на трикутник	108
ТЕМА 6	
ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	111
6.1 Генератор постійного струму	111
6.2 Електродвигун постійного струму	128
ТЕМА 7	
ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ ЗМІННОГО СТРУМУ	140
7.1 Трифазний асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором	140
7.2 Трифазний асинхронний електродвигун з фазним ротором	167
Тема 8	
ТРАНСФОРМАТОРИ. ОСНОВИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ	172
8.1 Однофазний трансформатор	172
8.2 Трифазний силовий трансформатор	184
8.3 Вимірювальні трансформатори	187
8.4 Автотрансформатор	193
8.5 Зварювальний трансформатор	195
8.6 Основи електропостачання	197
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	203

ВСТУП

Дисципліна «Електротехніка», є фундаментальною дисципліною, на базі якої вивчаються всі інші професійно-орієнтовані дисципліни спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» ступеня вищої освіти «Бакалавр». Це обумовлено тим, що сучасна електрифікація, починаючи з отримання електричної енергії і закінчуючи її перетворенням у інші види, базується головним чином на застосуванні різноманітних електричних і електромагнітних пристроїв. Тому задачею даного навчального посібника є навчання здобувачів вищої освіти основам електротехніки з метою підготовки їх як до вивчення інших дисциплін електротехнічного спрямування, так і до практичної діяльності.

Особливе значення при вивченні електротехніки мають знання фізичних явищ та законів, зокрема, семи електромагнітних явищ: електризації тіл, взаємодії зарядів, електричного струму, теплової дії електричного струму, електромагнетизму, електромагнітної індукції, електромагнітної сили. Тому в навчальному посібнику наведені основні відомості про ці явища та закони.

На базі вказаних явищ і законів розглядаються електричні кола постійного та синусоїдного струмів, а також елементарні магнітні кола, які знаходяться у основі будови будь-якого електротехнічного пристрою. Наводяться основні співвідношення між фізичними величинами у зазначених колах та методи розрахунку вказаних кіл.

У навчальному посібнику розглянуто основні види електричних машин постійного та змінного синусоїдного струмів, а також трансформаторів. Наведено їх конструктивні схеми, описано будови та принципи дій, енергетичні діаграми, розглянуто основні принципи керування ними. Розглянуто основні елементи та принципи електропостачання.

Навчальний посібник написаний таким чином, щоб здобувачі вищої освіти мали можливість самостійно вивчати курс електротехніки. Для цього матеріал викладається так, що поряд з теоретичними положеннями наводиться їх практичне застосування для розв'язання задач. В кінці кожного розділу теми даються запитання і завдання для самоконтролю.

Для успішного вивчення курсу електротехніки необхідно послідовно і ритмічно виконувати програму вивчення, прагнучі повного розуміння викладеного матеріалу, не минаючи жодного розділу, тому що курс даної дисципліни є цільним та безперервним.

Тема 1

ЛІНІЙНІ НЕРОЗГАЛУЖЕНІ ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

1.1 Явище електризації тіл і закон збереження заряду

Речовини, з яких утворений навколишній нас світ, складаються з простих елементів – атомів. Кожний атом має ядро, навколо якого на орбітах обертаються електрони. Ядро знаходиться в центрі атома і має позитивний заряд, воно складається з протонів (мають позитивний заряд) і нейтронів (не мають заряду). Електрони мають негативний заряд і рухаються на великій відстані від ядра (якщо уявити собі атом розміром з 10-копійчану монету, то відстань між ядром і найближчими електронами буде дорівнювати 1 км).

У звичайному стані всі тіла електрично нейтральні, тобто кількість електронів у будь-якому тілі дорівнює кількості протонів у ньому, тому сума всіх негативних зарядів у тілі дорівнює сумі всіх позитивних зарядів. При певних умовах електрони, що входять до складу атомів одного тіла, можуть переходити до атомів іншого тіла. У результаті одне тіло втрачає деяку кількість електронів і набуває позитивний заряд, а інше тіло отримує ці електрони і набуває негативний заряд. Отже, *електризація тіла полягає у втраті або придбанні тілом деякої кількості електронів*. Електричні заряди не створюються і не зникають, вони тільки можуть переходити від одного тіла до іншого.

Електризація тіл може відбуватись внаслідок наступного: тертя тіл між собою (трібоелектричний ефект); піднесення або торкання зарядженого тіла до іншого (електризація внаслідок впливу); попадання на тіло променів Сонця (фотоефект); нагрівання тіла; хімічної реакції; тиску на тіло (п'єзоефект).

Закон збереження електричного заряду полягає в тому, що *алгебраїчна сума зарядів замкненої системи з часом не змінюється*.

Математичний запис закону виглядає так:

$$\sum_1^n q_i = \text{const}, \quad (1.1)$$

де q_i – заряд i -го тіла, Кл.

Приклад 1.1

У замкненій системі є два тіла. Перше тіло має заряд **+0,1 Кл**. Друге тіло нейтральне. У результаті взаємодії цих тіл друге тіло віддало першому заряд **-0,1 Кл**. Як зарядилися тіла? Перевірте закон збереження заряду.

Розв'язок.

До взаємодії закон збереження електричного заряду запишеться так:

$$q_1 + q_2 = \text{const};$$
$$0,1 + 0 = 0,1.$$

Після взаємодії перше тіло стало нейтральним, а друге тіло придбало заряд $+0,1$ Кл. Тому після взаємодії закон збереження електричного заряду запишеться так:

$$q_1 + q_2 = \text{const};$$
$$0 + 0,1 = 0,1.$$

Уведемо поняття *точкового заряду*, під яким будемо розуміти заряджене тіло, розмірами якого в даних умовах можна знехтувати. Тому реальне тіло із сукупністю величезної кількості елементарних зарядів (рис.1.1) можна умовно замінити точкою із зарядом (рис.1.2), який дорівнює сумі елементарних зарядів цього тіла (за аналогією з матеріальною точкою в механіці).

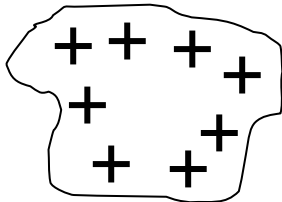


Рисунок 1.1 – Заряджене тіло



Рисунок 1.2 – Точковий заряд

Запитання для самоконтролю

1. Яка будова атома?
2. У чому суть явища електризації тіл?
3. Як можна наелектризувати тіла?
4. Сформулюйте закон збереження заряду.
5. Виконайте математичний запис закону.
6. Що є одиницею заряду?
7. Дайте визначення точкового заряду.

Завдання для самоконтролю

1. Тіло втратило **20 Кл** негативного заряду. Який заряд придбало це тіло?
2. Тіло придбало **30 Кл** негативного заряду і **30 Кл** позитивного заряду. Який результуючий заряд придбало це тіло?

1.2 Явище взаємодії заряджених тіл і закон Кулона

Явище взаємодії заряджених тіл відкрив французький фізик Шарль Дюфе в 1730 році. Воно полягає в тому, що *між зарядженими тілами існують сили притягання або відштовхування: тіла, що мають заряд одного знаку, відштовхуються; а тіла, що мають заряд різного знаку, притягуються* (рис.1.3).

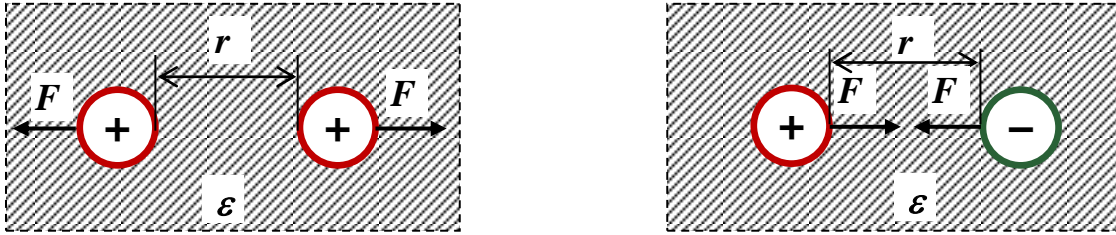


Рисунок 1.3 – Явище взаємодії заряджених тіл

Заряджені тіла взаємодіють за допомогою електричного поля, що існує навколо них і є особливою формою матерії.

Закон взаємодії заряджених тіл експериментально відкрив французький фізик Шарль Кулон у 1785 році, тому на його честь він названий законом Кулона. Формулюється він так: *два нерухомих точкових електричних заряди взаємодіють із силою, прямо пропорційною добутку модулів цих зарядів і обернено пропорційною квадрату відстані між ними і діелектричній проникності середовища та спрямованою уздовж лінії, яка з'єднує ці заряди.*

Математичний запис закону Кулона у скалярній формі:

$$F = \frac{q_1 \cdot q_2}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot r^2}, \quad (1.2)$$

де F – сила взаємодії між точковими зарядами, H ;
 q_1, q_2 – модулі точкових зарядів, $Кл$;
 r – відстань між точковими зарядами, $м$;
 ε_0 – електрична постійна (абсолютна діелектрична проникність вакууму), $\Phi/м$; $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \Phi/м$;
 ε – відносна діелектрична проникність середовища, у якому знаходяться заряди (показує, у скільки разів сила взаємодії нерухомих точкових зарядів менша у певному середовищу у порівнянні із вакуумом).

$$[F] = \frac{\frac{Кл \cdot Кл}{\frac{\Phi}{м} \cdot м^2}}{\frac{Кл}{В} \cdot м} = \frac{Кл \cdot Кл}{\frac{А \cdot с}{В} \cdot м} = \frac{В \cdot А \cdot с}{м} = \frac{Вт \cdot с}{м} = \frac{Дж}{м} = \frac{Н \cdot м}{м} = Н.$$

Приклад 1.2

Два точкових заряди $q_1 = +4\pi \cdot 10^{-6} Кл$ і $q_2 = -8,85 \cdot 10^{-6} Кл$ знаходяться в середовищі з діелектричною проникністю в **20 разів** більшою, ніж у вакуумі, на відстані **0,1 м** один від одного (рис.1.4). Як і з якою силою будуть взаємодіяти зазначені заряди?

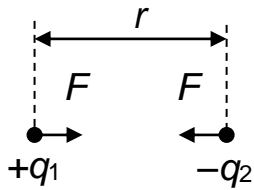


Рис.1.4

Розв'язок.

Заряди будуть притягатися один до одного із силою, яку знаходимо за (1.2):

$$F = \frac{4\pi \cdot 10^{-6} \cdot 8,85 \cdot 10^{-6}}{4\pi \cdot 20 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,1^2} = 5 \text{ Н.}$$

Якщо необхідно визначити силу взаємодії між трьома і більше нерухомими точковими зарядами, то спочатку знаходять сили взаємодії між парами точкових зарядів (як показано у прикладі 1.2), а потім додають знайдені сили як вектори. Як приклад на рис.1.5 показано, як визначається рівнодіюча сила, що діє на один з трьох нерухомих точкових зарядів.

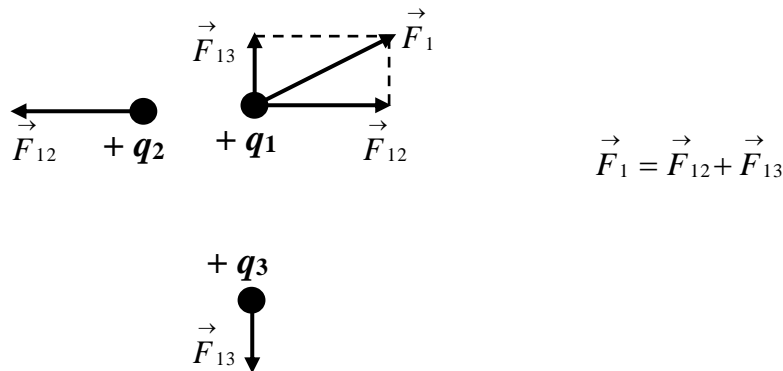


Рисунок 1.5 – Взаємодія трьох нерухомих точкових зарядів

Електричне поле зарядженого тіла діє на електричні заряди, поміщені в будь-яку його точку, з певною силою. Уведемо поняття **пробного заряду**, під яким будемо розуміти позитивний заряд малої величини $q_{пр}$, який не створює власного електричного поля. Розташуємо його в полі позитивного заряду q . На пробний заряд з боку електричного поля позитивного заряду буде діяти сила F (рис.1.6).



Рис.1.6

Для силової характеристики електричного поля уведена **напруженість** електричного поля в даній точці, під якою розуміється фізична величина, яка чисельно дорівнює відношенню сили, з якою поле діє на пробний заряд, поміщений у дану точку поля, до значення цього заряду, тобто

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_{пр}}, \quad (1.3)$$

де E – напруженість, V/m ;
 F – сила, H ;
 $q_{пр}$ – пробний заряд, $Kл$.

$$[E] = \frac{H}{Kл} = \frac{H}{A \cdot c} = \frac{Дж}{м \cdot A \cdot c} = \frac{Вт \cdot c}{м \cdot A \cdot c} = \frac{В \cdot A}{A \cdot м} = \frac{В}{м}$$

Приклад 1.3

Точковий заряд $q = +4\pi \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}$ Кл знаходиться в середовищі з відносною діелектричною проникністю $\epsilon = 10$. Визначити напруженість електричного поля в точці, що знаходиться на відстані **0,05 м** від заряду.

Розв'язок.

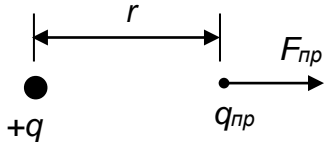


Рис.1.7

Силу, що діє на пробний заряд, знаходимо за законом Кулона:

$$F_{пр} = \frac{q \cdot q_{пр}}{4\pi \cdot \epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot r^2} \quad (1.4)$$

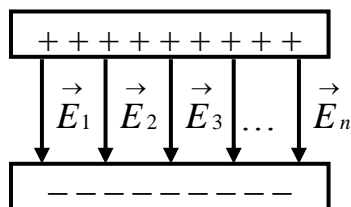
Підставивши (1.4) в (1.3) та перетворивши, знаходимо розрахункову формулу напруженості у даній точці електричного поля:

$$E = \frac{q}{4\pi \cdot \epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot r^2} \quad (1.5)$$

Підставивши в (1.5) значення фізичних величин, отримуємо:

$$E = \frac{4\pi \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}}{4\pi \cdot 10 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,05^2} = 40 \frac{В}{м}$$

Напрямок вектора напруженості збігається з напрямком вектора сили, яка діє з боку електричного поля на пробний заряд, розміщений у певній його точці. Електричне поле, в якому напрям і значення напруженості в усіх точках однакові, називається **однорідним**. Таке електричне поле утворюється, наприклад, між плоскими паралельними пластинами, які заряджені протилежними знаками (рис.1.8).



$$\vec{E}_1 = \vec{E}_2 = \vec{E}_3 = \dots = \vec{E}_n$$

Рисунок 1.8 – Однорідне електричне поле

Якщо електричне поле утворено кількома нерухомими точковими зарядами (рис.1.5), то результуюча напруженість такого поля визначається за **принципом суперпозиції електричних полів**, який формулюється так: повна напруженість електричного поля у певній його точці дорівнює геометричній сумі напруженостей полів, створених у даній точці окремими

точковими зарядами. Математичний запис принципу суперпозиції електричних полів:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n . \quad (1.6)$$

Пробний заряд, поміщений у певну точку електричного поля, під дією сили з боку електричного поля у початковий момент часу може почати переміщуватись у певному напрямку (рис.1.6). Тому пробний заряд, поміщений у певну точку електричного поля, має потенціальну енергію (за аналогією з матеріальним тілом, піднятим над землею, на яке діє сила тяжіння). Для енергетичної характеристики електричного поля введений **потенціал** електричного поля в даній його точці, під яким розуміється фізична величина, що чисельно дорівнює відношенню потенціальної енергії, якою володіє пробний заряд, поміщений у дану точку поля, до значення цього заряду, тобто

$$\varphi = \frac{W_n}{q_{пр}} , \quad (1.7)$$

де φ – потенціал, *В*;
 W_n – потенціальна енергія, *Дж*;
 $q_{пр}$ – пробний заряд, *Кл*.

$$[\varphi] = \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} = \frac{\text{Вт} \cdot \text{с}}{\text{А} \cdot \text{с}} = \frac{\text{В} \cdot \text{А}}{\text{А}} = \text{В}.$$

Приклад 1.4

Точковий заряд $q = +4\pi \cdot 8,85 \cdot 10^{-11} \text{ Кл}$ знаходиться в середовищі, відносна діелектрична проникність якого дорівнює $\varepsilon = 10$. Визначити потенціал точки електричного поля, яка знаходиться на відстані **0,01 м** від заряду.

Розв'язок.

Потенціал точки електричного поля визначається за (1.7).

Потенціальна енергія пробного заряду, внесеного в дану точку поля, визначається так:

$$W_n = F_{пр} r , \quad (1.8)$$

де $F_{пр}$ – сила, що діє на пробний заряд, *Н*;
 r – відстань до пробного заряду, *м*.

Сила, що діє на пробний заряд, визначається за (1.4).

Підставивши (1.4) і (1.8) в (1.7) та перетворивши, знаходимо розрахункову формулу потенціалу в даній точці електричного поля:

$$\varphi = \frac{q}{4\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot r}. \quad (1.9)$$

Підставляємо чисельні значення фізичних величин у (1.9) і знаходимо потенціал:

$$\varphi = \frac{4\pi \cdot 8,85 \cdot 10^{-11}}{4\pi \cdot 10 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,01} = 100 \text{ В}.$$

Пробний заряд, поміщений у певну точку електричного поля, у будь-який момент часу (відмінний від початкового) переміщується під дією сил електричного поля, які виконують роботу з перенесення пробного заряду з однієї точки електричного поля в іншу (рис.1.9).

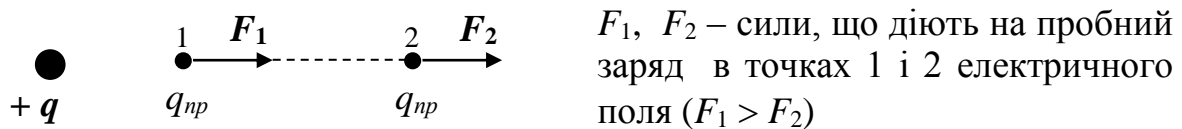


Рисунок 1.9 – Переміщення пробного заряду в електричному полі

Для енергетичної характеристики електричного поля введена також **напряга** електричного поля, під якою розуміється фізична величина, яка чисельно дорівнює відношенню роботи, яку виконують сили електричного поля з перенесення пробного заряду з однієї точки електричного поля в іншу (на рис.1.9 з точки 1 в точку 2), до значення цього заряду, тобто

$$U_{12} = \frac{A_{12}}{q_{пр}}, \quad (1.10)$$

де U_{12} – напряга між точками 1 і 2 електричного поля, В;
 A_{12} – робота сил електричного поля з перенесення пробного заряду з точки 1 в точку 2, Дж.

$$[U] = \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} = \frac{\text{Вт} \cdot \text{с}}{\text{А} \cdot \text{с}} = \frac{\text{В} \cdot \text{А}}{\text{А}} = \text{В}.$$

При переміщенні в електричному полі пробного заряду його потенціальна енергія буде зменшуватись, тому робота сил електричного поля з перенесення цього заряду дорівнює зменшенню його потенціальної енергії, тобто

$$A_{12} = W_{n1} - W_{n2}, \quad (1.11)$$

де W_{n1}, W_{n2} – потенціальна енергія пробного заряду в точках 1 і 2 електричного поля, Дж.

Підставивши (1.11) у (1.10) та перетворивши з урахуванням (1.7), отримуємо, що **напруга** електричного поля – це фізична величина, яка дорівнює різниці потенціалів точок електричного поля, тобто

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2, \quad (1.12)$$

де φ_1, φ_2 – потенціали різних точок (точок 1 і 2) електричного поля, B .

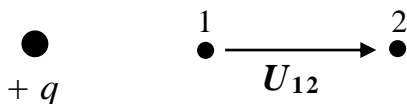


Рис.1.10

Графічно напруга електричного поля зображується стрілкою, спрямованою від точки з більшим потенціалом до точки з меншим потенціалом (рис.1.10).

Електричне поле точкового заряду можна зобразити графічно за допомогою силових ліній і еквіпотенціальних поверхонь. **Силова лінія електричного поля** – це траєкторія руху пробного заряду у цьому полі. **Еквіпотенціальна поверхня** – це поверхня, у всіх точках якої потенціал електричного поля має однакове значення. Представимо на площині електричне поле позитивного точкового заряду (рис.1.11).

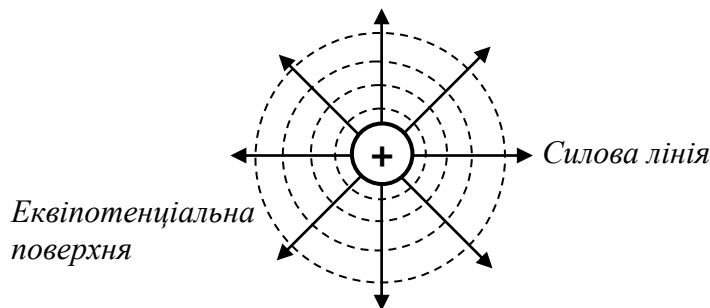


Рисунок 1.11 – Електричне поле позитивного точкового заряду

Запитання для самоконтролю

1. У чому суть явища взаємодії заряджених тіл?
2. За допомогою чого взаємодіють заряди?
3. Сформулюйте закон взаємодії заряджених тіл.
4. Виконайте математичний запис закону Кулона.
5. Вкажіть одиниці фізичних величин, що описують закон Кулона.
6. Що таке електрична постійна? Укажіть її значення.
7. Що таке відносна діелектрична проникність середовища?
8. Дайте визначення пробного заряду.
9. Дайте визначення напруженості електричного поля.
10. Запишіть визначальну формулу напруженості електричного поля.
11. Що є одиницею напруженості електричного поля?
12. Запишіть розрахункову формулу напруженості електричного поля.
13. Сформулюйте принцип суперпозиції електричних полів.
14. Математично запишіть принцип суперпозиції електричних полів.
15. Дайте визначення потенціалу електричного поля.

16. Запишіть визначальну формулу потенціалу електричного поля.
17. Що є одиницею потенціалу електричного поля?
18. Запишіть розрахункову формулу потенціалу електричного поля.
19. Дайте визначення напруги електричного поля.
20. Запишіть визначальні формули напруги електричного поля.
21. Що є одиницею напруги електричного поля?
22. Що таке силова лінія електричного поля?
23. Що таке екіпотенціальна поверхня електричного поля?
24. Як графічно зображується електричне поле?

Завдання для самоконтролю

1. В електричне поле позитивного точкового заряду $q_1 = 30 \text{ Кл}$ внесли малий пробний заряд $q_2 = 4\pi \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}$. Середовище, у якому знаходяться заряди, має відносну діелектричну проникність $\epsilon = 20$. Заряди знаходяться на відстані **0,1 м** один від одного. Визначити силу, що діє на пробний заряд.
2. Негативний точковий заряд $q_3 = 4\pi \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}$ створює електричне поле в середовищі з відсноною діелектричною проникністю $\epsilon = 10$. Визначити напруженість електричного поля на відстані **0,01 м** від заряду.
3. Визначити потенціал електричного поля у точці, зазначеної в завданні 2.
4. Потенціали точок 1 і 2 електричного поля відповідно дорівнюють **20 В** та **10 В**. Визначити напругу електричного поля між зазначеними точками.
5. Зобразити силові лінії негативно зарядженого точкового заряду.
6. Зобразити екіпотенціальні лінії негативно зарядженого точкового заряду.

1.3 Явище електричного струму і закон Ома

У природі є тіла, які мають вільні заряди: у металах – вільні електрони (такі, що втратили зв'язок із ядром атома), в електролітах – іони (атоми, у яких різна кількість протонів і електронів), у газах – вільні електрони та іони; такі тіла називаються **провідниками**.

Розглянемо металевий провідник. Якщо до кінців такого провідника підвести заряди різного знаку, то в ньому виникне електричне поле, створене цими зарядами (рис.1.12).

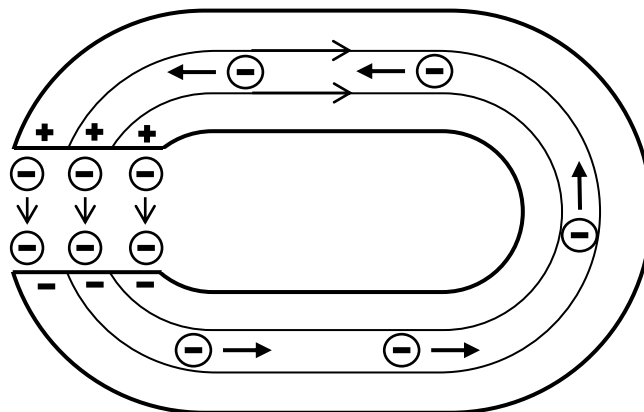


Рисунок 1.12 – Явище електричного струму у металевому провіднику

Вплив електричного поля на вільні заряди призведе їх до руху у певному напрямку. Цей *упорядкований (спрямований) рух вільних зарядів під дією сил електричного поля назвали електричним струмом провідності*.

Для виникнення цього явища необхідно: 1) мати речовину, у якій є вільні заряди (тобто речовина повинна бути провідником); 2) на кінцях провідника повинні бути заряди різного знаку; 3) провідник повинен бути замкненим (тобто цілісним, не розірваним).

По мірі руху вільних зарядів у напрямку позитивно зарядженого полюсу провідника він нейтралізується і явище електричного струму зникає. Щоб цього не відбулось, необхідно вільні заряди, які прийшли до позитивно зарядженого полюсу переносити на негативно заряджений полюс, виконуючи роботу з подолання існуючих між ними сил відштовхування. Цю роботу виконує певний пристрій, який називають джерелом електричної енергії. Джерело перетворює природну енергію у роботу з перенесення вільних зарядів проти сил електричного поля.

Для енергетичної характеристики джерела електричної енергії уведена фізична величина – *електрорушійна сила (е.р.с.)*, під якою розуміється відношення роботи, яку виконують сторонні сили джерела з перенесення зарядів проти сил електричного поля, до значення цих зарядів, тобто

$$E = \frac{A}{q}, \quad (1.13)$$

де E – електрорушійна сила, B ;
 A – робота сторонніх сил, $Дж$;
 q – заряд, $Кл$.

$$[E] = \frac{Дж}{Кл} = \frac{Вт \cdot с}{А \cdot с} = \frac{В \cdot А}{А} = В.$$

Приклад 1.5

У джерелі електричної енергії сторонні сили переносять **10 Кл** негативно заряду на негативний полюс, виконуючи при цьому роботу, значення якої дорівнює **2000 Дж**. Визначити значення електрорушійної сили, яку розвиває джерело електричної енергії.

Розв'язок.

Підставляємо значення зазначених фізичних величин у (1.13) і знаходимо значення е.р.с.:

$$E = \frac{2000}{10} = 200 \text{ В}.$$

Для характеристики інтенсивності руху вільних зарядів під дією сил електричного поля уведена фізична величина – **сила електричного струму**, під якою розуміється заряд, що проходить через поперечний переріз провідника за одиницю часу, тобто

$$I = \frac{q}{t}, \quad (1.14)$$

де I – сила електричного струму, A ;
 q – заряд, $Kл$;
 t – час, $с$.

$$[I] = \frac{Kл}{с} = \frac{A \cdot с}{с} = A.$$

Приклад 1.6

Через поперечний переріз провідника за **5 секунд** проходить заряд **100 Кл**. Визначити силу струму в провіднику.

Розв'язок.

Підставляємо значення вказаних фізичних величин у (1.14) і знаходимо силу електричного струму:

$$I = \frac{100}{5} = 20 \text{ А.}$$

При русі вільних зарядів по провіднику під дією сил електричного поля вони зіштовхуються з його молекулами (атомами) і отримують опір своєму руху. Для характеристики цього факту введений **опір провідника електричному струму**; він залежить від матеріалу провідника, його довжини і площі поперечного перерізу наступним чином:

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (1.15)$$

де R – опір провідника, $Ом$;
 ρ – питомий опір провідника, $Ом \cdot мм^2/м$ ($Ом \cdot м$);
 l – довжина провідника, $м$;
 S – площа поперечного перерізу провідника, $мм^2$.

$$[R] = Ом \cdot \frac{мм^2}{м} \cdot \frac{м}{мм^2} = Ом.$$

Приклад 1.7

Провідник з питомим опором $\rho = 0,023 \text{ Ом} \cdot мм^2/м$ має довжину $l = 1000 \text{ м}$ і площу поперечного перерізу $S = 2,3 \text{ мм}^2$. Визначити опір провідника.

Розв'язок.

Підставляємо значення вказаних величин у (1.15) і знаходимо опір провідника:

$$R = 0,023 \cdot \frac{1000}{2,3} = 10 \text{ Ом}.$$

Закон електричного струму для окремого провідника відкрив німецький фізик Георг Ом, тому на його честь він названий законом Ома. Відповідно до цього закону **сила струму в провіднику прямо пропорційна напрузі на затискачах провідника і обернено пропорційна опору провідника.**

Математичний запис закону Ома:

$$I = \frac{U}{R}, \quad (1.16)$$

де I – сила струму в провіднику, A ;
 U – напруга на затискачах провідника, B ;
 R – опір провідника, $Ом$.

$$[I] = \frac{B}{Ом} = A.$$

Приклад 1.8

До провідника, опір якого **100 Ом**, приклали напругу **200 В**. Визначити силу струму в провіднику.

Розв'язок.

Підставляємо вказані значення фізичних величин у (1.16) і знаходимо силу струму в провіднику:

$$I = \frac{200}{100} = 2 \text{ А}.$$

Запитання для самоконтролю

1. Яку речовину називають провідником?
2. Що таке вільний електрон?
3. Що таке іон?
4. У чому суть явища електричного струму?
5. За яких умов виникає електричний струм?
6. Дайте визначення електрорушійної сили.
7. Запишіть визначальну формулу електрорушійної сили.
8. Отримайте одиницю електрорушійної сили з її визначальної формули.
9. Дайте визначення сили електричного струму.
10. Запишіть визначальну формулу сили струму.
11. Отримайте одиницю сили струму з її визначальної формули.

12. Як розрахувати опір провідника електричному струму?
13. Що є одиницею опору провідника електричному струму.
14. Сформулюйте закон Ома для окремого провідника.
15. Виконайте математичний запис закону Ома для окремого провідника.

Завдання для самоконтролю

1. Сторонні сили джерела переносять заряд величиною **200 Кл** проти сил електричного поля. При цьому виконується робота, яка дорівнює **44000 Дж**. Визначити е.р.с., яку розвиває джерело.
2. За **12 секунд** через поперечний переріз провідника проходить заряд величиною **144 Кл**. Визначити силу електричного струму.
3. Провідник з питомим опором, який дорівнює **0,017 Ом·мм²/м**, має довжину **1000 м** і площу поперечного перерізу **1,7 мм²**. Визначити опір провідника.
4. До провідника, опір якого **25 Ом**, приклали напругу **100 В**. Визначити силу струму в провіднику.

1.4 Явище теплової дії електричного струму і закон Джоуля – Ленца

Явище теплової дії електричного струму полягає у тому, що при протіканні електричного струму у провіднику відбувається зіткнення вільних зарядів з молекулами (атомами) провідника, під час якого вільні заряди віддають їм частину своєї енергії, збільшуючи швидкість теплового руху молекул (атомів), що призводить до **нагрівання провідника при проходженні по ньому електричного струму**.

Закон теплової дії струму відкрили англійський фізик Джеймс Джоуль та російський фізик Емілій Ленц, тому на їх честь він названий законом Джоуля-Ленца. Відповідно до цього закону **кількість теплоти, яка виділяється в провіднику, прямо пропорційна опору провідника, квадрату сили електричного струму і часу його дії**.

Математичний запис закону Джоуля-Ленца:

$$W = R \cdot I^2 \cdot t, \quad (1.17)$$

де W – кількість теплоти, яка виділилася в провіднику, Дж;
 R – опір провідника, Ом;
 I – сила струму в провіднику, А;
 t – час протікання електричного струму в провіднику, с.

$$[W] = \text{Ом} \cdot \text{А}^2 \cdot \text{с} = \text{В} \cdot \text{А} \cdot \text{с} = \text{Вт} \cdot \text{с} = \text{Дж}.$$

Приклад 1.9

По провіднику, опір якого дорівнює **100 Ом**, проходить електричний струм силою **10 А** протягом **100 секунд**. Визначити кількість теплоти, яка виділиться в провіднику за цей час.

Розв'язок.

Підставляємо вказані значення фізичних величин у (1.17) і знаходимо кількість теплоти:

$$W = 100 \cdot 10^2 \cdot 100 = 1\,000\,000 \text{ Дж} = 1\,000 \text{ кДж} = 1 \text{ МДж}.$$

Для назви енергії, якою володіє електричний струм, в електротехніці застосовують не кількість теплоти, а електричну енергію. У технічній системі одиниць електрична енергія вимірюється в кіловат-годинах (*кВт·год*), знайдемо співвідношення енергій 1 *кВт·год* та 1 *Дж*:

$$1 \text{ кВт} \cdot \text{год} = 1000 \text{ Вт} \cdot 3600 \text{ с} = 3\,600\,000 \text{ Дж} = 3,6 \text{ МДж}.$$

Для зручності енергетичної характеристики джерел і приймачів електричної енергії ввели *потужність електричного струму*, під якою розуміється фізична величина, яка дорівнює кількості електричної енергії, яка виділяється в провіднику у вигляді тепла за одиницю часу, тобто

$$P = \frac{W}{t}, \quad (1.18)$$

де P – потужність, *Вт*;
 W – електрична енергія, *Дж*;
 t – час, *с*.

$$[P] = \frac{\text{Дж}}{\text{с}} = \text{Вт}.$$

Приклад 1.10

У провіднику, по якому проходить електричний струм, за **100 секунд** виділяється **220000 Дж** теплової енергії. Визначити потужність електричного струму.

Розв'язок.

Підставляємо вказані значення фізичних величин у (1.18) і знаходимо потужність електричного струму:

$$P = \frac{220000}{100} = 2200 \text{ Вт} = 2,2 \text{ кВт}.$$

Підставивши (1.17) у (1.18), знаходимо вираз для розрахунку потужності:

$$P = R \cdot I^2. \quad (1.19)$$

Приклад 1.11

У провіднику, опір якого дорівнює, за **20 Ом** проходить електричний струм силою **5 А**. Визначити потужність електричного струму.

Розв'язок.

Підставляємо вказані значення фізичних величин у (1.19) і знаходимо потужність електричного струму:

$$P = 20 \cdot 5^2 = 500 \text{ Вт} = 0,5 \text{ кВт}.$$

Виразивши опір з (1.16) і підставивши його у (1.19), знаходимо інший вираз для розрахунку потужності:

$$P = U \cdot I. \quad (1.20)$$

Приклад 1.12

У провіднику під дією напруги **200 В** проходить електричний струм силою **15 А**. Визначити потужність електричного струму.

Розв'язок.

Підставляємо вказані значення фізичних величин у (1.20) і знаходимо потужність електричного струму:

$$P = 200 \cdot 15 = 3000 \text{ Вт} = 3 \text{ кВт}.$$

Запитання для самоконтролю

1. У чому суть явища теплової дії струму?
2. Сформулюйте закон теплової дії струму.
3. Виконайте математичний запис закону Джоуля – Ленца.
4. Вкажіть одиниці фізичних величин, що характеризують явище теплової дії струму.
5. Що є одиницею електричної енергії у технічній системі?
6. Дайте визначення потужності електричного струму.
7. Запишіть визначальну формулу потужності електричного струму.
8. Отримайте одиницю потужності електричного струму з її визначальної формули.
9. Наведіть вирази для розрахунку потужності електричного струму.

Завдання для самоконтролю

1. По провіднику, який має опір **200 Ом**, проходить струм силою **10 А** протягом **1 хвилини**. Визначити енергію, яка виділяється в провіднику.
2. Визначити потужність електричного струму в завданні 1.
3. У провіднику, опір якого дорівнює, за **40 Ом** проходить електричний струм силою **10 А**. Визначити потужність електричного струму.
4. У провіднику під дією напруги **150 В** проходить електричний струм силою **8 А**. Визначити потужність електричного струму.

1.5 Електричне коло і його елементи

Електричний коло – це сукупність пристроїв (елементів кола), що забезпечують можливість створення електричного струму. Розрізняють основні елементи електричного кола, які безпосередньо створюють електричний струм, і допоміжні елементи електричного кола, які допомагають основним елементам створювати електричний струм.

Основні елементи електричного кола – це джерело, приймач (навантаження, споживач) і проводи, що їх з'єднують.

Джерело електричної енергії – це пристрій, у якому енергія хімічна, теплова, промениста або механічна перетворюється в електричну енергію (тобто в роботу з перенесення вільних зарядів проти сил електричного поля). В залежності від виду перетворюваної енергії розрізняють наступні типи джерел: механічні генератори (перетворюють механічну енергію в електричну), акумулятори, гальванічні елементи, паливні елементи (перетворюють хімічну енергію в електричну), термоелементи (перетворюють теплову енергію в електричну), фотоелементи (перетворюють енергію сонячного випромінювання в електричну), п'єзоелементи (перетворюють енергію тиску в електричну).

Приймач електричної енергії (навантаження, споживач) – це пристрій, у якому електрична енергія перетворюється в інший вид. В залежності від виду перетворюваної енергії розрізняють наступні типи приймачів (навантажень, споживачів): електродвигуни (перетворюють електричну енергію в механічну), електронагрівальні пристрої (перетворюють електричну енергію в теплову), електроосвітлювальні пристрої (перетворюють електричну енергію в енергію випромінювання), тощо.

Допоміжні елементи кола – вимикачі, рубильники (замикають або розмикають електричне коло), амперметри, вольтметри (контролюють параметри роботи електричного кола) і т.д.

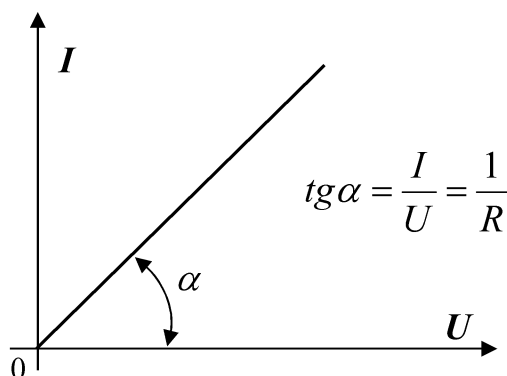


Рис.1.13

Залежність між силою струму і напругою на елементі електричного кола називається **вольт-амперною характеристикою**: $I = f(U)$. Математично вона записується, виходячи з закону Ома (1.16): $I = U / R$. Представимо цю залежність графічно (рис.1.13).

Елементи, у яких вольт-амперна характеристика є прямою лінією, називаються **лінійними**. Електричні кола, які складаються з лінійних елементів, називаються **лінійними колами**.

Електричні кола, у яких основні елементи з'єднані послідовно, називаються **нерозгалуженими**.

Приклад 1.13

Лінійний резистор має опір **10 Ом**. Побудувати вольт-амперну характеристику зазначеного елемента.

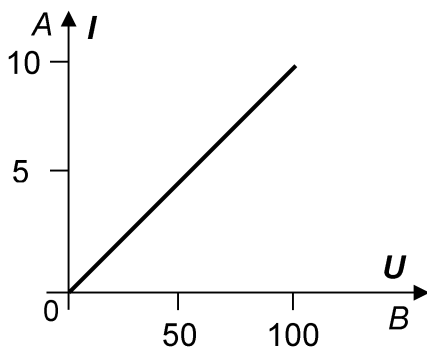


Рис.1.14

Розв'язок.

Розрахунок вольт-амперної характеристики ведемо за виразом (1.16) для двох точок: якщо $U = 0$, то $I = 0$ (перша точка) і якщо $U = 100 \text{ В}$, то $I = 10 \text{ А}$ (друга точка).

За розрахунковими даними двох точок будемо вольт-амперну характеристику у вигляді прямої лінії, яка проходить через ці точки (рис.1.14).

Запитання для самоконтролю

1. Дайте визначення електричного кола.
2. Яке в цілому призначення основних елементів електричного кола?
3. Перелічте основні елементи електричного кола.
4. Який пристрій називають джерелом електричної енергії?
5. Які існують види джерел електричної енергії, які енергії вони перетворюють?
6. Який пристрій називають приймачем електричної енергії (навантаженням, споживачем)?
7. Які існують види приймачів електричної енергії (навантажень, споживачів), які енергії вони перетворюють?
8. Яке в цілому призначення допоміжних елементів електричного кола?
9. Наведіть приклади допоміжних елементів електричного кола, вказавши їх призначення.
10. Що таке вольт-амперна характеристика елемента електричного кола?
11. Які елементи електричного кола називаються лінійними?
12. Що таке лінійне електричне коло?
13. Яке електричне коло називається нерозгалуженим?

Запитання для самоконтролю

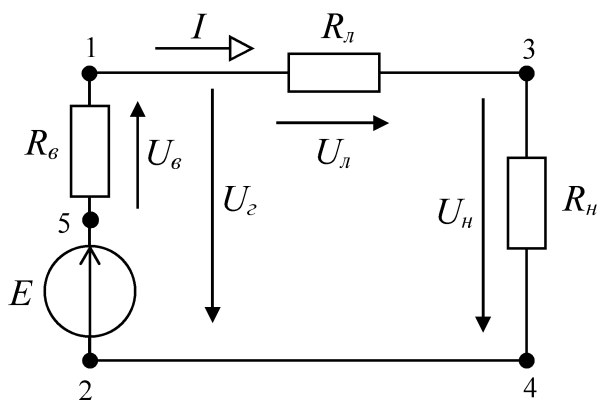
1. Лінійний резистор має опір **50 Ом**. Побудувати вольт-амперну характеристику зазначеного елемента.

1.6 Зображення електричного кола

Для зручності зображення електричного кола застосовується **принципова електрична схема кола** – графічне і літерне позначення окремих елементів кола, з'єднаних між собою. На цій схемі за допомогою умовних графічних і літерних позначень (що вказані у відповідному стандарті) зображують окремі елементи електричного кола, які поєднують між собою за допомогою з'єднуючих ліній (проводів). Як приклад розглянемо електричне коло, яке складається з генератора постійного струму, з'єднувальних

- якщо е.р.с. спрямована у бік точки, то потенціал цієї точки збільшується на величину цієї е.р.с. по відношенню до точки, від якої спрямована е.р.с. (і навпаки);
- при переході через опір за напрямом струму потенціал наступної точки зменшується на величину спадання напруги, тому що заряди в результаті зіткнення з молекулами (атомами) на цій ділянці віддають їм частину своєї потенціальної енергії, яка виділяється у вигляді тепла;
- електричний струм спрямований від точки з більшим потенціалом до точки з меншим потенціалом.

Враховуючи викладене вище, розрахункова схема електричного кола, приведеного на рис.1.15, має вигляд, показаний на рис.1.16.



- U_2 – напруга на затискачах генератора;
- U_6 – спадання напруги на внутрішньому опорі генератора;
- U_l – спадання напруги в лінії електропередачі;
- U_n – напруга на затискачах навантаження.

Рисунок 1.16 – Розрахункова схема електричного кола

Запитання для самоконтролю

1. Дайте визначення розрахункової схеми електричного кола.
2. Як на розрахунковій схемі враховують явище електромагнітної індукції?
3. Як на розрахунковій схемі враховують явище електричного струму?
4. Як на розрахунковій схемі враховують явище теплової дії електричного струму?
5. Як на розрахунковій схемі позначають напругу (спадання напруги) на елементі кола?
6. Що враховують при встановленні потенціалів точок розрахункової схеми електричного кола?
7. Складіть розрахункову схему кола, яке складається з генератора постійного струму, електронагрівального пристрою, вимикача і амперметра.

1.8 Розрахунок нерозгалуженого електричного кола

Розрахунок електричного кола виконують у такій послідовності:

- 1) встановлюють значення параметрів електричного кола (е.р.с. та усіх опорів);
- 2) розраховують силу електричного струму у колі;

- 3) розраховують напруги і спадання напруг на ділянках електричного кола;
- 4) розраховують потужності елементів електричного кола і складають баланс потужностей;
- 5) розраховують коефіцієнти корисної дії пристроїв, які увімкнені у коло;
- 6) розраховують енергії, які споживають елементи електричного кола.

Розглянемо застосування зазначеної послідовності розрахунку на прикладі електричного кола, приведеного на рис.1.16.

1. Значення параметрів електричного кола (е.р.с. та усіх опорів) встановлюють за допомогою відповідних експериментів або даних виготовлювача електрообладнання.

2. Силу електричного струму в колі розраховують, використовуючи **закон Ома для замкненого кола з однією е.р.с.**, який формулюється так: **сила струму в колі прямо пропорційна значенню е.р.с. і обернено пропорційна сумарному опору кола.** Математичний запис цього закону:

$$I = \frac{E}{\sum R}, \quad (1.21)$$

де E – е.р.с., що діє в колі, B ;
 $\sum R$ – сумарний опір кола, Om .

Для електричного кола, що розглядається, рівняння (1.21) буде мати вигляд:

$$I = \frac{E}{R_g + R_d + R_n}. \quad (1.22)$$

3. Розрахунок напруг починають з джерела. Для складання виразу для розрахунку напруги на затискачах генератора виразимо потенціал точки 1 електричного кола через потенціал точки 2:

$$\varphi_1 = \varphi_2 + E - R_g \cdot I. \quad (1.23)$$

Звідси можемо записати:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = E - R_g \cdot I. \quad (1.24)$$

Враховуючи те, що різниця потенціалів між точками 1 і 2 електричного кола є напругою на затискачах генератора, отримуємо:

$$U_g = E - R_g \cdot I. \quad (1.25)$$

Вираз (1.25) є рівнянням **зовнішньої характеристики генератора** – залежності напруги на затискачах генератора від сили струму у колі.

Напруги (спадання напруг) на інших ділянках кола розраховують на підставі закону Ома для окремого провідника (1.16), який ще називають законом Ома для ділянки кола без е.р.с.

Спадання напруги на внутрішньому опорі генератора:

$$U_g = R_g \cdot I . \quad (1.26)$$

Спадання напруги в лінії електропередачі:

$$U_l = R_l \cdot I . \quad (1.27)$$

Напруга на затискачах навантаження:

$$U_n = R_n \cdot I . \quad (1.28)$$

4. Потужності елементів електричного кола розраховують на підставі (1.19) і (1.20).

Потужність, що розвиває генератор:

$$P = E \cdot I . \quad (1.29)$$

Потужність, що втрачається в генераторі:

$$P_g = R_g \cdot I^2 \quad \text{або} \quad P_g = U_g \cdot I . \quad (1.30)$$

Потужність, що віддається генератором:

$$P_z = U_z \cdot I . \quad (1.31)$$

Потужність, що втрачається в лінії електропередачі:

$$P_l = R_l \cdot I^2 \quad \text{або} \quad P_l = U_l \cdot I . \quad (1.32)$$

Потужність, що споживає навантаження:

$$P_n = R_n \cdot I^2 \quad \text{або} \quad P_n = U_n \cdot I . \quad (1.33)$$

Після розрахунку потужностей складають **баланс потужностей електричного кола** – рівняння витрати потужності, яку розвиває джерело. В нашому випадку потужність, що розвиває генератор (P), втрачається в самому генераторі у вигляді тепла (P_g), втрачається в лінії електропередачі

у вигляді тепла (P_l) і споживається навантаженням (P_n). Тобто рівняння балансу потужностей матиме вигляд:

$$P = P_g + P_l + P_n. \quad (1.34)$$

5. Коефіцієнти корисної дії пристроїв, які увімкнені у коло, розраховують так:

$$\eta_z = \frac{P_z}{P}; \quad (1.35)$$

$$\eta_l = \frac{P_n}{P_z}; \quad (1.36)$$

$$\eta_{\text{кола}} = \frac{P_n}{P}, \quad (1.37)$$

де η_z – коефіцієнт корисної дії генератора;
 η_l – коефіцієнт корисної дії лінії електропередачі;
 $\eta_{\text{кола}}$ – коефіцієнт корисної дії електричного кола (всієї установки),
 або з урахуванням (1.29), (1.31), (1.33) так:

$$\eta_z = \frac{U_z}{E}; \quad (1.38)$$

$$\eta_l = \frac{U_n}{U_z}; \quad (1.39)$$

$$\eta_{\text{кола}} = \frac{U_n}{E}. \quad (1.40)$$

6. Кількість електричної енергії, яку розвивають або споживають елементи електричного кола, або яка втрачається в елементах електричного кола, розраховують на підставі (1.18). Наприклад, кількість спожитої навантаженням електричної енергії розраховують так:

$$W_n = P_n \cdot t, \quad (1.41)$$

де W_n – кількість електричної енергії,
 спожитої навантаженням, $\text{кВт} \cdot \text{год}$;
 P_n – потужність, яку споживає навантаження, кВт ;
 t – час роботи навантаження, год .

Приклад 1.14

Для розрахункової схеми, приведеної на рис.1.16, відомо:

$$E = 250 \text{ В}, \quad t = 1\ 000 \text{ год.}, \quad \zeta_E = 1,5 \text{ грн./}(кВт\cdot\text{год.});$$
$$R_e = 2 \text{ Ом}, \quad R_l = 6 \text{ Ом}, \quad R_H = 17 \text{ Ом}.$$

Виконати розрахунок електричного кола: визначити силу струму у колі, напруги та спадання напруг на ділянках кола, потужності та втрати потужності на ділянках кола, коефіцієнти корисної дії елементів кола, кількість та вартість спожитої навантаженням електроенергії.

Розв'язок.

1. Сила електричного струму в колі визначається за (1.22):

$$I = \frac{250}{2 + 6 + 17} = 10 \text{ А}.$$

2. Напруга на затискачах генератора визначається за (1.25):

$$U_e = 250 - 2 \cdot 10 = 230 \text{ В}.$$

3. Спадання напруги на внутрішньому опорі генератора визначається за (1.26):

$$U_e = 2 \cdot 10 = 20 \text{ В}.$$

4. Спадання напруги в лінії електропередачі визначається за (1.27):

$$U_l = 6 \cdot 10 = 60 \text{ В}.$$

5. Напруга на затискачах навантаження визначається за (1.28):

$$U_H = 17 \cdot 10 = 170 \text{ В}.$$

6. Потужність, яку розвиває джерело, визначається за (1.29):

$$P = 250 \cdot 10 = 2500 \text{ Вт} = 2,5 \text{ кВт}.$$

7. Потужність, яка втрачається в джерелі, визначається за (1.30):

$$P_B = 2 \cdot 10^2 = 20 \cdot 10 = 200 \text{ Вт}.$$

8. Потужність, яка віддається джерелом, визначається за (1.31):

$$P_e = 230 \cdot 10 = 2300 \text{ Вт} = 2,3 \text{ кВт}.$$

9. Потужність, яка втрачається в лінії електропередачі, визначається за (1.32):

$$P_l = 6 \cdot 10^2 = 60 \cdot 10 = 600 \text{ Вт}.$$

16. Потужність, яка споживається навантаженням, визначається за (1.33):

$$P_H = 17 \cdot 10^2 = 170 \cdot 10 = 1700 \text{ Вт} = 1,7 \text{ кВт}.$$

18. Складаємо баланс потужностей:

$$P = P_B + P_L + P_H;$$

$$2500 = 200 + 600 + 1700.$$

19. К.к.д. генератора (джерела) визначається за (1.35) або (1.38):

$$\eta_r = \frac{2300}{2500} = \frac{230}{250} = 0,92.$$

20. К.к.д. лінії електропередачі визначається за (1.36) або (1.39):

$$\eta_l = \frac{1700}{2300} = \frac{170}{230} \approx 0,74.$$

21. К.к.д. електричного кола (всієї електроустановки) визначається за (1.37) або (1.40):

$$\eta_{\text{кола}} = \frac{1700}{2500} = \frac{170}{250} = 0,68.$$

$$\text{або } \eta_{\text{кола}} = \eta_l \cdot \eta_e = 0,74 \cdot 0,92 = 0,68.$$

22. Кількість електроенергії, яку споживе навантаження за 1000 год., визначається за (1.41):

$$W_H = 1,7 \cdot 1000 = 1700 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

23. Вартість електричної енергії, яку споживе навантаження за 1000 год.:

$$C_H = W_H \cdot c_E = 1700 \cdot 1,5 = 2550 \text{ грн}.$$

Запитання для самоконтролю

1. Наведіть послідовність розрахунку електричного кола.
2. Як визначаються вихідні дані для розрахунку електричного кола?
3. Сформулюйте і математично запишіть закон Ома для ділянки кола без е.р.с.
4. Сформулюйте і математично запишіть закон Ома для замкненого кола з однією е.р.с.
5. Як розрахувати потенціали точок розрахункової схеми електричного кола?
6. Як розрахувати напругу на затискачах джерела?
7. Що таке зовнішня характеристика джерела?
8. Як розрахувати спадання напруги в джерелі?
9. Як розрахувати спадання напруги в лінії електропередачі?

10. Як розрахувати напругу на навантаженні?
11. Як розрахувати потужність, яку розвиває джерело?
12. Як розрахувати втрати потужності в джерелі?
13. Як розрахувати потужність, що віддає джерело?
14. Як розрахувати втрати потужності в лінії електропередачі?
15. Як розрахувати потужність навантаження?
16. Що таке баланс потужностей? Як його скласти?
17. Як розрахувати к.к.д. джерела?
18. Як розрахувати к.к.д. лінії електропередачі?
19. Як розрахувати к.к.д. електроустановки?
20. Як розрахувати кількість електроенергії, яку споживає навантаження?
21. Як розрахувати вартість електроенергії, яку споживає навантаження?

Завдання для самоконтролю

Для приведеної на рисунку 1.17 розрахункової схеми електричного кола відомо: $E = 200 \text{ В}$; $R_B = 1 \text{ Ом}$; $R_L = 3 \text{ Ом}$; $R_H = 16 \text{ Ом}$; $t = 500 \text{ год.}$; $c_e = 1,5 \text{ грн./}(кВт\cdot\text{год.})$.

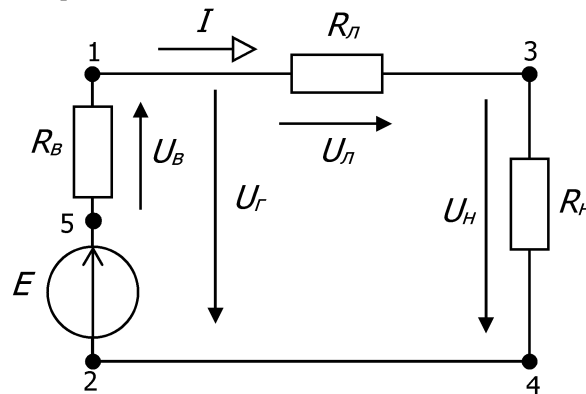


Рис.1.17

1. Визначити силу струму у колі.
2. Визначити напруги та спадання напруг на ділянках кола.
3. Визначити потужності та втрати потужності на ділянках кола.
4. Визначити коефіцієнти корисної дії елементів кола.
5. Визначити кількість та вартість спожитої навантаженням електроенергії.

1.9 Режим роботи електричного кола

Електричне коло може працювати при різних значеннях сили струму у колі, яке згідно закону Ома для замкненого кола (1.21) залежить як від е.р.с., так і від опорів кола. Внаслідок зміни сили струму в колі можуть змінюватись напруги (спадання напруг) на елементах електричного кола та потужності, які розвивають, віддають або споживають елементи кола.

Режим роботи електричного кола, при якому у ньому протікає електричний струм, на силу якого воно було розраховано виготівником, називають **номінальним режимом**. У такому режимі коло може працювати довготривало, а всі параметри кола (сила струму, напруги, потужності, тощо) при його роботі у такому режимі мають номінальні значення.

Якщо в електричному колі джерело працює, але коло розімкнено, то електричний струм у ньому не протікає (сумарний опір кола дорівнює нескінченності). Такий режим роботи електричного кола, при якому джерело працює, а електричний струм не протікає, називають **режимом холостого ходу**. У такому режимі роботи згідно рівняння зовнішньої характеристики джерела (1.25) напруга на його затискачах дорівнює е.р.с., яку розвиває джерело ($U_{z(x)} = E$).

Режим роботи замкненого електричного кола, при якому джерело працює при замкнених між собою затискачах навантаження, називають **режимом короткого замикання навантаження**. У даному випадку опір навантаження дорівнює нулю ($R_n = 0$), внаслідок чого сила струму у колі значно збільшується у порівнянні з номінальним значенням, тому що сила струму згідно закону Ома для замкненого кола (1.21) обмежується тільки внутрішнім опором джерела та опором лінії електропередачі. Цей режим роботи є аварійним.

Режим роботи електричного кола, при якому вивідні затискачі працюючого джерела замкнені між собою, називають **режимом короткого замикання джерела**. У даному випадку струм протікає тільки в джерелі, сила струму згідно закону Ома для замкненого кола (1.21) обмежується тільки внутрішнім опором джерела, а тому у декілька разів перевищує номінальне значення. Потужність, яку розвиває джерело, теж зростає у декілька разів по відношенню до номінального значення. Вона виділяється тільки на внутрішньому опорі джерела, що призводить до значного нагрівання джерела. Цей режим роботи теж є аварійним.

Запитання для самоконтролю

1. Який режим роботи електричного кола називають номінальним? Чим він характеризується?
2. Який режим роботи електричного кола називають холостим ходом? Чим він супроводжується?
3. Який режим роботи електричного кола називають коротким замиканням навантаження? Чим він супроводжується?
4. Який режим роботи електричного кола називають коротким замиканням джерела? Чим він супроводжується?

Тема 2 ЛІНІЙНІ РОЗГАЛУЖЕНІ ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

2.1 Закони Кірхгофа

Розглянемо електричне коло, яке складається з двох паралельно з'єднаних генераторів постійного струму G_1 і G_2 , з'єднувальних проводів і навантаження (електронагрівального пристрою EK). Принципова електрична схема такого кола має вигляд, наведений на рис.2.1.

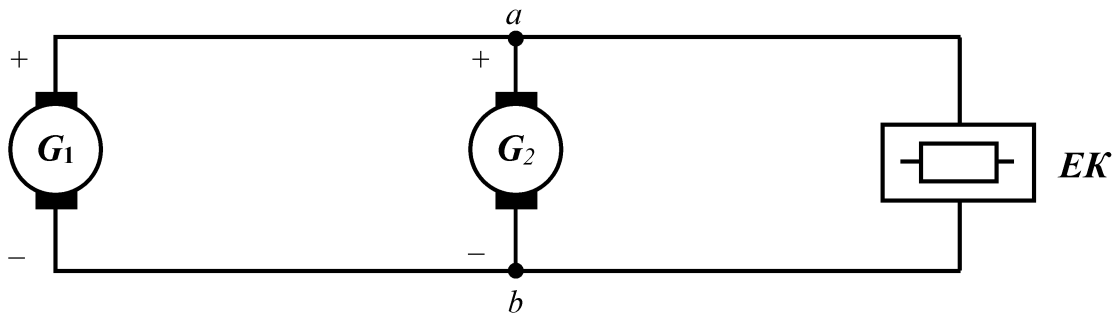


Рисунок 2.1 – Принципова електрична схема кола з паралельно з'єднаними генераторами та електронагрівальним пристроєм

Складемо розрахункову схему кола, показаною на рис.2.1, для чого врахуємо наступне: у генераторах спостерігаються явища електромагнітної індукції, внаслідок якого у них виникають е.р.с. E_1 і E_2 . Під дією цих е.р.с. у генераторах і у навантаженні протікають електричні струми I_1 , I_2 і I_3 . В обмотках генераторів при протіканні електричних струмів спостерігаються їх теплові дії, які врахуємо за допомогою внутрішніх опорів R_1 і R_2 . Тепловою дією струму у з'єднувальних проводах знехтуємо внаслідок її незначущості з причини невеликої протяжності цих проводів. Перетворення електричної енергії у електронагрівальному пристрої (навантаженні) врахуємо за допомогою опору R_3 . Напругу на затискачах пристроїв позначимо U . Тоді розрахункова схема зазначеного електричного кола буде мати вигляд, наведений на рисунку 2.2.

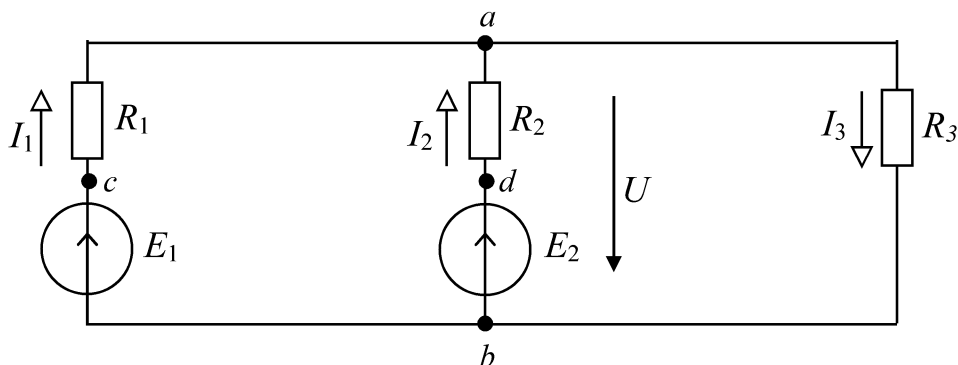


Рисунок 2.2 – Розрахункова схема електричного кола з паралельно з'єднаними генераторами та електронагрівальним пристроєм

На розрахунковій схемі цього кола (рис.2.2) є ділянки, які містять декілька послідовно з'єднаних елементів (E_1 і R_1 ; E_2 і R_2) або один елемент (R_3). На таких ділянках проходить струм однакової сили. Ці ділянки називають вітками. Отже, **вітка** – це ділянка кола, що складається з послідовно з'єднаних елементів, включених між двома вузлами. Точку, у якій сходяться не менш трьох віток, називають **вузлом**. Для схеми на рис.2.2 такими точками є точки a і b . При обході по вітках можна отримати замкнену ділянку кола, яка буде являти собою немов би нерозгалужене коло; таку ділянку кола називають **контуром**.

Електричні кола, які мають у своєму складі вітки, називають **розгалуженими**. Такі кола розраховуються різними методами, в основу яких, окрім законів Ома і Джоуля–Ленца, покладені закони Кірхгофа.

Перший закон Кірхгофа застосовується для вузла електричного кола і встановлює взаємозв'язок між силами струмів, які відносяться до вузла. Формулюється він так: **у вузлі електричного кола алгебраїчна сума сил струмів дорівнює нулю**. Математичний запис цього закону:

$$\sum_{i=1}^{i=n} I_i = 0 . \quad (2.1)$$

Умовно приймають, що сили струмів, які входять у вузол, беруться зі знаком «+», а сили струмів, які виходять з вузла, беруться зі знаком «-».

Другий закон Кірхгофа застосовується для контуру електричного кола і встановлює взаємозв'язок між е.р.с., що діють у контурі, і спаданнями напруг на опорах контуру. Формулюється він так: **у замкненому контурі електричного кола алгебраїчна сума спадань напруг на опорах, що входять у цей контур, дорівнює алгебраїчній сумі е.р.с., що діють у цьому контурі**. Математичний запис цього закону:

$$\sum_{i=1}^{i=n} R_i I_i = \sum_{i=1}^{i=n} E_i . \quad (2.2)$$

Умовно приймають, що е.р.с. та спадання напруг на опорах беруться зі знаком «+», якщо напрями е.р.с. та струми в опорах збігаються з довільно обраним напрямом обходу контуру; якщо не збігаються – зі знаком «-». Закон застосовують для **незалежного контуру**, тобто такого контуру, до якого входить хоча б одне розгалуження, що не відноситься до жодного іншого контуру.

Запитання для самоконтролю

1. Що таке вузол розгалуженого електричного кола?
2. Що таке вітка розгалуженого електричного кола?

3. Що таке контур розгалуженого електричного кола?
4. Приведіть приклад принципової електричної схеми розгалуженого кола.
5. Приведіть розрахункову схему розгалуженого кола з пункту 4.
6. Сформулюйте перший закон Кірхгофа.
7. Запишіть математично перший закон Кірхгофа.
8. Коли сили струмів у рівнянні за першим законом Кірхгофа записують зі знаком «+», а коли зі знаком «-»?
9. Запишіть рівняння за першим законом Кірхгофа для одного з вузлів розрахункової схеми кола з п.5.
10. Сформулюйте другий закон Кірхгофа.
11. Запишіть математично другий закон Кірхгофа.
12. Коли е.р.с. і спадання напруг на опорах у рівнянні за другим законом Кірхгофа записують зі знаком «+», а коли зі знаком «-»?
13. Запишіть рівняння за 2-м законом Кірхгофа для одного з контурів приведеної у пункті 5 розрахункової схеми.

2.2 Застосування законів Кірхгофа для розрахунку розгалужених кіл

При розрахунку розгалужених електричних кіл відомими є параметри кола (е.р.с. та опори), а потрібно визначити сили струмів, напруги, потужності. *За допомогою законів Кірхгофа сили струмів знаходять так:*

- 1) визначають кількість вузлів, віток і незалежних контурів розрахункової схеми електричного кола;
- 2) складають рівняння за першим законом Кірхгофа (кількість рівнянь повинна бути на одне менше, ніж вузлів у схемі);
- 3) довільно обирають напрями обходів незалежних контурів схеми кола;
- 4) складають рівняння за другим законом Кірхгофа (кількість рівнянь повинна дорівнювати кількості незалежних контурів);
- 5) записують складені рівняння у вигляді системи рівнянь з коефіцієнтами при невідомих (підставляють значення е.р.с. та опорів);
- 6) розв'язують отриману систему рівнянь і знаходять сили струмів;
- 7) перевіряють отримані значення сил струмів (шляхом підстановки у систему рівнянь).

Після знаходження сил струмів визначають напруги і потужності, застосовуючи закони Ома та Джоуля–Ленца.

Розглянемо розрахунок сил струмів кола, наведеного на рис.2.2, за законами Кірхгофа:

- коло має два вузли, три вітки і два незалежних контури;
- складаємо одне рівняння за першим законом Кірхгофа для цього кола (наприклад, для вузла *b*):

$$-I_1 - I_2 + I_3 = 0; \quad (2.3)$$

- обираємо напрями обходів незалежних контурів проти годинникової стрілки;
- складаємо рівняння за другим законом Кірхгофа для двох незалежних контурів $a-d-b-c-a$ і $a-d-b-a$:

$$-E_1 + E_2 = -R_1 I_1 + R_2 I_2; \quad (2.4)$$

$$-E_2 = -R_2 I_2 - R_3 I_3; \quad (2.5)$$

- записуємо складені рівняння у вигляді системи рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} -I_1 - I_2 + I_3 &= 0; \\ -R_1 I_1 + R_2 I_2 &= -E_1 + E_2; \\ -R_2 I_2 - R_3 I_3 &= -E_2. \end{aligned} \right\} \quad (2.6)$$

В отриману систему рівнянь (2.6) підставляють значення опорів і е.р.с. та розв'язують, визначаючи сили струмів. Вірність знайдених значень сил струмів перевіряють шляхом підстановки у дану систему рівнянь.

Якщо в результаті розрахунку сила струму отримана з від'ємним знаком, а перевірка показала вірність розрахунку, то це означає, що на розрахунковій схемі напрям струму вибраний не вірно. Тому в цьому випадку необхідно змінити напрям струму на розрахунковій схемі на протилежний, а розрахунок не повторювати.

Значення інших величин (напруги, потужностей, тощо) визначають так само, як і при розрахунку нерозгалужених кіл.

Запитання для самоконтролю

1. Наведіть послідовність розрахунку сил струмів розгалуженого електричного кола за допомогою законів Кірхгофа.
2. Скільки незалежних рівнянь за 1-м законом Кірхгофа потрібно записати для розрахункової схеми розгалуженого електричного кола?
3. Скільки незалежних рівнянь за 2-м законом Кірхгофа потрібно записати для розрахункової схеми розгалуженого електричного кола?
4. Зобразіть розрахункову схему розгалуженого кола та складіть необхідну кількість рівнянь за законами Кірхгофа для розрахунку сил струмів у цьому колі .

2.3 Еквівалентні перетворення схем з'єднань опорів

Розглянемо розрахункову схему кола з *послідовним* з'єднанням опорів (рис.2.3).

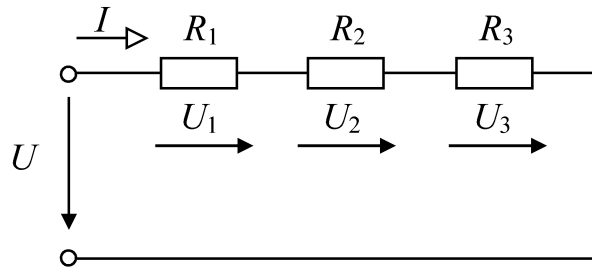


Рисунок 2.3 – Розрахункова схема електричного кола з послідовним з'єднанням опорів

Складемо для цієї схеми (рис.2.3) рівняння за другим законом Кірхгофа:

$$U = U_1 + U_2 + U_3. \quad (2.8)$$

Перепишемо рівняння (2.8), використовуючи закон Ома для ділянки кола без е.р.с. (1.9). Тоді отримаємо:

$$U = R_1 \cdot I + R_2 \cdot I + R_3 \cdot I, \quad (2.9)$$

або

$$U = (R_1 + R_2 + R_3) \cdot I. \quad (2.10)$$

В іншому вигляді (2.10) можна записати так:

$$U = R_e \cdot I, \quad (2.11)$$

де R_e – еквівалентний опір електричного кола, Ом;

$$R_e = R_1 + R_2 + R_3. \quad (2.12)$$

Таким чином, у загальному випадку **еквівалентний опір послідовно з'єднаних елементів дорівнює сумі опорів цих елементів**, тобто

$$R_e = \sum_{i=1}^{i=n} R_i. \quad (2.13)$$

Приклад 2.1

Для розрахункової схеми, наведеної на рис.2.3, відомо: $R_1 = 8 \text{ Ом}$; $R_2 = 12 \text{ Ом}$; $R_3 = 20 \text{ Ом}$.

Визначити еквівалентний опір електричного кола.

Розв'язок.

Визначаємо еквівалентний опір електричного кола:

$$R_e = R_1 + R_2 + R_3; \quad R_e = 8 + 12 + 20 = 40 \text{ Ом}.$$

Розглянемо розрахункову схему кола з **паралельним** з'єднанням опорів (рис.2.4).

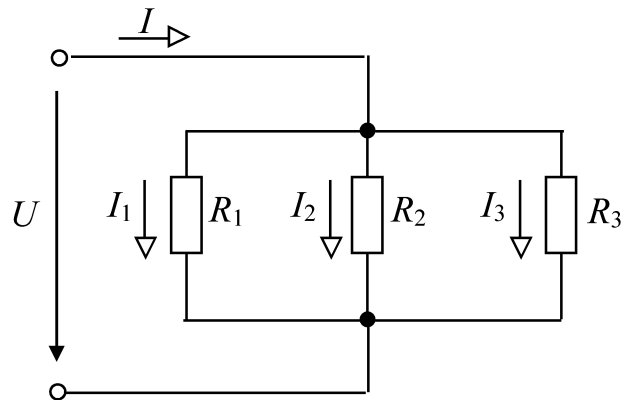


Рисунок 2.4 – Розрахункова схема електричного кола з паралельним з'єднанням опорів

Складемо для цієї схеми (рис.2.4) рівняння за першим законом Кірхгофа:

$$I = I_1 + I_2 + I_3. \quad (2.14)$$

Перепишемо рівняння (2.14), використовуючи закон Ома для ділянки кола без е.р.с.:

$$I = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3}. \quad (2.15)$$

Сила струму у кожній вітці обернено пропорційна опору. Фізична величина, обернено пропорційна опору, називається **провідністю**:

$$g_1 = \frac{1}{R_1}; \quad g_2 = \frac{1}{R_2}; \quad g_3 = \frac{1}{R_3}. \quad (2.16)$$

де g_1, g_2, g_3 – провідності, См.

Перепишемо рівняння (2.15), використовуючи (2.16):

$$I = g_1 \cdot U + g_2 \cdot U + g_3 \cdot U, \quad (2.17)$$

або

$$I = (g_1 + g_2 + g_3) \cdot U, \quad (2.18)$$

В іншому вигляді (2.18) можна записати так:

$$I = g_e \cdot U, \quad (2.19)$$

де g_e – еквівалентна провідність електричного кола, См;

$$g_e = g_1 + g_2 + g_3. \quad (2.20)$$

Таким чином, у загальному випадку *еквівалентна провідність паралельно з'єднаних елементів дорівнює сумі провідностей цих елементів*, тобто

$$g_e = \sum_{i=1}^{i=n} g_i. \quad (2.21)$$

У свою чергу, еквівалентний опір паралельно з'єднаних елементів розраховується так:

$$R_e = \frac{1}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{R_i}}. \quad (2.22)$$

Приклад 2.2

Для розрахункової схеми, наведеної на рис.2.4, відомо: $R_1 = 4 \text{ Ом}$; $R_2 = 8 \text{ Ом}$; $R_3 = 12 \text{ Ом}$.

Визначити еквівалентний опір електричного кола.

Розв'язок.

Визначаємо еквівалентний опір електричного кола:

$$R_e = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}; \quad R_e = \frac{1}{\frac{1}{4} + \frac{1}{6} + \frac{1}{12}} = \frac{1}{\frac{12+2+1}{12}} = \frac{1}{\frac{15}{12}} = \frac{12}{15} = 0,8 \text{ Ом}.$$

Розглянемо на прикладі, як виконують еквівалентні перетворення розгалужених кіл. Як приклад візьмемо електричне коло, що складається з генератора постійного струму G , до затискачів якого за допомогою лінії електропередачі приєднані такі навантаження: наприкінці першої ділянки лінії включений електронагрівальний пристрій EK , а наприкінці другої ділянки – два електроосвітлювальні пристрої EL_1 і EL_2 . Принципова електрична схема цього кола показана на рис.2.5.

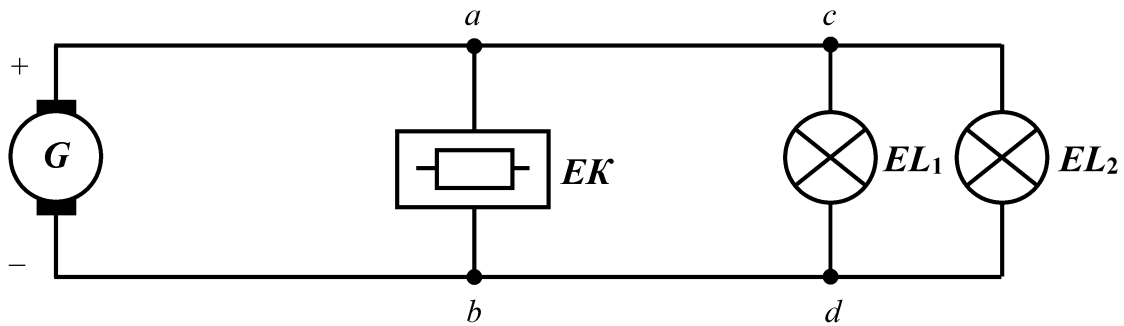


Рисунок 2.5 – Принципова електрична схема кола з генератором та електронагрівальним і електроосвітлювальними пристроями

Складемо розрахункову схему кола, показаного на рис.2.5, для чого врахуємо наступне: у генераторі спостерігається явище електромагнітної індукції, внаслідок якого у ньому виникає е.р.с. E . Під дією цієї е.р.с. у генераторі та на першій ділянці лінії протікає струм I_1 , у електронагрівальному пристрої протікає струм I_2 , на другій ділянці лінії протікає струм I_3 , у електроосвітлювальних пристроях протікають струми I_4 і I_5 . В обмотці генератора при протіканні електричного струму спостерігається його теплова дія, яку врахуємо за допомогою внутрішнього опору R_6 . Теплову дію струму на першій ділянці лінії врахуємо за допомогою опору R_1 . Перетворення електричної енергії у електронагрівальному пристрої врахуємо за допомогою опору R_2 . Теплову дію струму на другій ділянці лінії врахуємо за допомогою опору R_3 . Перетворення електричної енергії у теплову і світлового випромінювання у електроосвітлювальних пристроях врахуємо за допомогою опорів R_4 і R_5 . Тоді розрахункова схема зазначеного електричного кола буде мати вигляд, наведений на рис.2.6.

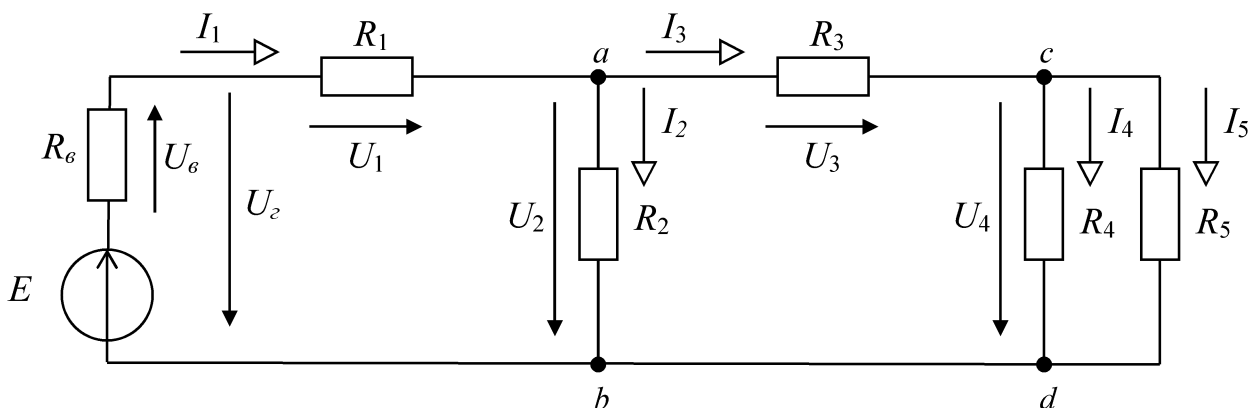


Рисунок 2.6 – Розрахункова схема електричного кола з генератором та електронагрівальним і електроосвітлювальними пристроями

На розрахунковій схемі (рис.2.6) також позначено: U_2 – напруга на затискачах генератора; U_6 – спадання напруги на внутрішньому опорі генератора; U_1 – спадання напруги на першій ділянці лінії електропередачі; U_2 – напруга на затискачах електронагрівального пристрою; U_3 – спадання

напруги на другій ділянці лінії електропередачі; U_4 – напруга на затискачах електроосвітлювальних пристроїв.

Нехай для цієї схеми відомі значення параметрів (е.р.с. і усіх опорів): $E = 450 \text{ В}$, $R_6 = 1 \text{ Ом}$, $R_1 = 4 \text{ Ом}$, $R_2 = 30 \text{ Ом}$, $R_3 = 3 \text{ Ом}$, $R_4 = 20 \text{ Ом}$, $R_5 = 30 \text{ Ом}$. Необхідно розрахувати значення сил струмів у даному колі за допомогою еквівалентних перетворень.

Умова еквівалентних перетворень: напруги і сили струмів на ділянках, де не виконують еквівалентне перетворення не повинні змінюватись. *Суть еквівалентних перетворень* полягає в тому, що з розгалуженого кола необхідно отримати нерозгалужене або максимально спростити розгалужене коло. Еквівалентні перетворення виконують на ділянках, які містять однотипово з'єднані елементи (паралельно, послідовно, тощо).

В нашому випадку еквівалентне перетворення починаємо виконувати на ділянці з опорами R_4 і R_5 , які з'єднані паралельно. Еквівалентний опір цієї ділянки (R_{45}) визначається на підставі (2.22):

$$R_{45} = \frac{1}{\frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5}}; \quad \text{або} \quad R_{45} = \frac{1}{\frac{1}{R_5 + R_4}}; \quad \text{або} \quad R_{45} = \frac{R_4 \cdot R_5}{R_4 + R_5}; \quad (2.23)$$

$$R_{45} = \frac{20 \cdot 30}{20 + 30} = 12 \text{ Ом.}$$

Це дозволяє отримати еквівалентну розрахункову схему електричного кола після першого перетворення (рис.2.7).

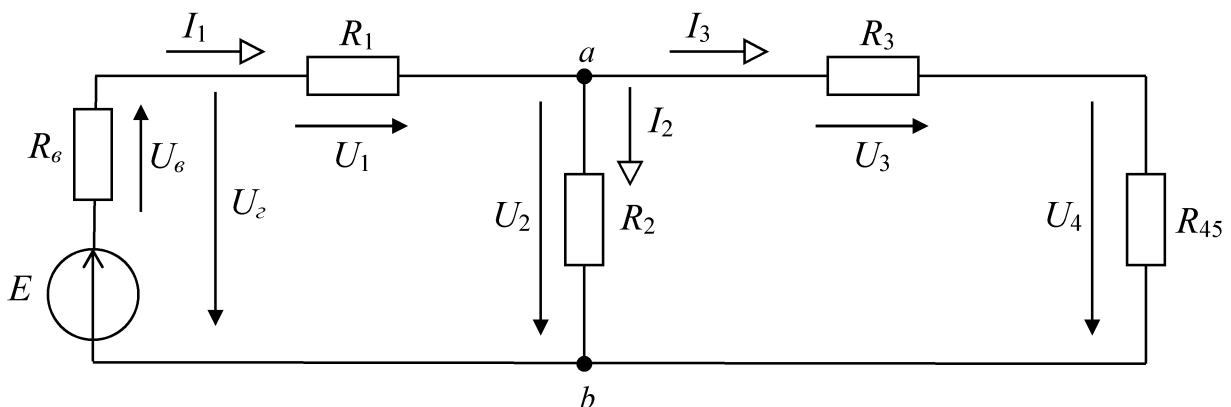


Рисунок 2.7 – Еквівалентна розрахункова схема електричного кола після першого перетворення

Наступною ділянкою, на якій виконуємо еквівалентне перетворення, є ділянка з опорами R_3 і R_{45} , які з'єднані послідовно. Еквівалентний опір цієї ділянки (R_{345}) визначається на підставі (2.13):

$$R_{345} = R_3 + R_{45}; \quad (2.24)$$

$$R_{345} = 3 + 12 = 15 \text{ Ом.}$$

Це дозволяє отримати еквівалентну розрахункову схему електричного кола після другого перетворення (рис.2.8).

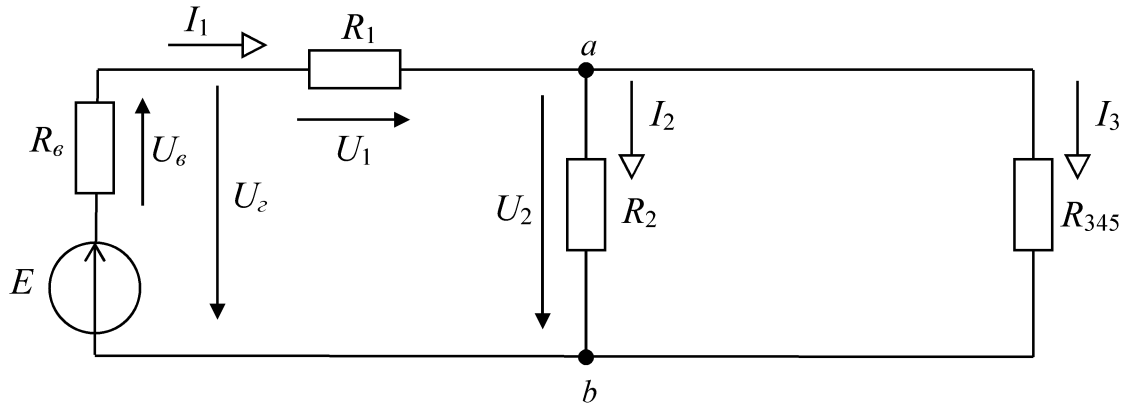


Рисунок 2.8 – Еквівалентна розрахункова схема електричного кола після другого перетворення

В нашому випадку останньою ділянкою, на якій виконуємо еквівалентне перетворення, є ділянка з опорами R_2 і R_{345} , що з'єднані паралельно. Еквівалентний опір цієї ділянки (R_{2345}) визначається на підставі (2.23):

$$R_{2345} = \frac{R_2 \cdot R_{345}}{R_2 + R_{345}}; \quad (2.25)$$

$$R_{2345} = \frac{30 \cdot 15}{30 + 15} = 10 \text{ Ом.}$$

Це дозволяє отримати еквівалентну розрахункову схему електричного кола після третього перетворення (рис.2.9).

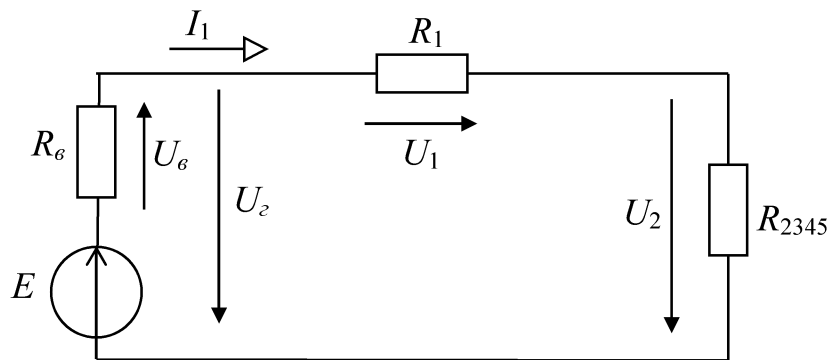


Рисунок 2.9 – Еквівалентна розрахункова схема електричного кола після третього перетворення

Ця схема (рис.2.9) дозволяє визначити силу струму у загальній частині кола, використовуючи закон Ома для замкненого кола з однією е.р.с. (1.14):

$$I_1 = \frac{E}{R_e + R_1 + R_{2345}}; \quad (2.26)$$

$$I_1 = \frac{450}{1 + 4 + 10} = 30 \text{ A}.$$

Для визначення сили струму в електронагрівальному пристрої необхідно знайти значення напруги на затискачах цього пристрою, використовуючи розрахункову схему на рис.2.9 і закон Ома для ділянки кола без е.р.с. (1.9):

$$U_2 = R_{2345} \cdot I_1; \quad (2.27)$$

$$U_2 = 10 \cdot 30 = 300 \text{ B}.$$

За знайденим значенням напруги на затискачах електронагрівального пристрою і розрахунковою схемою на рис.2.8 визначають силу струму у цьому пристрої на підставі закону Ома для ділянки кола без е.р.с. (1.9):

$$I_2 = \frac{U_2}{R_2}; \quad (2.28)$$

$$I_2 = \frac{300}{30} = 10 \text{ A}.$$

Силу струму на другій ділянці лінії електропередачі визначають за розрахунковою схемою на рис.2.8 на підставі закону Ома для ділянки кола без е.р.с. (1.9):

$$I_3 = \frac{U_2}{R_{345}}; \quad (2.29)$$

$$I_3 = \frac{300}{15} = 20 \text{ A}.$$

Для визначення сил струмів в електроосвітлювальних пристроях необхідно знайти значення напруги на затискачах цих пристроїв, використовуючи розрахункову схему на рис.2.7 і закон Ома для ділянки кола без е.р.с. (1.9):

$$U_4 = R_{45} \cdot I_3; \quad (2.30)$$

$$U_4 = 12 \cdot 20 = 240 \text{ В.}$$

За знайденим значенням напруги на затискачах електроосвітлювальних пристроїв і розрахунковою схемою на рис.2.6 визначають сили струмів у цих пристроях на підставі закону Ома для ділянки кола без е.р.с. (1.9):

$$I_4 = \frac{U_4}{R_4}; \quad (2.31)$$

$$I_4 = \frac{240}{20} = 12 \text{ А};$$

$$I_5 = \frac{U_4}{R_5}; \quad (2.32)$$

$$I_5 = \frac{240}{30} = 8 \text{ А.}$$

Далі потрібно зробити перевірку знайдених значень сил струмів за законами Кірхгофа, застосовуючи розрахункову схему електричного кола, наведену на рис.2.6.

Перевіряємо розрахунок сил струмів за першим законом Кірхгофа, складаючи рівняння для вузлів «а» і «с»:

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0; \quad (2.33)$$

$$30 - 10 - 20 = 0.$$

$$I_3 - I_4 - I_5 = 0; \quad (2.34)$$

$$20 - 12 - 8 = 0.$$

Перевіряємо розрахунок сил струмів за другим законом Кірхгофа, складаючи рівняння для контурів кола (напрямок обходу – за годинниковою стрілкою):

$$R_6 I_1 + R_1 I_1 + R_2 I_2 = E; \quad (2.35)$$

$$1 \cdot 30 + 4 \cdot 30 + 30 \cdot 10 = 450.$$

$$-R_2 I_2 + R_3 I_3 + R_4 I_4 = 0; \quad (2.36)$$

$$-30 \cdot 10 + 3 \cdot 20 + 20 \cdot 12 = 0.$$

$$-R_4 I_4 + R_5 I_5 = 0; \quad (2.37)$$

$$-20 \cdot 12 + 30 \cdot 8 = 0.$$

Усі рівняння збігаються, тому значення сил струмів знайдені вірно. Значення інших величин (напруг, потужностей, тощо) розраховуються так само, як і при розрахунку нерозгалужених кіл.

Приклад 2.3

Одна освітлювальна та дві нагрівальних установки одержують живлення від генератора постійного струму за допомогою лінії електропередачі.

Відомо наступне:

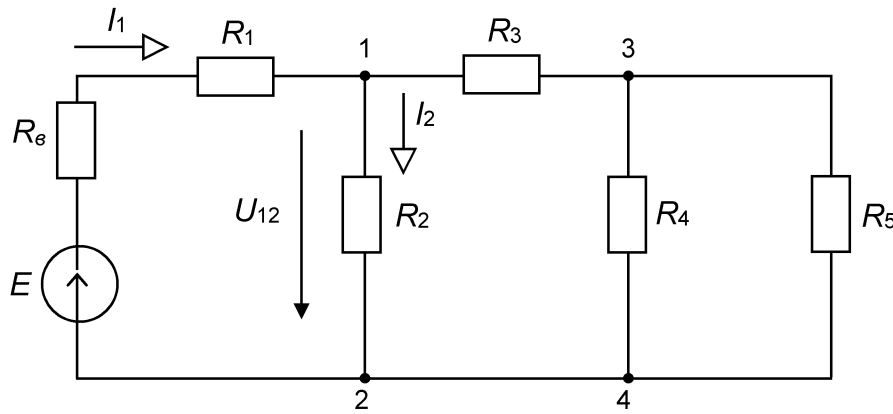
- опір освітлювальної установки дорівнює **8 Ом**;
- опори нагрівальних установок відповідно дорівнюють **3 Ом** і **4 Ом**;
- опір лінії електропередачі на ділянці між генератором і освітлювальною установкою дорівнює **5 Ом**;
- опір лінії електропередачі на ділянці між освітлювальною установкою і нагрівальною установкою дорівнює **6 Ом**;
- електрорушійна сила, яку розвиває генератор, дорівнює **300 В**;
- внутрішній опір генератора дорівнює **1 Ом**.

Скласти розрахункову схему кола та визначити наступне:

- силу струму, який віддається генератором;
- напругу на освітлювальній установці;
- силу струму, який протікає у освітлювальній установці;
- потужність, яку споживає освітлювальна установка.

Розв'язок.

1. Складаємо розрахункову схему електричного кола, увівши наступні позначення: $R_в$ – внутрішній опір генератора, R_1 – опір лінії електропередачі на ділянці між генератором і освітлювальною установкою, R_2 – опір освітлювальної установки, R_3 – опір лінії електропередачі на ділянці між освітлювальною і нагрівальною установками, R_4 і R_5 – опори нагрівальних установок (рис.2.10).



Дано:

$$\begin{aligned}
 E &= 300 \text{ В}; \\
 R_6 &= 1 \text{ Ом}; \\
 R_1 &= 5 \text{ Ом}; \\
 R_2 &= 8 \text{ Ом}; \\
 R_3 &= 6 \text{ Ом}; \\
 R_4 &= 3 \text{ Ом}; \\
 R_5 &= 6 \text{ Ом}.
 \end{aligned}$$

Рис.2.10

2. Заміняємо два паралельно з'єднаних опори на ділянці 3-4 одним еквівалентним:

$$R_{34} = \frac{R_4 R_5}{R_4 + R_5}; \quad R_{34} = \frac{3 \cdot 6}{3 + 6} = 2 \text{ Ом}.$$

3. Заміняємо опір R_3 і R_{34} одним еквівалентним:

$$R_{345} = R_3 + R_{34}; \quad R_{345} = 6 + 2 = 8 \text{ Ом}.$$

4. Заміняємо опори R_2 і R_{345} одним еквівалентним:

$$R_{2345} = \frac{R_2 R_{345}}{R_2 + R_{345}}; \quad R_{2345} = \frac{8 \cdot 8}{8 + 8} = 4 \text{ Ом}.$$

5. Знаходимо еквівалентний опір усього кола:

$$R_e = R_6 + R_1 + R_{2345}; \quad R_e = 1 + 5 + 4 = 10 \text{ Ом}.$$

6. Знаходимо силу струму в колі (силу струму, який віддається генератором):

$$I_1 = \frac{E}{R_e}; \quad I_1 = \frac{E}{R_e} = \frac{300}{10} = 30 \text{ А}.$$

7. Знаходимо напругу між вузлами 1 і 2 (напругу на освітлювальній установці):

$$U_{12} = E - R_6 I_1 - R_1 I_1; \quad U_{12} = 300 - 1 \cdot 30 - 5 \cdot 30 = 120 \text{ В}.$$

8. Знаходимо силу струму, що протікає між вузлами 1 і 2 (силу струму, який протікає в освітлювальній установці):

$$I_2 = \frac{U_{12}}{R_2}; \quad I_2 = \frac{U_{12}}{R_2} = \frac{120}{8} = 15 \text{ А}.$$

9. Знаходимо потужність, яку споживає освітлювальна установка:

$$P_2 = R_2 I_2^2 = U_{12} I_2;$$

$$P_2 = 8 \cdot 15^2 = 120 \cdot 15 = 1800 \text{ Вт} = 1,8 \text{ кВт}.$$

Запитання для самоконтролю

1. Як розрахувати еквівалентний опір послідовно з'єднаних елементів кола?
2. Дайте визначення провідності елемента кола.
3. Запишіть визначальну формулу провідності елемента кола.
4. Яка одиниця провідності?
5. Як розрахувати еквівалентну провідність паралельно з'єднаних елементів кола?
6. Як розрахувати еквівалентний опір паралельно з'єднаних елементів кола?
7. Наведіть вираз для розрахунку еквівалентного опору двох паралельно з'єднаних елементів кола.
8. Якої умови необхідно дотримуватись при еквівалентному перетворенні електричного кола?
9. У чому суть еквівалентного перетворення розгалуженого електричного кола?
10. З якої ділянки починають виконувати еквівалентні перетворення розгалуженого електричного кола?

Запитання для самоконтролю

1. На ділянці електричного кола послідовно включені опори **4 Ом, 6 Ом, 10 Ом**. Визначити еквівалентний опір ділянки кола.
2. На ділянці електричного кола паралельно включені опори **3 Ом, 6 Ом**. Визначити еквівалентний опір ділянки кола.
3. На ділянці електричного кола паралельно включені опори **4 Ом, 6 Ом, 12 Ом**. Визначити еквівалентний опір ділянки кола.
4. Для розрахункової схеми на рис.2.6 відомо: **$E = 240 \text{ В}$, $R_B = 1 \text{ Ом}$, $R_1 = 5 \text{ Ом}$, $R_2 = 4 \text{ Ом}$, $R_3 = 2 \text{ Ом}$, $R_4 = 3 \text{ Ом}$, $R_5 = 6 \text{ Ом}$** . Визначити сили струмів кола та перевірити їх розрахунок.

Тема 3 МАГНІТНІ КОЛА ПРИ ПОСТІЙНИХ НАМАГНІЧУЮЧИХ СИЛАХ

3.1 Явище і закон електромагнетизму

У природі існує *явище електромагнетизму*, суть якого полягає у тому, що *навколо провідника зі струмом утворюється магнітне поле*. Магнітне поле розглядають як стан середовища, яке оточує провід з електричним струмом.

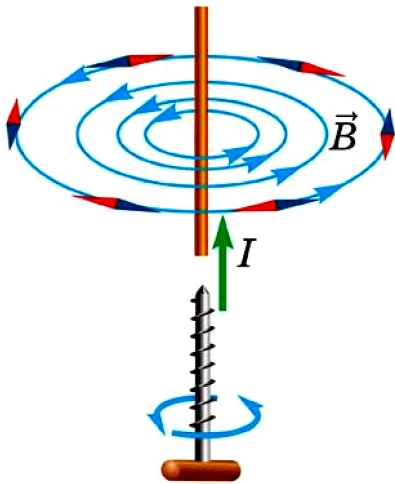


Рис.3.1

Воно створюється завдяки руху заряджених часток: електронів або іонів. Стрілка компасу у різних точках магнітного поля орієнтується уздовж певних ліній, які називають *магнітними силовими лініями*, вказуючи їх напрями – з півночі на південь. Щоб визначити напрями силових ліній магнітного поля навколо прямолінійного провідника з електричним струмом застосовують *правило «правого гвинта»*: якщо угвинчувати правий гвинт за напрямом струму у прямолінійному провіднику, то напрям його обертання вкаже напрям силових ліній магнітного поля (рис.3.1).

Якщо у магнітне поле внести провідник, по якому проходить електричний струм, то з боку магнітного поля буде діяти сила як на кожен вільний електрон цього провідника, так і на провідник в цілому. Для силової характеристики магнітного поля уведена фізична величина – *магнітна індукція*, яка є векторною величиною, напрям якої завжди спрямований по дотичній до силової лінії магнітного поля в напрямку півночі (рис.3.1). Модуль магнітної індукції дорівнює відношенню сили, що діє на провідник зі струмом в магнітному полі, до добутку сили струму в провіднику на ефективну довжину провідника і синус кута між напрямом струму у провіднику і вектором магнітної індукції:

$$B = \frac{F}{I \cdot l \cdot \sin \alpha}, \quad (3.1)$$

- де B – магнітна індукція, $Tл$;
 F – сила, що діє на провідник, $H \cdot м$;
 I – сила струму у провіднику, A ;
 l – ефективна довжина провідника, $м$;
 α – кут між напрямом струму у провіднику і вектором магнітної індукції, *градус*.

$$[B] = \frac{H}{A \cdot m} = \frac{H \cdot m}{A \cdot m^2} = \frac{\text{Дж}}{A \cdot m^2} = \frac{B \cdot A \cdot c}{A \cdot m^2} = \frac{B \cdot c}{m^2} = \text{Тл}.$$

Приклад 3.1

У магнітному полі постійного магніту знаходиться провідник зі струмом. Сила струму в провіднику дорівнює **10 А**. На провідник діє сила **2 Н**. Ефективна довжина провідника дорівнює **100 см**. Провідник знаходиться під кутом **90°** до вектора магнітної індукції.

Визначити магнітну індукцію поля.

Розв'язок.

Підставляємо вказані значення фізичних величин у (3.1) і знаходимо магнітну індукцію поля:

$$B = \frac{2}{10 \cdot 100 \cdot 10^{-2} \cdot 1} = \frac{2}{10} = 0,2 \text{ Тл}.$$

Магнітне поле, у кожній точці якого магнітна індукція однакова за модулем та напрямком, називають **однорідним магнітним полем**. Таке магнітне поле існує, наприклад, між плоскими полюсами магнітів.

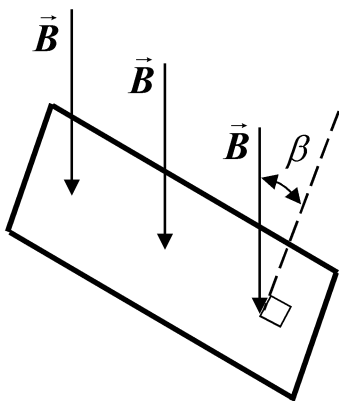


Рис.3.2

Якщо у магнітне поле внести провідний контур (наприклад, провідник, зігнений у вигляді прямокутника), то контур буде пронизувати певна кількість магнітних силових ліній (рис.3.2). Чим більше площа провідного контуру, тим більша кількість магнітних силових ліній буде його пронизувати, і навпаки. Щоб врахувати кількість магнітних силових ліній, які пронизують провідний контур у магнітному полі, ввели фізичну величину – потік магнітної індукції, або **магнітний потік**. Це фізична величина, яка чисельно дорівнює добутку магнітної індукції на площу поверхні провідного контуру та на косинус кута між вектором магнітної індукції й нормаллю до поверхні контуру:

$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos \beta, \quad (3.2)$$

де Φ – магнітний потік, $Вб$;
 B – магнітна індукція, $Тл$;
 S – площа поверхні провідного контуру, $м^2$;
 β – кут між вектором магнітної індукції й нормаллю до поверхні контуру, $градус$.

$$[\Phi] = \text{Тл} \cdot \text{м}^2 = \frac{B \cdot c}{\text{м}^2} \cdot \text{м}^2 = B \cdot c = \text{Вб}.$$

Приклад 3.2

Між плоскими полюсами постійного магніту знаходиться рамка, площа якої дорівнює 200 см^2 . Магнітна індукція поля дорівнює 2 Тл . Кут між вектором магнітної індукції й нормаллю до поверхні рамки дорівнює 60° .

Визначити магнітний потік, що пронизує рамку.

Розв'язок.

Підставляємо вказані значення фізичних величин у (3.2) і знаходимо магнітний потік:

$$\Phi = 2 \cdot 200 \cdot 10^{-4} \cdot 0,5 = 2 \cdot 10^{-2} = 0,02 \text{ Вб}.$$

Провідник зі струмом пронизується певною кількістю силових ліній його власного магнітного поля, тобто певним власним магнітним потоком. Фізична величина, яка є коефіцієнтом взаємозв'язку між силою електричного струму у провіднику і власним магнітним потоком, який пронизує цей провідник, називається *індуктивністю*. Вона дорівнює відношенню магнітного потоку провідника зі струмом до сили струму у провіднику:

$$L = \frac{\Phi}{I}, \quad (3.3)$$

де L – індуктивність провідника, Гн ;
 Φ – магнітний потік, що пронизує провідник, Тл .

$$[L] = \frac{\text{Вб}}{\text{А}} = \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{А}} = \text{Ом} \cdot \text{с} = \text{Гн}.$$

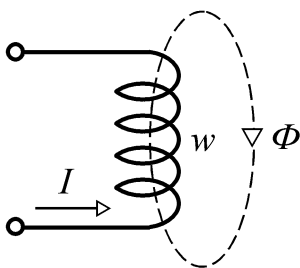


Рис.3.3

Якщо за однієї і тієї ж сили струму власний магнітний потік провідника зі струмом збільшується, то це означає, що індуктивність провідника збільшується. Наприклад, якщо узяти прямолінійний провідник і намотати його на якийсь немагнітний каркас (наприклад, картон) у вигляді спіралі, то утвориться *індуктивна котушка* (рис.3.3). Магнітний потік у такій котушці буде більшим, ніж у прямолінійному провіднику за однієї і тієї ж сили струму. Таким чином, індуктивність такої котушки більша, ніж у прямолінійного провідника.

Якщо усередину індуктивної котушки внести магнітний стрижень (наприклад, виготовлений з електротехнічної сталі) і пропустити по ній електричний струм (рис.3.4), то магнітний потік у такій котушці буде більшим, ніж у аналогічній котушці без магнітного стрижня. Тобто індукти-

вність залежить не тільки від форми провідника, а й від середовища, яке його оточує. Речовини, які призводять до збільшення магнітного потоку провідника зі струмом, називають **парамагнітними**, а речовини, які призводять до зменшення магнітного потоку провідника зі струмом, називають **діамагнітними**. Серед парамагнітних речовин виокремлюють речовини, які призводять до значного збільшення магнітного потоку провідника зі струмом (у сотні, тисячі разів), їх називають **феромагнітними** речовинами.

Для характеристики властивості речовин змінювати магнітний потік, який їх пронизує, застосовується **відносна магнітна проникність середовища**, яка показує у скільки разів магнітний потік провідника зі струмом у певній речовині відрізняється від магнітного потоку провідника зі струмом у вакуумі, тобто у скільки разів магнітна проникність певної речовини відрізняється від магнітної проникності вакууму:

$$\mu = \frac{\Phi_r}{\Phi_0} \quad \text{або} \quad \mu = \frac{\mu_r}{\mu_0}, \quad (3.4)$$

де μ – відносна магнітна проникність середовища;
 Φ_r – магнітний потік у речовині, Вб;
 Φ_0 – магнітний потік у вакуумі, Вб;
 μ_r – магнітна проникність середовища, Гн/м;
 μ_0 – магнітна проникність вакууму, Гн/м.

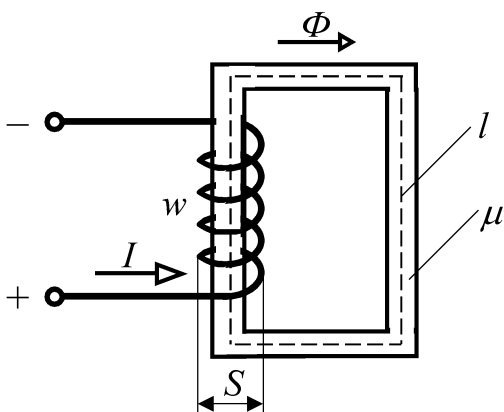


Рис.3.4

Для парамагнітних речовин $\mu > 1$ (для феромагнітних речовин $\mu \gg 1$), для діамагнітних речовин $\mu < 1$. Магнітну проникність вакууму називають **магнітною сталлю**, вона дорівнює $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

З урахуванням викладеного індуктивність котушки, показаної на рис.3.4, визначається так:

$$L = \frac{w^2 \cdot \mu \cdot \mu_0 \cdot S}{l}, \quad (3.5)$$

де w – кількість витків котушки;
 S – площа внутрішнього перерізу котушки, m^2 ;
 l – довжина середньої магнітної силової лінії, м.

Отже, якщо по індуктивній котушці, яка має w витків і володіє індуктивністю L , проходить електричний струм силою I , то кожний виток котушки буде пронизувати магнітний потік Φ . Зазначені фізичні величини

зв'язані між собою *законом електромагнетизму*, відповідно якому *добуток кількості витків на магнітний потік прямо пропорційний добутку індуктивності на силу струму*. Математичний запис закону електромагнетизму:

$$w \cdot \Phi = L \cdot I, \quad (3.6)$$

Добуток кількості витків котушки на магнітний потік, який пронизує кожен з витків, називають *потокозчепленням* котушки:

$$\psi = w \cdot \Phi, \quad (3.7)$$

де ψ – потокозчеплення котушки, Вб.

Приклад 3.3

У котушці індуктивності з феромагнітним осердям, яка має **200 витків**, протікає електричний струм силою **10 А**. Магнітний потік у феромагнітному осердді дорівнює **0,04 Вб**.

Визначити потокозчеплення та індуктивність котушки.

Розв'язок.

1. Визначаємо потокозчеплення котушки за (3.7):

$$\psi = w \cdot \Phi; \quad \psi = 200 \cdot 0,04 = 2 \cdot 10^2 \cdot 4 \cdot 10^{-2} = 8 \text{ Вб.}$$

2. Визначаємо індуктивність котушки з (3.6):

$$L = \frac{\psi}{I}; \quad L = \frac{8}{10} = 0,8 \text{ Гн.}$$

Заяпитання для самоконтролю

1. У чому суть явища електромагнетизму?
2. Сформулюйте правило «правого гвинта».
3. Дайте визначення магнітної індукції.
4. Запишіть визначальну формулу магнітної індукції.
5. Отримайте одиницю магнітної індукції з визначальної формули.
6. Що таке однорідне магнітне поле?
7. Дайте визначення магнітного потоку.
9. Запишіть визначальну формулу магнітного потоку.
10. Отримайте одиницю магнітного потоку з визначальної формули.
11. Дайте визначення індуктивності.
12. Запишіть визначальну формулу індуктивності.
13. Отримайте одиницю індуктивності з визначальної формули.
14. Яку конструкцію має індуктивна котушка?
15. Які речовини називають парамагнітними?
16. Які речовини називають діамагнітними?
17. Які речовини називають феромагнітними?
18. Що таке відносна магнітна проникність середовища?

19. Запишіть визначальну формулу відносної магнітної проникності середовища.
20. Що таке магнітна постійна? Чому вона дорівнює?
21. Як розрахувати індуктивність котушки?
22. Сформулюйте закон електромагнетизму.
23. Запишіть математично і розшифруйте закон електромагнетизму.
24. Дайте визначення потокозчепленню котушки.
25. Запишіть визначальну формулу потокозчеплення котушки.
26. Одержіть одиницю потокозчеплення котушки з її визначальної формули.

Завдання для самоконтролю

1. У магнітному полі постійного магніту знаходиться провідник зі струмом. Сила струму в провіднику дорівнює **20 А**. На провідник діє сила **4 Н**. Ефективна довжина провідника дорівнює **50 см**. Провідник знаходиться під кутом **90°** до вектора магнітної індукції. Визначити магнітну індукцію поля.
2. Між плоскими полюсами постійного магніту знаходиться рамка, площа якої дорівнює **400 см²**. Магнітна індукція поля дорівнює **1 Тл**. Кут між вектором магнітної індукції й нормаллю до поверхні рамки дорівнює **30°**. Визначити магнітний потік, що пронизує рамку.
3. У котушці індуктивності з феромагнітним осердям, яка має **400 витків**, протікає електричний струм силою **5 А**. Магнітний потік у феромагнітному осерді дорівнює **0,06 Вб**. Визначити потокозчеплення та індуктивність котушки.

3.2 Напруженість магнітного поля і закон повного струму

Якщо провідник з електричним струмом помістити в різні середовища, то в кожному середовищі значення магнітної індукції буде різним (рис.3.5).

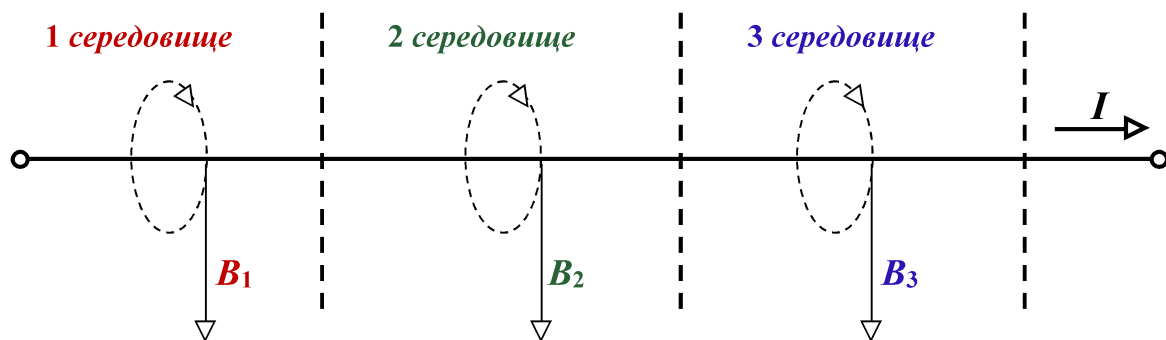


Рисунок 3.5 – Провідник з електричним струмом у різних середовищах

Для силової характеристики магнітного поля введена фізична величина, яка не залежить від магнітної проникності середовища. Такою величиною є **напруженість магнітного поля**, під якою розуміється відношення магнітної індукції до магнітної проникності середовища:

$$H = \frac{B}{\mu_r}, \quad (3.8)$$

де H – напруженість магнітного поля, A/m ;

$$[H] = \frac{\frac{T \cdot l}{\Gamma_H}}{\frac{m}{A \cdot m}} = \frac{\frac{B \cdot c}{m^2}}{\frac{B \cdot c}{A \cdot m}} = \frac{A}{m}.$$

Напруженість магнітного поля є векторною величиною, напрям якої збігається з напрямом магнітної індукції. Експериментально було встановлено, що добуток напруженості магнітного поля у певній його точці на довжину силової лінії магнітного поля, проведеної через цю точку, є величина постійна і дорівнює силі струму у провіднику, який утворив магнітне поле (рис.3.6):

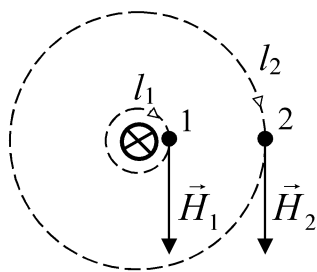


Рис.3.6

$$I = H_1 \cdot l_1 = H_2 \cdot l_2, \quad (3.9)$$

де I – сила струму у провіднику, A ;
 H_1, H_2 – напруженості магнітного поля відповідно у точках 1 і 2, A/m ;
 l_1, l_2 – довжини силових ліній магнітного поля відповідно у точках 1 і 2, m .

Якщо провідник зі струмом (рис.3.7) буде розташований на магнітопроводі (замкненому магнітному стрижні, призначеному для підсилення та проведення магнітного потоку), то сила струму у провіднику буде дорівнювати добутку напруженості магнітного поля у будь-якій точці магнітопроводу на довжину середньої магнітної силової лінії:

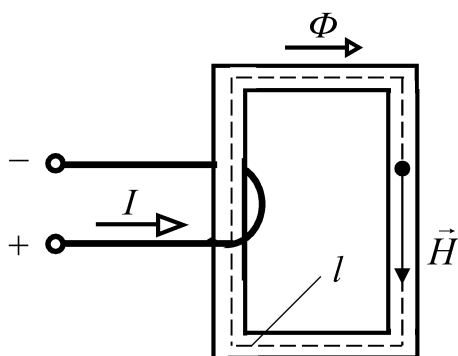


Рис.3.7

$$I = H \cdot l, \quad (3.10)$$

де I – сила струму у провіднику, A ;
 H – напруженість магнітного поля у магнітопроводі, A/m ;
 l – довжина середньої магнітної силової лінії, m .

Магнітне поле індуктивної котушки (рис.3.4) створюється сумою струмів, які протікають у окремих витках котушки. Цю суму струмів називають *повним струмом*. Через те, що ці струми будуть однаковими, то повний струм буде дорівнювати добутку кількості витків на силу струму, що протікає в одному витку. Даний повний струм буде дорівнювати добутку

напруженості магнітного поля у будь-якій точці магнітопроводу на довжину середньої магнітної силової лінії:

$$w \cdot I = H \cdot l, \quad (3.11)$$

де w – кількість витків котушки, A ;

I – сила струму у котушці, A ;

H – напруженість магнітного поля в магнітопроводі, A/m ;

l – довжина середньої магнітної силової лінії, m .

Добуток кількості витків котушки на силу струму, що у ній протікає, називають **намагнічуючою силою**:

$$F = w \cdot I, \quad (3.12)$$

де F – намагнічуюча сила котушки, A .

Вираз (3.11) отримав назву **закону повного струму**. Формулюється він так: **намагнічуюча сила котушки прямо пропорційна добутку напруженості магнітного поля на довжину середньої магнітної силової лінії магнітопроводу**. Математичний запис закону:

$$F = w \cdot I = H \cdot l. \quad (3.13)$$

Приклад 3.4

У котушці індуктивності з феромагнітним осердям, яка має **400 витків**, протікає електричний струм силою **5 А**. Довжина середньої магнітної силової лінії осердя дорівнює **40 см**.

Визначити намагнічуючу силу котушки і напруженість магнітного поля у осерді.

Розв'язок.

1. Визначаємо намагнічуючу силу котушки за (3.11):

$$F = w \cdot I; \quad F = 400 \cdot 5 = 2000 \text{ А} = 2 \text{ кА.}$$

2. Визначаємо напруженість магнітного поля у осерді котушки з (3.12):

$$H = \frac{F}{l}; \quad H = \frac{F}{l} = \frac{2000}{0,4} = 5000 \frac{\text{А}}{\text{м}}.$$

У загальному випадку на одному нерозгалуженому магнітопроводі може міститись декілька котушок, а сам магнітопровід може мати різні перерізи на певних ділянках або повітряні прошарки. Тому рівняння (3.13) буде мати такий вигляд:

$$\sum_{i=1}^{i=n} F_i = \sum_{i=1}^{i=n} H_i l_i, \quad (3.14)$$

де F_i – намагнічуюча сила i -ої котушки, A ;
 H_i – напруженість магнітного поля на i -ій ділянці
магнітопроводу, A/m ;
 l_i – довжина середньої магнітної силової лінії i -ої ділянки
магнітопроводу, m .

Якщо напрям результуючої магнітної силової лінії збігається з напрямом магнітної силової лінії певного струму, то намагнічуюча сила цього струму записується зі знаком «+», і навпаки.

Напрямок магнітних силових ліній поля, яке створюється струмом котушки визначають за **правилом «правої руки»**: якщо долонею правої руки охопити витки котушки так, щоб чотири пальці показували напрям струму у витках, то відігнутий на 90° великий палець покаже північний полюс магнітного поля котушки (рис.3.8).

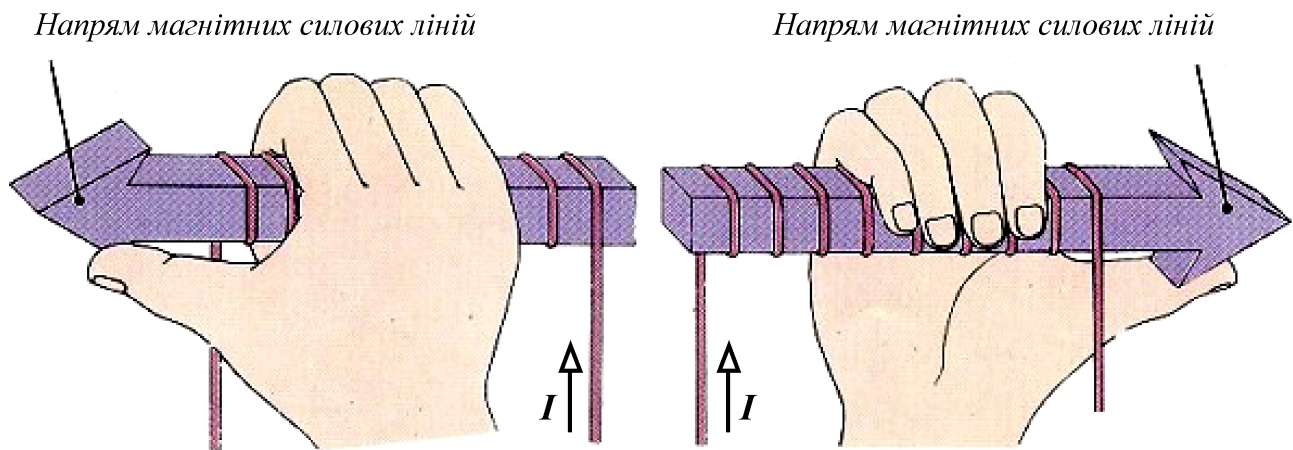


Рисунок 3.8 – Правило «правої руки»

Запитання для самоконтролю

1. Дайте визначення напруженості магнітного поля.
2. Запишіть визначальну формулу напруженості магнітного поля.
3. Отримайте одиницю напруженості магнітного поля з визначальної формули.
4. Дайте визначення намагнічуючій силі котушки.
5. Запишіть визначальну формулу намагнічуючої сили котушки.
6. Одержіть одиницю намагнічуючої сили котушки з її визначальної формули.
7. Сформулюйте закон повного струму.
8. Запишіть математично і розшифруйте закон повного струму.
9. Запишіть математично і поясніть закон повного струму для загального випадку.
10. Сформулюйте правило «правої руки».

Завдання для самоконтролю

1. У котушці індуктивності з феромагнітним осердям, яка має **200 витків**, протікає електричний струм силою **8 А**. Довжина середньої магнітної силової лінії осердя дорівнює **80 см**. Визначити намагнічуючу силу котушки і напруженість магнітного поля у осерді.

3.3 Крива намагнічування

З (3.13) можна знайти залежність напруженості магнітного поля від намагнічуючого струму:

$$H = \frac{wI}{l}. \quad (3.15)$$

Якщо по котушці (рис.3.5) пропускати електричний струм, змінюючи силу електричного струму від нуля до певного значення, то відповідно до (3.8) буде змінюватися і магнітна індукція за законом:

$$B = \mu_r \cdot H. \quad (3.16)$$

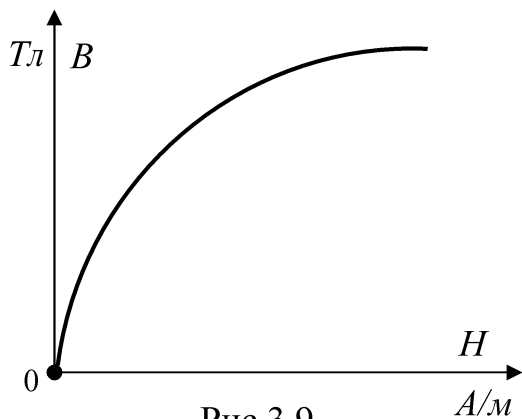


Рис.3.9

З курсу фізики відомо, що з ростом магнітного потоку у феромагнетика його магнітна проникність буде зменшуватися. Тому залежність $B = f(H)$ буде нелінійною. Така крива називається **кривою намагнічування** (рис.3.9), яка вперше була експериментально встановлена для м'якого заліза російським фізиком Олександром Григоровичем Столетовим у 1871 році.

Як видно з кривої намагнічування на рис.3.9 з ростом напруженості магнітного поля поступово настає насичення феромагнітного матеріалу і магнітна індукція далі практично не зростає. Магнітне насичення матеріалу магнітопроводу обумовлене наступним. Кожен атом магнітопроводу містить певну кількість електронів, які обертаються по орбітах навколо ядер атомів. Цей рух електронів називають елементарним струмом, навколо якого утворюється магнітне поле атома. Магнітне поле магнітопроводу складається з магнітних полів елементарних струмів. У ненамагніченому магнітопроводі усі елементарні струми, а відповідно і їх магнітні поля, розташовані хаотично і магнітна індукція результуючого магнітного поля дорівнює нулю. Процес намагнічування магнітопроводу полягає у тому, що під впливом зовнішнього магнітного поля (яке утворене струмом у котушці) елементарні струми встановлюються паралельно один одному, і магнітна індукція результуючого магнітного поля стає більшою за нуль. Коли під впливом зовнішнього магнітного поля кількість елементарних струмів, що встановились паралельно один одному, стала максимальною для даного феромагнітного матеріалу, то настає насичення магнітопроводу. При насиченні магнітна індукція результуючого магнітного поля стає максимальною і під впливом зовнішнього магнітного поля більше не зростає.

Запитання для самоконтролю

1. Одержіть напруженість магнітного поля з закону повного струму.
2. Запишіть вираз магнітної індукції через напруженість магнітного поля.
3. Що являє собою крива намагнічування?
4. Зобразіть графічно криву намагнічування та поясніть її.
5. Як відбувається намагнічування магнітопроводу котушки?
6. Коли настає насичення магнітопроводу котушки?

3.4 Петля гістерезису

Розглянемо залежність $B = f(H)$ для магнітопроводу котушки, яка наведена на рис.3.10.

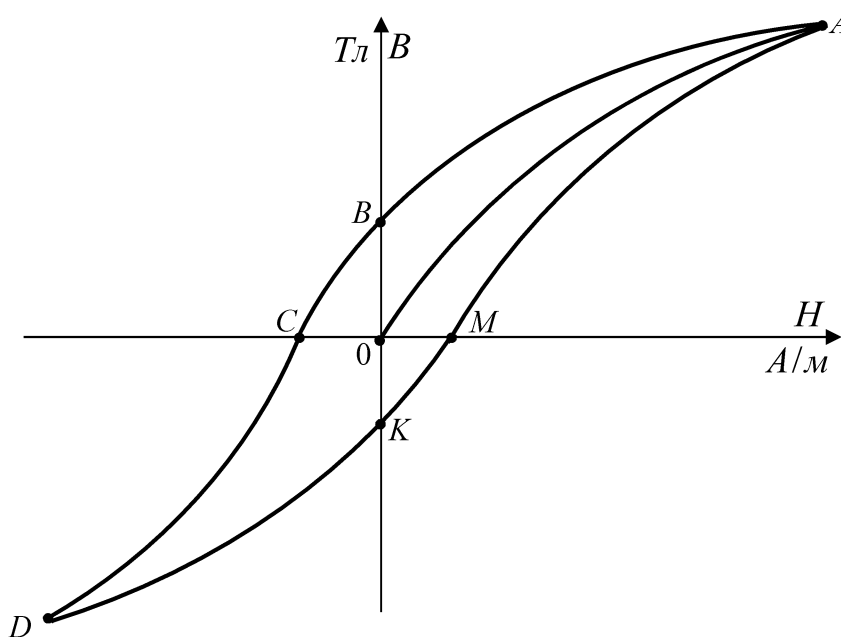


Рисунок 3.10 – Петля гістерезису

Якщо спочатку збільшувати силу струму у котушці (рис.3.4) до режиму насичення магнітопроводу (відрізок OA), а потім його зменшувати, то залежність $B = f(H)$ уже проходить вище (відрізок AB). Для того, щоб магнітна індукція у магнітопроводі зменшилася до нуля, необхідно струм у котушці пропускати в зворотному напрямку (відрізок BC). Якщо далі в зворотному напрямку пропускати струм, то поступово настає насичення магнітопроводу (відрізок CD). Якщо тепер струм знов зменшувати до нуля, то залежність $B = f(H)$ буде мати вигляд відрізка DK . Змінюємо напрям струму у котушці і при певному значенні сили струму магнітна індукція у магнітопроводі дорівнює нулю (відрізок KM). Підвищуючи силу струму далі, поступово настає насичення магнітопроводу (відрізок MA). Таким чином, ми одержали залежність $B = f(H)$ для магнітопроводу котушки у вигляді так званої **петлі гістерезису**.

На рис.3.10 відрізки ОВ і ОК відображають значення *залишкової магнітної індукції* власного магнітного поля магнітопроводу котушки, яке існує у ньому за відсутності зовнішнього магнітного поля.

Відрізки ОС і ОМ відображають значення *коерцитивної сили*, під якою розуміють значення напруженості зовнішнього магнітного поля, необхідне для позбавлення магнітопроводу залишкової магнітної індукції.

З курсу фізики відомо, що площа петлі гістерезису прямо пропорційна втратам енергії на перемагнічування магнітопроводу.

Феромагнітні матеріали поділяються на дві групи: магнітом'які та магнітотверді. Магнітом'які матеріали швидко намагнічуються і мають незначну коерцитивну силу (рис.3.11а). Магнітотверді матеріали важче намагнічуються і мають значну коерцитивну силу (рис.3.11б).



Рисунок 3.11 – Петлі гістерезису магнітом'якого (а) і магнітотвердого (б) матеріалів

Запитання для самоконтролю

1. Зобразіть графічно петлю гістерезису (перемагнічування) та поясніть її.
2. Що таке залишкова магнітна індукція?
3. Що таке коерцитивна сила?
4. Яким явищем супроводжується перемагнічування магнітопроводу?
5. Від чого залежать втрати енергії на перемагнічування?
6. На які групи поділяють феромагнітні матеріали?
7. Охарактеризуйте магнітом'які матеріали.
8. Охарактеризуйте магнітотверді матеріали.

3.5 Магнітне коло та його конструктивна схема

За аналогією з електричним колом під *магнітним колом* розуміється сукупність пристроїв, які забезпечують можливість створення магнітного потоку. Магнітне коло містить магнітопровід (призначений для замикання

і підсилення магнітного потоку), а також котушку, виконану з проводу (призначену для протікання електричного струму і створення магнітного потоку), яка живиться від джерела постійного електричного струму. Магнітопроводи виконуються з феромагнітних матеріалів та можуть мати різні довжини і перерізи, а також повітряні прошарки. Феромагнітні матеріали – це залізо, нікель, кобальт, їх сплави.

Приведемо приклад конструктивної схеми нерозгалуженого магнітного кола (рис.3.12).

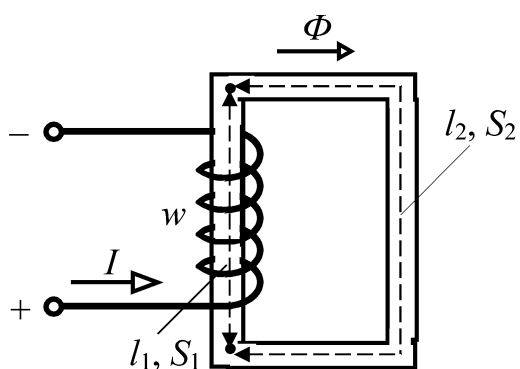


Рис.3.12

Магнітопровід містить дві ділянки: 1-а ділянка довжиною l_1 , перерізом S_1 ; 2-а ділянка довжиною l_2 , перерізом S_2 .

Котушка містить w витків. До неї підведена напруга, під дією якої протікає намагнічуючий струм I . Спостерігається явище електромагнетизму: котушка з намагнічуючим струмом I створює магнітний потік Φ .

Запитання для самоконтролю

1. Що розуміється під магнітним колом?
2. Назвіть основні елементи магнітного кола.
3. Укажіть призначення магнітопроводу.
4. З яких матеріалів виготовляються магнітопроводи?
5. Перелічіть феромагнітні матеріали.
6. Наведіть приклад конструктивної схеми найпростішого магнітного кола.

3.6 Електромагніти та їх розрахунок

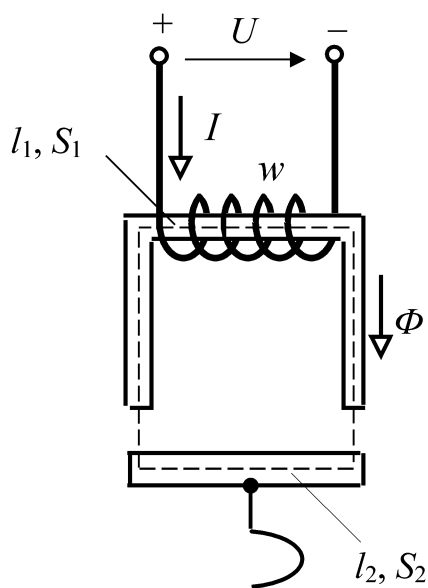


Рис.3.13

Електромагніти широко застосовуються в техніці. Вони служать для створення магнітного поля в електрогенераторах, електродвигунах, трансформаторах, електровимірювальних приладах, електричних апаратах, а також для створення тягових зусиль. Електромагніт, призначений для тягових зусиль, складається з нерухомого осердя (магнітопроводу), рухомого якоря (магнітопроводу) та котушки збудження. Котушка розташована на осерді, а осердя відділене від якоря повітряним зазором (рис.3.13).

Піднімальна сила електромагніту визначається за формулою:

$$F_{емг} = \frac{B^2 S}{2\mu_0}, \quad (3.17)$$

- де $F_{емг}$ – піднімальна сила електромагніту, H ;
 S – загальна площа поперечного перерізу полюсів електромагніту, m^2 .
 B – магнітна індукція, $Tл$;
 μ_0 – магнітна постійна, $Гн/м$.

Запитання для самоконтролю

1. Де застосовуються електромагніти в техніці?
2. Складіть конструктивну схему електромагніту для тягових зусиль.
3. Запишіть формулу для розрахунку піднімальної сили електромагніту для тягових зусиль.

Тема 4 НЕРОЗГАЛУЖЕНІ ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ЗМІННОГО СИНУСОЇДНОГО СТРУМУ

4.1 Основні фізичні поняття

Змінний синусоїдний струм виникає у електричному колі, яке отримує живлення від генератора змінної синусоїдної е.р.с. Робота такого генератора базується на явищах електричного струму, електромагнетизму та електромагнітної індукції. Складовим елементом будь-якого генератора є індуктивна котушка, яка конструктивно являє собою намотаний на якусь основу провідник. Розглянемо явища електромагнетизму та електромагнітної індукції із використанням індуктивної котушки.

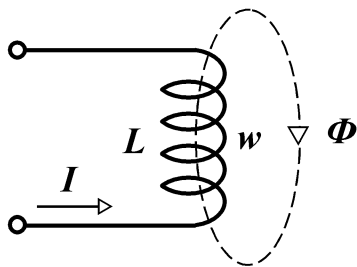


Рис.4.1

Явище електромагнетизму полягає у тому, що навколо електричного струму завжди утворюється магнітне поле (рис.4.1). **Закон електромагнетизму** формулюється так: добуток кількості витків котушки (провідного контуру) на магнітний потік дорівнює добутку індуктивності котушки на силу струму, що у ній протікає. Математичний запис цього закону такий:

$$w \cdot \Phi = L \cdot I, \quad (4.1)$$

де w – кількість витків котушки (провідного контуру);

Φ – магнітний потік одного витка котушки, Вб;

L – індуктивність котушки, Гн;

I – сила струму, що протікає у котушці, А.

Під магнітним потоком одного витка котушки розуміють частину магнітного поля, яка обмежена поверхнею витка. Під індуктивністю котушки розуміють здатність котушки утворювати магнітне поле при проходженні по ній електричного струму: чим більше індуктивність, тим більший магнітний потік утворюється в котушці за однакової сили струму.

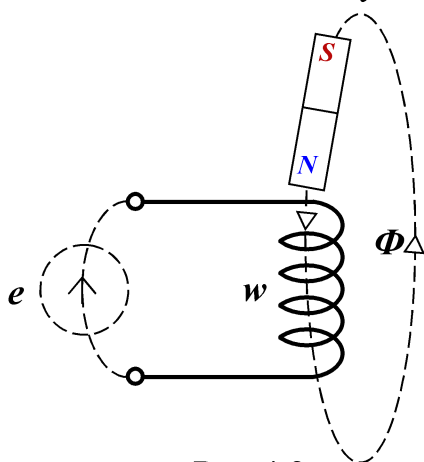


Рис.4.2

Явище електромагнітної індукції полягає у наступному: якщо котушка (провідний контур) пронизується змінним магнітним потоком, то у котушці (провідному контурі) наводиться е.р.с. (рис.4.2). **Закон електромагнітної індукції** формулюється так: значення е.р.с., яка наводиться в контурі, прямо пропорційно кількості витків контуру і швидкості зміни магнітного потоку. Математичний запис цього закону такий:

$$e = -w \cdot \frac{d\Phi}{dt}, \quad (4.2)$$

де e – е.р.с., що наводиться у котушці (провідному контурі), B ;
 w – кількість витків котушки (провідного контуру);
 Φ – магнітний потік, що пронизує один виток котушки, $B\delta$;
 t – час, c .

$$[e] = \frac{B\delta}{c} = \frac{B \cdot c}{c} = B.$$

Фізична суть знаку «мінус» полягає в наступному: якщо в даний момент часу магнітний потік, що пронизує контур, збільшується, то він наводить е.р.с., яка створить електричний струм, а останній свій магнітний потік, який буде спрямований проти основного потоку і навпаки.

Розглянемо *конструкцію та принцип дії генератора змінної синусоїдної е.р.с.* на його фізичній моделі (рис.4.3).

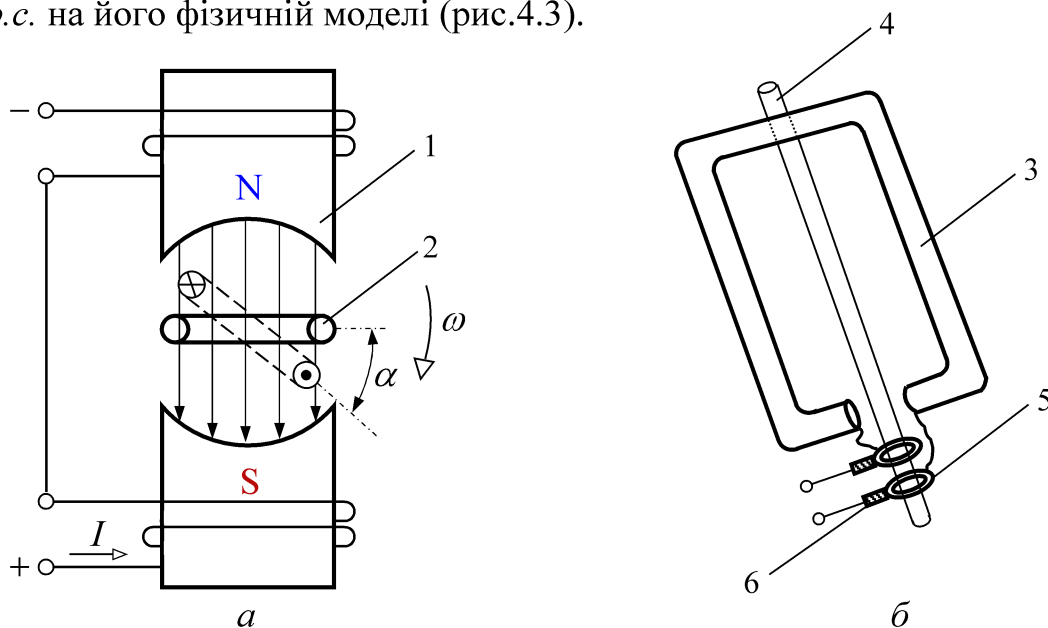


Рисунок 4.3 – Конструктивна схема фізичної моделі генератора змінної синусоїдної е.р.с. (а) і рамки (б)

Фізична модель генератора (рис.4.3) складається з електромагніту 1, між полюсами якого розташована рамка 2. Рамка являє собою провідник 3, розташований на осі 4 та підключений до контактних кілець 5, на які накладені щітки 6.

Принцип дії генератора розглянемо для випадку, коли на початку роботи рамка знаходиться в горизонтальному положенні. Він наступний: до затискачів обмотки електромагніту підводиться постійна напруга, під дією якої у ній протікає постійний електричний струм. Навколо цього

струму виникає магнітне поле, яке пронизує рамку. При обертанні рамки в утвореному магнітному полі за допомогою стороннього приводного механізму магнітний потік, що пронизує рамку, змінюється за законом косинусу:

$$\Phi = \Phi_m \cdot \cos \alpha, \quad (4.3)$$

де Φ – миттєве значення магнітного потоку, що пронизує рамку (значення в даний момент часу), *Вб*;

Φ_m – амплітуда (максимальне значення) магнітного потоку, що пронизує рамку (значення при горизонтальному положенні рамки), *Вб*;

α – кут відхилення рамки від горизонтального положення, *рад (градус)*.

Кут відхилення рамки від горизонтального положення залежить у часі від кутової швидкості обертання рамки:

$$\alpha = \omega t, \quad (4.4)$$

де ω – кутова швидкість обертання рамки, *рад/с (градус/с)*;

t – час обертання рамки, *с*.

Тоді (4.3) з урахуванням (4.4) запишеться так:

$$\Phi = \Phi_m \cdot \cos \omega t. \quad (4.5)$$

Внаслідок зміни магнітного потоку, що пронизує рамку, виникне явище електромагнітної індукції, тобто у рамці наведеться е.р.с. Для отримання виразу цієї е.р.с. підставимо (4.5) у (4.2), отримаємо:

$$e = -w \cdot \frac{d(\Phi_m \cdot \cos \omega t)}{dt} = -w \cdot \Phi_m \frac{d(\cos \omega t)}{dt} = w \cdot \Phi_m \cdot \omega \cdot \sin \omega t.$$

В іншому вигляді це рівняння можна записати так:

$$e = E_m \cdot \sin \omega t, \quad (4.6)$$

де

$$E_m = w \cdot \Phi_m \cdot \omega,$$

де e – миттєве значення е.р.с. (значення в даний момент часу), *В*;

E_m – амплітуда (максимальне значення) е.р.с.

(значення при вертикальному положенні рамки), *В*.

Отримане рівняння (4.6) відображає зміну у часі е.р.с., що наводиться у рамці генератора. Графічне зображення цього процесу показано на рис.4.4.

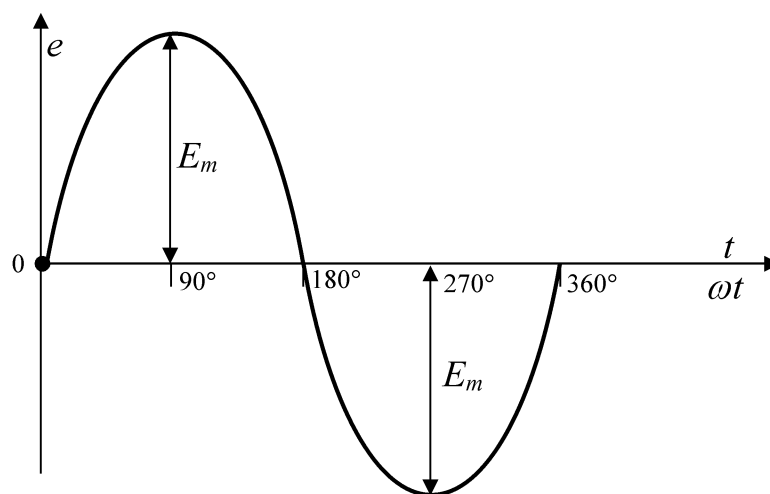


Рисунок 4.4 – Залежність $e = f(t)$ для випадку, коли рамка генератора у початковий момент часу знаходиться у горизонтальному положенні

З рис.4.4 видно, що е.р.с., яка індукуюється у стороні рамки генератора, за один оберт рамки змінюється так:

- 1) коли рамка генератора знаходиться у горизонтальному положенні, то е.р.с. у ній дорівнює нулю;
- 2) коли рамка генератора відхиляється від горизонтального положення (починає обертатись), то у ній виникає е.р.с., яка збільшується по мірі зростання кута відхилення рамки від горизонтального положення;
- 3) коли рамка генератора відхиляється від горизонтального положення на 90° , то е.р.с. у ній досягає свого максимального значення;
- 4) при подальшому збільшенні кута відхилення рамки від горизонтального положення е.р.с., що у ній виникає, зменшується;
- 5) коли рамка генератора знов займає горизонтальне положення (тобто відхиляється на 180°), то е.р.с. у ній дорівнює нулю;
- 6) при подальшому відхиленні рамки генератора від горизонтального положення на кут від 180° до 360° все викладене вище повторюється, але е.р.с. змінює напрямлення дії на протилежне.

Таку зміну е.р.с., за якої її значення змінюється від нуля до максимуму і потім знову до нуля, після чого е.р.с. змінює напрямлення дії, і зміна її значення повторюється, називають **повним коливанням е.р.с.**

Якщо рамка у початковий момент часу (тобто у момент початку її обертання) знаходилась під певним кутом до горизонтального положення, то рівняння (4.6) буде мати вигляд:

$$e = E_m \cdot \sin(\omega t + \psi_e), \quad (4.7)$$

де ψ_e – початкова фаза електрорушійної сили, рад (градус).

Початкова фаза е.р.с. дорівнює куту, під яким знаходиться рамка генератора по відношенню до горизонтального положення у початковий момент часу. Зміна е.р.с. у часі з додатною початковою фазою показана на рис.4.5, а з від’ємною – на рис.4.6.

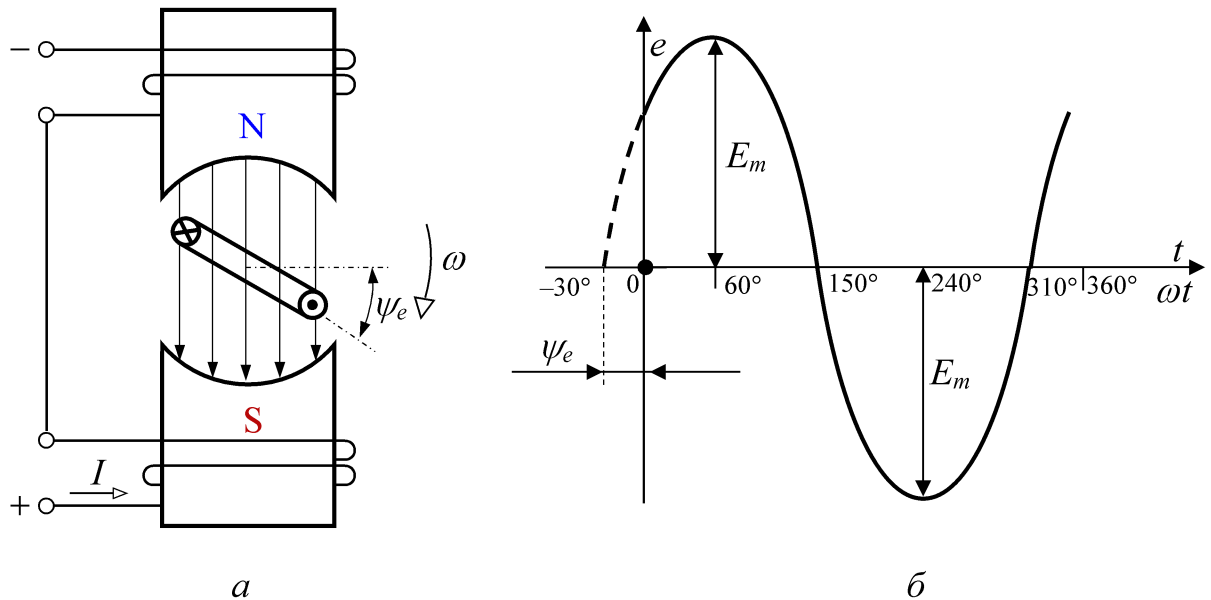


Рисунок 4.5 – Положення рамки генератора у початковий момент часу (а) і зміна е.р.с. у часі за такого положення (б), якщо $\psi_e = 30^\circ$

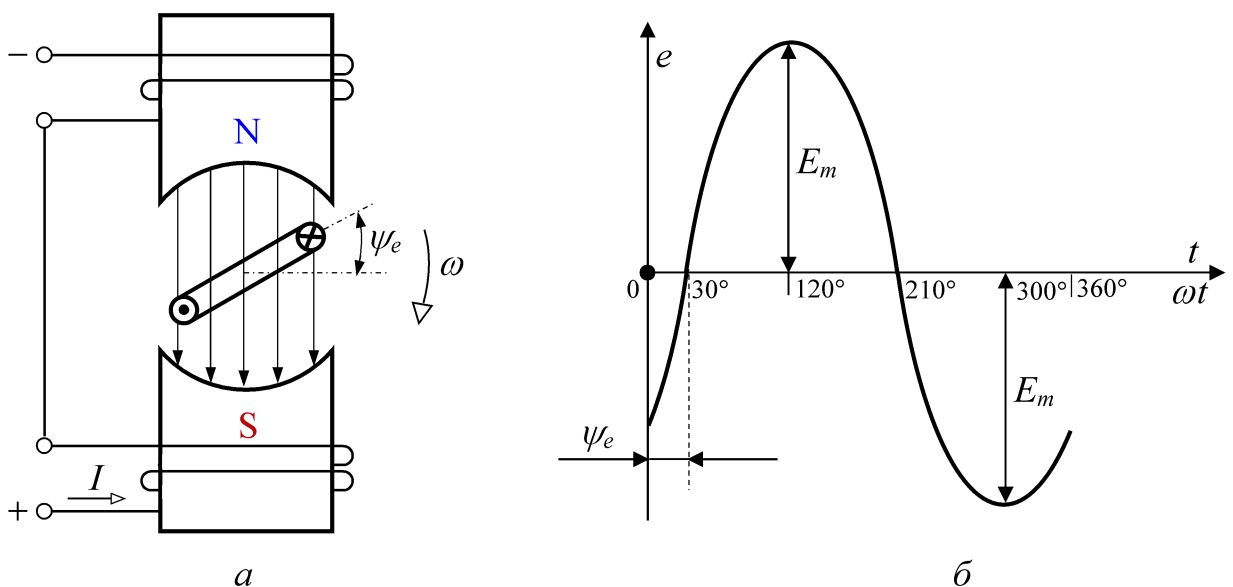


Рисунок 4.6 – Положення рамки генератора у початковий момент часу (а) і зміна е.р.с. у часі за такого положення (б), якщо $\psi_e = -30^\circ$

З рис.4.4 – 4.6 видно, що початкова фаза е.р.с. характеризує значення е.р.с. у початковий момент часу по відношенню до нуля. Тобто, якщо початкова фаза е.р.с. дорівнює нулю, то у момент початку обертання рамки

е.р.с. теж дорівнює нулю. Якщо початкова фаза е.р.с. відрізняється від нуля, то у момент початку обертання рамки е.р.с. теж відрізняється від нуля, а знак початкової фази характеризує напрямлення дії е.р.с. Якщо початкова фаза е.р.с. має додатне значення, то е.р.с. у початковий момент часу має додатне значення (тобто спрямована до спостерігача), і навпаки.

Вираз $(\omega t + \psi_e)$ називають **поточною фазою е.р.с.** Вона дорівнює куту, під яким знаходиться рамка генератора по відношенню до горизонтального положення у даний (поточний) момент часу. За аналогією з викладеним вище поточна фаза е.р.с. характеризує значення е.р.с. у даний (поточний) момент часу по відношенню до нуля.

Якщо рамку, у якій навелась змінна синусоїдна е.р.с., за допомогою щіток замкнути на навантаження (наприклад, на резистор, тощо), то утвориться замкнений контур, у якому під дією е.р.с. виникне змінний синусоїдний струм, що за аналогією з (4.7) буде описуватись таким рівнянням:

$$i = I_m \cdot \sin(\omega t + \psi_i), \quad (4.8)$$

де i – миттєве значення сили струму (значення в даний момент часу), A ;

I_m – амплітуда (максимальне значення) сили струму, A ;

ψ_i – початкова фаза струму, rad (градус);

$(\omega t + \psi_i)$ – поточна фаза струму, rad (градус).

Початкова фаза струму (за аналогією за початковою фазою е.р.с.) характеризує миттєве значення сили струму по відношенню до нуля у початковий момент часу (у момент початку спостереження), а **поточна фаза струму** – у даний (поточний) час.

Графічне зображення зміни сили синусоїдного струму у часі для випадку, коли початкова фаза струму дорівнює нулю, показано на рис.4.7.

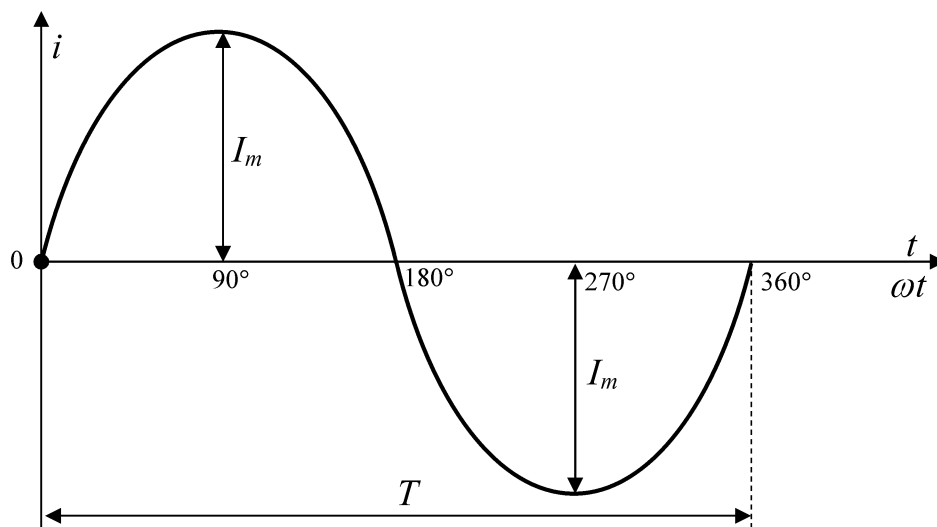


Рисунок 4.7 – Залежність $i = f(t)$ для випадку, коли початкова фаза струму дорівнює нулю

З рис.4.7 видно, що кількість зарядів, яка проходить через поперечний переріз провідника змінюється у часі. При змінному синусоїдному струмі у твердому провіднику вільні електрони спочатку є нерухомими, потім починають рухатись, збільшуючи швидкість. Коли поточна фаза струму буде дорівнювати 90° , то вільні електрони мають максимальну швидкість (тому і сила струму максимальна). Далі вони починають пригальмовувати, і коли поточна фаза струму буде дорівнювати 180° , вони зупиняються (тому і сила струму дорівнює нулю). Потім все викладене повторюється, але вільні електрони рухаються у протилежний бік.

Таким чином, у разі змінного синусоїдного струму вільні електрони у проводі здійснюють коливання. Рух вільних електронів спочатку в один бік до повної зупинки, а потім у зворотній бік до повної зупинки зі змінною швидкістю назвали **повним коливанням струму**.

Час, за який відбувається повне коливання струму, називають **періодом струму**. Він дорівнює часу, за який рамка генератора виконує один повний оберт. На рис.4.7 період струму позначений літерою T . Одиницею періоду є секунда.

Кількість повних коливань електричного струму за секунду називають **частотою струму**. Вона дорівнює кількості обертів рамки генератора за секунду. Між частотою і періодом струму є такий взаємозв'язок:

$$f = \frac{1}{T}, \quad (4.9)$$

де f – частота струму, Гц;

$$[f] = \frac{1}{c} = \text{Гц}.$$

Величину, яка у 2π раз більша за частоту струму, назвали **кутовою (циклічною) частотою струму**:

$$\omega = 2\pi \cdot f; \quad (4.10)$$

$$[\omega] = \frac{\text{рад.}}{c};$$

вона дорівнює кутовій частоті обертання рамки генератора.

Змінний синусоїдний струм, проходячи по провіднику, супроводжується тепловою дією незалежно від напрямлення струму. Запишемо кількість теплоти, що виділиться в провіднику за період струму, і дорівняємо її до теплоти, що виділиться в тому ж провіднику при протіканні по ньому постійного струму протягом періоду змінного струму:

$$\int_0^T Ri^2 dt = RI^2T, \quad (4.11)$$

де R – опір провідника постійному струму, Ом;

I – сила постійного струму (діюче значення змінного струму), А.

Звідси знаходимо:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}. \quad (4.12)$$

Силу постійного струму, який, протікаючи по такому ж самому проволу, що і змінний струм, виділяє таку ж кількість теплоти за період змінного струму, назвали **діючим значенням змінного струму**.

Знайдемо співвідношення між амплітудою та діючим значенням змінного синусоїдного струму, для чого підставимо (4.8) у (4.12) та після перетворень отримаємо:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}. \quad (4.13)$$

Приклад 4.1

У колі протікає електричний струм $i = 14,1 \sin(\omega t - 37^\circ)$ А.

Визначити показання амперметра, включеного в коло.

Розв'язок.

Амперметр показує діюче значення струму, яке визначаємо за (4.13), підставивши амплітуду струму:

$$I = \frac{14,1}{\sqrt{2}} = 10 \text{ А}.$$

За аналогією використовують діючі значення е.р.с. і напруги:

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}}; \quad (4.14)$$

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}. \quad (4.15)$$

Електровимірювальні прилади (амперметри, вольтметри), що включені у коло змінного синусоїдного струму, показують діючі значення вимірюваних величин (сили струму, напруги).

Синусоїдні величини (струми, напруги, е.р.с., потенціали) зображують на площині за допомогою оригіналів (синусоїд) та радіус-векторів. **Радіус-вектор** являє собою спрямований відрізок прямої, який рівномірно обертається з кутовою швидкістю ω навколо початку координат. Довжина радіус-вектора дорівнює в обраному масштабі амплітуді синусоїдної величини. У подальшому будемо називати його просто вектором, а побудову, на якій зображено декілька векторів – **векторною діаграмою**.

Для початкового моменту часу (для $t = 0$) вектор відкладають під кутом до осі відліку, який дорівнює початковій фазі зображуваної величини. Якщо початкова фаза додатна, то кут відкладається проти годинникової стрілки, якщо від’ємна – за годинниковою стрілкою. У будь-який інший момент часу вектор зображують під кутом поточної фази синусоїдної величини до осі відліку.

Миттєве значення синусоїдної величини в будь-який момент часу (для будь-якої фази) є проекція вектора на вертикальну вісь.

Як приклад струм $i = I_m \cdot \sin(\omega t + 45^\circ)$ А зображений на рис.4.8.

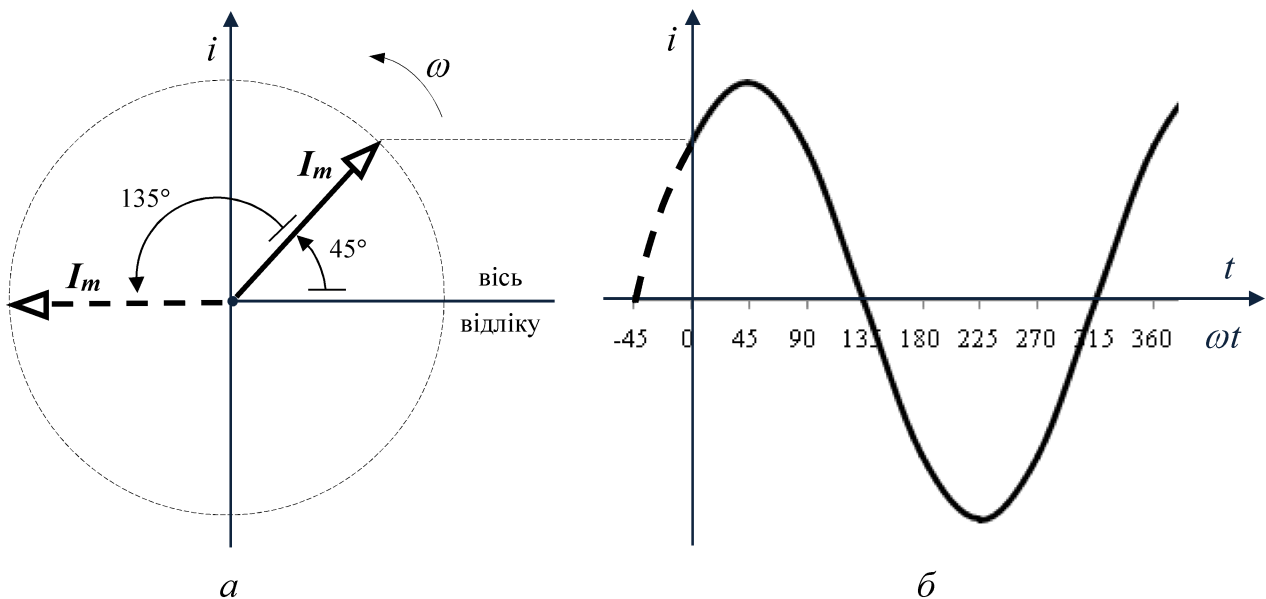


Рисунок 4.8 – Зображення струму $i = I_m \cdot \sin(\omega t + 45^\circ)$ А у вигляді вектору (а) та синусоїди (б)

На рис.4.8 видно, що у початковий момент часу вектор струму побудований під кутом початкової фази 45° до осі відліку. Через певний проміжок часу вектор струму побудований під кутом поточної фази до осі відліку, тобто $(\omega t + \psi_i) = 135^\circ + 45^\circ = 180^\circ$.

У подальшому на векторних діаграмах вектор будують для початкової фази, а для інших фаз – тільки у разі необхідності. Крім того, штрихове коло навколо вектора та вертикальну вісь зображують теж тільки у разі необхідності.

Приклад 4.1

По котушці протікає струм $i = 15 \sin(\omega t + 30^\circ)$ А.
Зобразити струм у вигляді вектора.

Розв'язок.

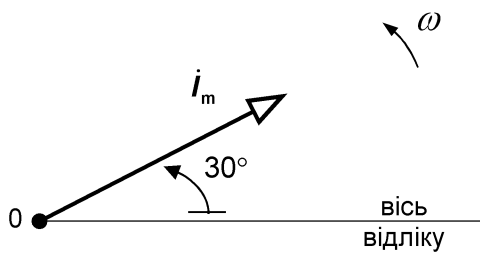


Рис.4.9

Вибираємо масштаб струму $m_i = 0,5$ А/мм.

Знаходимо довжину вектора $l_i = 15 / 0,5 = 30$ мм.

Під кутом початкової фази до осі відліку будуємо вектор струму (рис.4.9).

Запитання для самоконтролю

1. У чому суть явища електромагнетизму?
2. Сформулюйте закон електромагнетизму.
3. Математично запишіть і розшифруйте закон електромагнетизму.
4. У чому суть явища електромагнітної індукції?
5. Сформулюйте закон електромагнітної індукції.
6. Математично запишіть і розшифруйте закон електромагнітної індукції.
7. Поясніть фізичну суть знаку «мінус».
8. Наведіть приклад використання явища електромагнітної індукції в техніці.
9. Складіть і опишіть конструктивну схему фізичної моделі машинного генератора синусоїдної е.р.с.
10. Опишіть принцип дії фізичної моделі машинного генератора синусоїдної е.р.с.
11. Поясніть, чому в генераторі наводиться синусоїдна е.р.с., запишіть і розшифруйте її математичний вираз.
12. Що являє собою повне коливання синусоїдної е.р.с.?
13. Запишіть і розшифруйте математичний вираз миттєвої синусоїдної напруги на затискачах ідеального генератора.
14. Що таке амплітуда синусоїдної е.р.с.? Що є її одиницею?
15. Що характеризує початкова фаза синусоїдної е.р.с.?
16. Що характеризує поточна фаза синусоїдної е.р.с.?
17. Як отримати синусоїдний струм?
18. Запишіть і розшифруйте математичний вираз миттєвого синусоїдного струму.
19. Що таке повне коливання синусоїдного струму?
20. Що таке амплітуда синусоїдного струму? Що є її одиницею?
21. Що таке період синусоїдного струму? Що є його одиницею?
22. Що таке частота синусоїдного струму? Що є її одиницею?
23. Запишіть формулу взаємозв'язку між періодом і частотою синусоїдного струму.

24. Що таке кругова (циклічна) частота синусоїдного струму? Що є її одиницею?
25. Запишіть математичний вираз кругової (циклічної) частоти синусоїдного струму.
26. Що характеризує початкова фаза синусоїдного струму?
27. Що характеризує миттєва фаза синусоїдного струму?
28. Що розуміється під діючим значенням змінного струму?
29. Запишіть вираз діючого значення змінного струму.
30. Як розрахувати діюче значення синусоїдного струму через його амплітудне значення?
31. Як розрахувати діюче значення синусоїдної електрорушійної сили через її амплітудне значення?
32. Як розрахувати діюче значення синусоїдної напруги через її амплітудне значення?
33. Як розрахувати середнє значення синусоїдного струму через його амплітудне значення?
34. Як зобразити струм за допомогою радіус-вектора?
35. Як знайти миттєве значення синусоїдного струму, використовуючи його радіус-вектор?

Завдання для самоконтролю

У колі протікає струм $i = 28,2 \sin(\omega t - 30^\circ)$ А.

1. Зобразіть цей струм графічно у вигляді $i = f(\omega t)$.
Укажіть на графіку період і амплітуду струму.
2. Зобразіть цей струм за допомогою радіус-вектора.
3. Знайдіть показання амперметра, по якому протікає зазначений струм.

4.2 Коло синусоїдного струму з резистором

Складемо принципову електричну схему кола з резистором (рис.4.10).

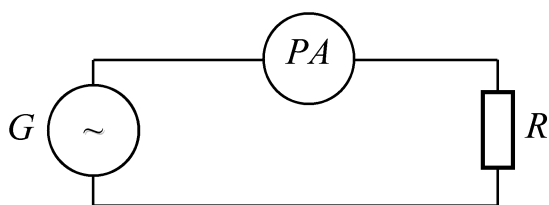


Рис.4.10

G – генератор синусоїдної е.р.с.;
 PA – амперметр;
 R – резистор.

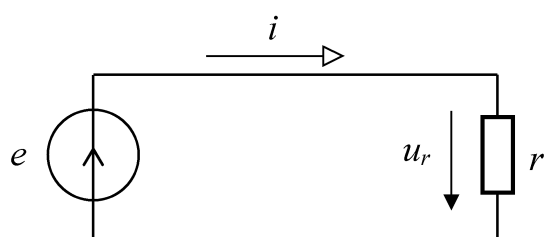


Рис.4.11

Приймаємо генератор ідеальним (який не має активного опору та індуктивності), опором амперметра і з'єднувальних проводів нехтуємо і складаємо розрахункову схему цього кола: у генераторі індуктується е.р.с., у колі протікає струм, у резисторі спостерігається теплова дія струму, яку враховуємо за допомогою активного опору r (рис.4.11).

Нехай миттєве значення е.р.с. описується наступним виразом:

$$e = E_m \cdot \sin \omega t. \quad (4.16)$$

Напруга на затискачах генератора буде залежати від е.р.с. і запишеться так:

$$u_r = e; \quad (4.17)$$

$$u_r = U_{rm} \cdot \sin \omega t; \quad (4.18)$$

$$U_{rm} = E_m. \quad (4.19)$$

Миттєвий струм у колі відповідно до закону Ома для замкненого кола:

$$i = \frac{e}{r}; \quad (4.20)$$

або

$$i = \frac{u_r}{r}. \quad (4.21)$$

Підставляємо (4.18) у (4.21) і отримаємо:

$$i = \frac{U_{rm}}{r} \sin \omega t = I_m \sin \omega t, \quad (4.22)$$

де

$$I_m = \frac{U_{rm}}{r}. \quad (4.23)$$

Вираз (4.23) являє собою математичний запис закону Ома для ділянки кола з активним опором для амплітудних значень. Якщо поділити (4.23) на $\sqrt{2}$ то отримаємо математичний запис закону Ома для ділянки кола з активним опором для діючих значень:

$$I = \frac{U_r}{r}. \quad (4.24)$$

Покажемо напругу і струм у колі з резистором (на ділянці кола з активним опором) графічно (рис.4.12).

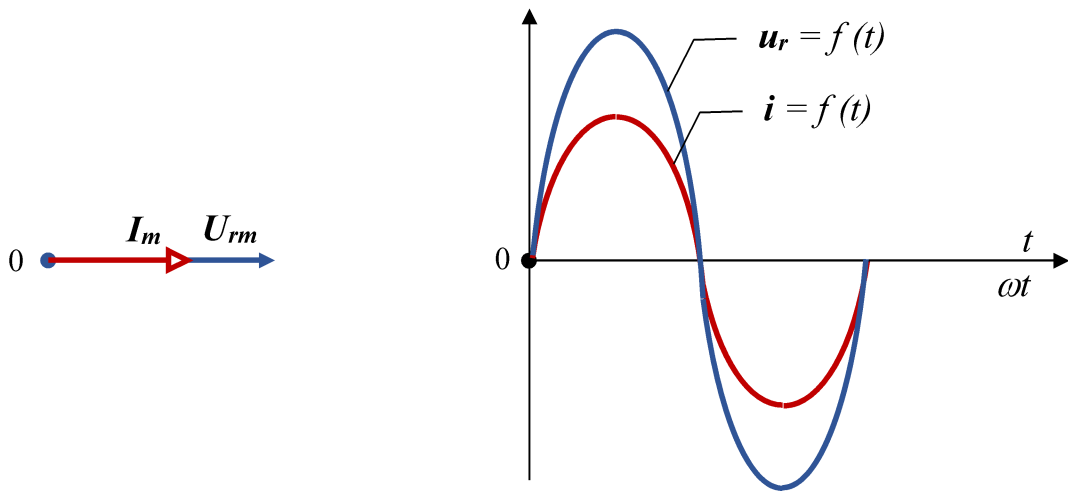


Рисунок 4.12 – Векторна діаграма та синусоїди напруги і струму на ділянці кола з активним опором

Як видно з рис.4.10 амплітуди напруги і струму наступають одночасно, тобто напруга і струм співпадають за фазою. Уведемо поняття **кута зсуву фаз**, під яким будемо розуміти абсолютне значення різниці початкових фаз напруги і струму:

$$\varphi = |\psi_{ur} - \psi_i|, \quad (4.25)$$

де φ – кут зсуву фаз, *рад (градус)*;
 ψ_{ur} – початкова фаза напруги, *рад (градус)*;
 ψ_i – початкова фаза струму, *рад (градус)*.

Уведемо поняття **активної потужності**, під якою будемо розуміти середнє значення миттєвої потужності за період, тобто

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u_r i \, dt. \quad (4.26)$$

Підставивши (4.18) і (4.22) у (4.26) і перетворивши, отримаємо:

$$P = r \cdot I^2. \quad (4.27)$$

$$[P] = \text{Вт}.$$

Вимірюють активну потужність за допомогою ватметра.

Приклад 4.3

До резистора підведена напруга $u_r = 141 \sin(\omega t - 30^\circ)$ В. Активний опір резистора дорівнює **100 Ом**.

Виконати аналіз ділянки кола.

Розв'язок.

1. Визначаємо амплітуду струму за (4.23):

$$I_m = \frac{141}{100} = 1,41 \text{ A.}$$

2. Визначаємо початкову фазу струму:

$$\psi_i = \psi_{ur} = -30^\circ.$$

3. Записуємо вираз миттєвого струму:

$$i = 1,41 \sin(\omega t - 30^\circ) \text{ A.}$$

4. Визначаємо діюче значення струму за (4.13):

$$I = \frac{1,41}{\sqrt{2}} = 1 \text{ A.}$$

5. Визначаємо активну потужність за (4.27):

$$P = 100 \cdot 1^2 = 100 \text{ Вт.}$$

Запитання для самоконтролю

1. Опишіть фізичні явища, які спостерігаються в резисторі в колі синусоїдного струму.
2. Складіть розрахункову схему кола з ідеальним генератором і резистором.
3. Запишіть математичний зв'язок між миттєвою синусоїдною напругою, миттєвим синусоїдним струмом і активним опором.
4. Сформулюйте і математично запишіть закон Ома для максимальних і діючих значень синусоїдних напруги і струму на ділянці кола з резистором.
5. Запишіть математичний вираз миттєвої синусоїдної напруги на активному опорі, прийнявши, що початкова фаза дорівнює нулю.
6. Запишіть математичний вираз миттєвого синусоїдного струму в активному опорі для зазначеної вище напруги.
7. Побудуйте графічно оригінали миттєвих синусоїдних напруги і струму на ділянці кола з резистором.
8. Зобразіть синусоїдні напругу і струм за допомогою векторів.
9. Що розуміється під кутом зсуву фаз? Чому він дорівнює на ділянці кола з резистором?
10. Що розуміється під активною потужністю? Як її розрахувати в резисторі? Укажіть її одиницю. Яким приладом можна вимірити значення активної потужності?

Завдання для самоконтролю

До резистора підведена напруга $u_r = 282 \sin(\omega t + 50^\circ) \text{ В}$.
Активний опір резистора $r = 10 \text{ Ом}$.

1. Записати вираз миттєвого струму.
2. Знайти активну потужність у резисторі.
3. Побудувати векторну діаграму кола.

4.3 Коло синусоїдного струму з ідеальною котушкою

Розглянемо ідеальну котушку без феромагнітного осердя. Під ідеальною котушкою будемо розуміти таку, у якій активний опір дорівнює нулю. Включимо її в коло з ідеальним генератором синусоїдної е.р.с. (рис.4.13).

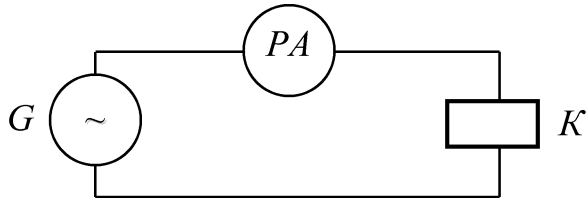


Рис.4.13

G – генератор синусоїдної е.р.с.;
 PA – амперметр;
 K – котушка.

Складемо розрахункову схему кола, нехтуючи опором амперметра і з'єднувальних проводів: генератор виробляє синусоїдну е.р.с. e , під дією якої у котушці протікає синусоїдний струм i , який створює у котушці змінне магнітне поле (рис.4.14). Змінне магнітне поле, створення якого врахуємо за допомогою індуктивності L , пронизує котушку, внаслідок чого у ній спостерігається явище електромагнітної індукції (самоіндукції) і в котушці виникає е.р.с. самоіндукції e_L (рис.4.15).

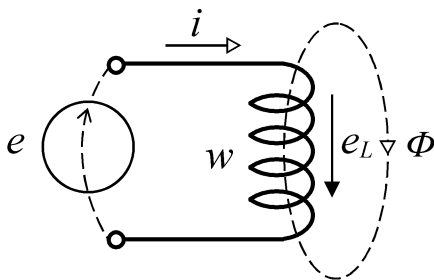


Рис.4.14

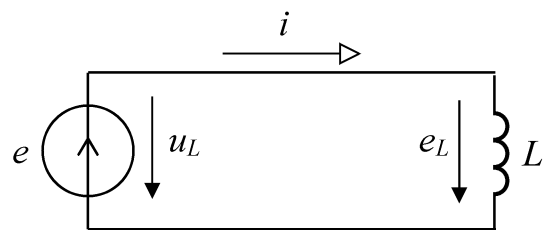


Рис.4.15

Запишемо рівняння електричної рівноваги кола за другим законом Кірхгофа:

$$e + e_L = 0, \quad (4.28)$$

$$e = u_L, \quad (4.29)$$

тоді
$$u_L = -e_L. \quad (4.30)$$

Е.р.с. самоіндукції, яка наводиться в котушці, залежить від кількості витків котушки і швидкості зміни магнітного потоку та згідно (4.2) запишеться так:

$$e_L = -w \frac{d\Phi}{dt}. \quad (4.31)$$

З урахуванням (4.1) можемо записати (4.31) в іншому вигляді:

$$e_L = -L \frac{di}{dt}. \quad (4.32)$$

Підставляємо (4.32) у (4.30) і отримуємо:

$$u_L = L \frac{di}{dt}. \quad (4.33)$$

Отриманий вираз встановлює зв'язок між напругою і струмом в індуктивності.

Заданою струмом у колі

$$i = I_m \sin \omega t \quad (4.34)$$

і знайдемо, якою повинна бути напруга на затискачах генератора при такому струмі:

$$u_L = L \frac{di}{dt} = L \frac{dI_m \sin \omega t}{dt} = L \cdot I_m \frac{d \sin \omega t}{dt} = L \cdot I_m (\omega \cdot \cos \omega t) = \quad (4.35)$$

$$= \omega L \cdot I_m \cos \omega t = \omega L \cdot I_m \sin(\omega t + 90^\circ) = U_{Lm} \sin(\omega t + 90^\circ), \quad (4.36)$$

де $U_{Lm} = \omega L \cdot I_m$.

Величину ωL позначимо x_L і назвемо реактивним опором котушки (або **індуктивним опором**), тобто

$$x_L = \omega \cdot L. \quad (4.37)$$

Перевіримо одиницю цього опору:

$$[x_L] = \frac{1}{c} \cdot \Gamma_H = \frac{1}{c} \cdot \text{Ом} \cdot c = \text{Ом}.$$

Індуктивний опір обумовлений наявністю е.р.с. самоіндукції, яка у будь-який момент часу протидіє зміні струму.

Запишемо закон Ома для ділянки кола з індуктивністю для максимальних значень, виходячи з виразів (4.36) і (4.37):

$$I_m = \frac{U_{Lm}}{x_L}, \quad (4.38)$$

та для діючих значень:

$$I = \frac{U_L}{x_L}. \quad (4.39)$$

Представимо графічно напругу і струм в індуктивності (рис.4.16).

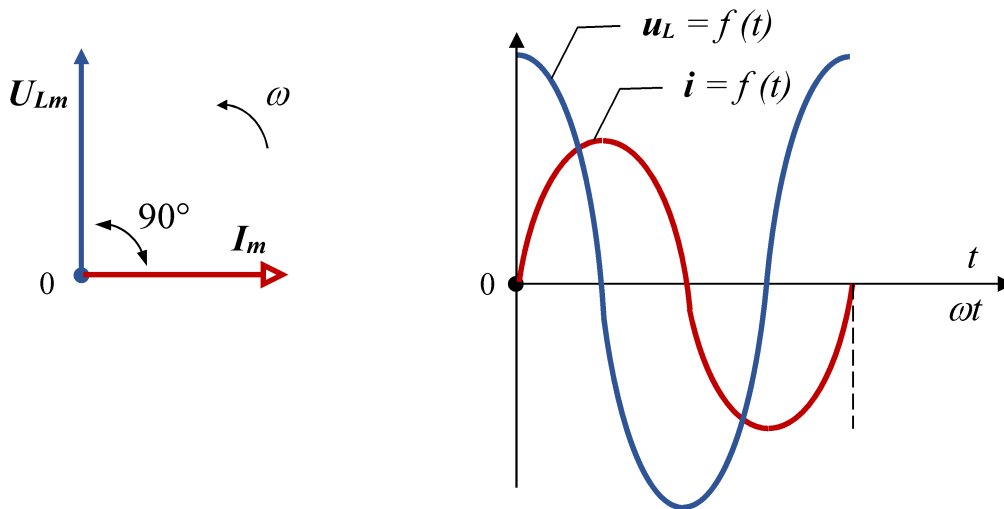


Рисунок 4.16 – Векторна діаграма та синусоїди напруги і струму на ділянці кола з індуктивністю

Знайдемо кут зсуву фаз між напругою і струмом в індуктивності:

$$\varphi = |\psi_u - \psi_i| = |90^\circ - 0| = 90^\circ.$$

Таким чином, струм в індуктивності відстає від напруги за фазою на кут 90° , що обумовлено дією е.р.с. самоіндукції.

Потужність, що йде на створення магнітного поля в індуктивності, позначили Q_L і назвали реактивною потужністю котушки (або **індуктивною потужністю**):

$$Q_L = x_L \cdot I^2, \quad (4.40)$$

$$[Q_L] = \text{вар.}$$

Приклад 4.4

До ідеальної котушки підведена напруга $u_L = 141 \sin(\omega t + 73^\circ)$ В. Частота струму в мережі дорівнює **50 Гц**. Індуктивність котушки дорівнює **12,7 мГн**. Виконати аналіз ділянки кола.

Розв'язок.

1. Визначаємо індуктивний опір котушки за (4.37) і (4.10):

$$x_L = 2\pi \cdot 50 \cdot 12,7 \cdot 10^{-3} = 4 \text{ Ом.}$$

2. Визначаємо амплітуду струму за (4.38):

$$I_m = \frac{141}{4} = 35,25 \text{ А.}$$

3. Визначаємо початкову фазу струму:

$$\psi_i = \psi_u - 90 = 73 - 90 = -17^\circ.$$

4. Записуємо вираз миттєвого струму:

$$i = 35,25 \sin(\omega t - 17^\circ) \text{ А.}$$

5. Визначаємо діюче значення струму за (4.13):

$$I = \frac{35,25}{\sqrt{2}} = 25 \text{ А.}$$

6. Визначаємо реактивну потужність за (4.40):

$$Q_L = 4 \cdot 25^2 = 2500 \text{ вар} = 2,5 \text{ квар.}$$

Запитання для самоконтролю

1. Опишіть фізичні явища, які спостерігаються в ідеальній котушці в колі синусоїдного струму.
2. Складіть розрахункову схему кола з ідеальним генератором та ідеальною котушкою.
3. Запишіть математичний зв'язок між миттєвою синусоїдною напругою, миттєвим синусоїдним струмом і індуктивністю в ідеальній котушці.
4. Поясніть фізичну суть індуктивного опору. Як розрахувати індуктивний опір ідеальної котушки? Яка його одиниця?
5. Сформулюйте і математично запишіть закон Ома для максимальних і діючих значень синусоїдних напруги і струму на ділянці кола з індуктивністю.
6. Запишіть математичний вираз миттєвого синусоїдного струму в індуктивності, прийнявши, що його початкова фаза дорівнює нулю.
7. Запишіть математичний вираз миттєвої синусоїдної напруги на індуктивності для зазначеного вище струму.
8. Побудуйте графічно оригінали миттєвої напруги і миттєвого струму на ділянці кола з індуктивністю.
9. Зобразіть синусоїдні напругу і струм на ділянці кола з індуктивністю за допомогою векторів.
10. Чому дорівнює кут зсуву фаз в індуктивності?
11. Чому дорівнює активна потужність в індуктивності?

12. Як розрахувати реактивну потужність в індуктивності? Укажіть її одиницю.
 13. Поясніть фізичну суть реактивної потужності в індуктивності.

Завдання для самоконтролю

До ідеальної котушки підведена напруга $u_L = 141 \sin(\omega t + 60^\circ) \text{ В}$. Індуктивність котушки дорівнює **25,4 мГн**. Частота струму в колі $f = 50 \text{ Гц}$.

1. Знайти реактивний опір котушки.
2. Записати вираз миттєвого струму.
3. Знайти реактивну потужність.
4. Побудувати векторну діаграму кола.

4.4 Реальна котушка в колі синусоїдного струму

Включимо котушку без феромагнітного осердя в коло синусоїдного струму. Генератор приймаємо ідеальним, опорами з'єднувальних проводів знехтуємо. У котушці спостерігаються наступні фізичні явища і процеси:

- під дією змінної синусоїдної е.р.с. джерела в котушці протікає змінний синусоїдний струм;
- спостерігається теплова дія змінного струму і котушка нагрівається;
- змінний синусоїдний струм створює змінне магнітне поле, яке пронизує цю ж котушку – спостерігається явище електромагнітної індукції (самоіндукції) і в котушці наводиться е.р.с. самоіндукції.

Складемо розрахункову схему кола котушки (рис.4.17).

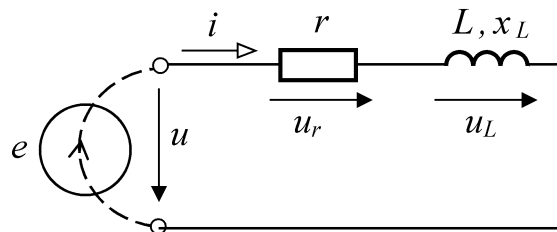


Рисунок 4.17 – Розрахункова схема електричного кола котушки

Запишемо рівняння електричної рівноваги для цього кола:

$$u = u_r + u_L; \quad (4.41)$$

$$u = r \cdot i + L \frac{di}{dt}. \quad (4.42)$$

Задамося струмом у колі

$$i = I_m \sin \omega t \quad (4.43)$$

і знайдемо, якою повинна бути в цьому випадку прикладена напруга u , для чого підставимо (4.43) в (4.42) і з урахуванням (4.22) та (4.35) отримаємо:

$$u = rI_m \sin \omega t + L \frac{dI_m \sin \omega t}{dt} = r \cdot I_m \sin \omega t + x_L \cdot I_m \sin(\omega t + 90^\circ). \quad (4.44)$$

Позначимо згідно (4.23) і (4.39)

$$U_{rm} = r \cdot I_m; \quad (4.45)$$

$$U_{Lm} = x_L \cdot I_m, \quad (4.46)$$

і перепишемо рівняння (4.44) у наступному вигляді:

$$u = U_{rm} \sin \omega t + U_{Lm} \sin(\omega t + 90^\circ). \quad (4.47)$$

Запишемо миттєву прикладену напругу в загальному вигляді:

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_u). \quad (4.48)$$

Побудуємо векторну діаграму струму і напруг цього кола (рис.4.18).

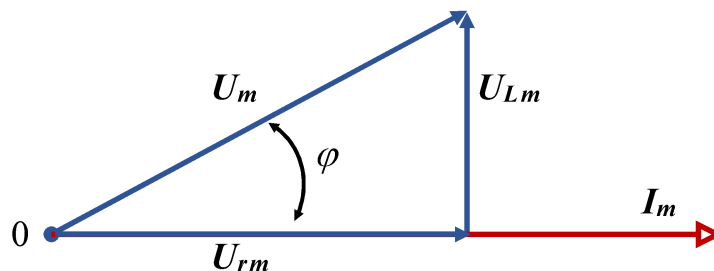


Рисунок 4.18 – Векторна діаграма електричного кола котушки

Таким чином, у цьому колі напруга випереджає струм за фазою на кут зсуву фаз φ , тобто $\psi_u = \psi_i + \varphi$ і миттєва напруга на затискачах кола запишеться так:

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_i + \varphi), \quad (4.49)$$

а через те, що в даному випадку $\psi_i = 0$, то $\psi_u = \varphi$.

Розглянемо трикутник напруг на векторній діаграмі (рис.4.19).

Запишемо вирази сторін трикутника:

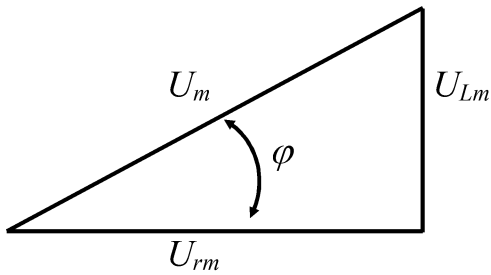


Рис.4.19

$$U_{rm} = r \cdot I_m; \quad (4.50)$$

$$U_{Lm} = x_L \cdot I_m; \quad (4.51)$$

$$U_m = z \cdot I_m, \quad (4.52)$$

де r – активний опір котушки, Ом;

x_L – реактивний опір котушки (індуктивний опір), Ом;

z – повний опір котушки (вводимо таке поняття за аналогією з r і x_L), Ом.

З (4.52) впливає математичний запис закону Ома ділянки електричного кола з реальною котушкою для максимальних значень:

$$I_m = \frac{U_m}{z}, \quad (4.53)$$

і для діючих значень:

$$I = \frac{U}{z}. \quad (4.54)$$

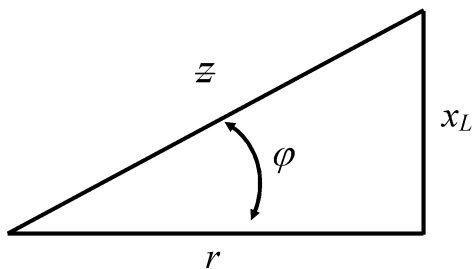


Рис.4.20

Розділимо сторони трикутника напруг на I_m і отримаємо трикутник опорів (рис.4.20).

Як видно з рис.4.20, повний опір кола котушки змінному струму

$$z = \sqrt{r^2 + x_L^2}. \quad (4.55)$$

Кут зсуву фаз у котушці може бути знайдений через параметри котушки (r, x_L, z), наприклад:

$$\varphi = \arccos \frac{r}{z}. \quad (4.56)$$

Помножимо сторони трикутника опорів на квадрат діючого значення струму й отримаємо трикутник потужностей (рис.4.21).

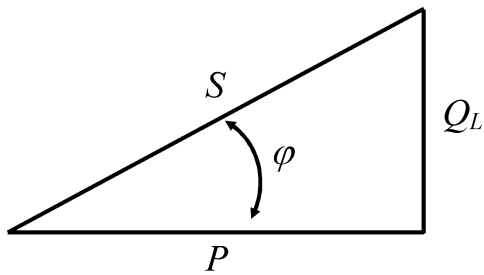


Рис.4.21

Сторони трикутника являють собою потужності:

$$\text{активну } P = rI^2, \text{ Вт}; \quad (4.57)$$

$$\text{реактивну } Q_L = x_L I^2, \text{ вар}; \quad (4.58)$$

$$\text{повну } S = z I^2, \text{ ВА}. \quad (4.59)$$

Як видно з рис.4.21, повна потужність котушки

$$S = \sqrt{P^2 + Q_L^2}. \quad (4.60)$$

З урахуванням (4.54) повна потужність буде дорівнювати:

$$S = \frac{U}{I} \cdot I^2 = U \cdot I. \quad (4.61)$$

Уведемо поняття **коефіцієнта потужності**, під яким будемо розуміти відношення активної потужності до повної.

Як видно з трикутника потужностей, коефіцієнт потужності чисельно дорівнює косинусу кута зсуву фаз, тобто:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}. \quad (4.62)$$

Таким чином, реальну котушку можна розглядати одночасно як резистор – з одного боку, і як ідеальну котушку – з іншого. Усі процеси можна описати за допомогою двох ідеальних елементів – активного опору та індуктивності, які описані в п.4.2 і 4.3.

Приклад 4.5

До реальної котушки підведена напруга $u = 282 \sin(\omega t + 70^\circ)$ В. Активний опір котушки дорівнює 3 Ом. Реактивний опір котушки дорівнює 4 Ом. Виконати аналіз кола.

Розв'язок.

1. Визначаємо повний опір кола за (4.55):

$$z = \sqrt{3^2 + 4^2} = 5 \text{ Ом}.$$

2. Визначаємо амплітуду струму за (4.53):

$$I_m = \frac{282}{5} = 56,4 \text{ А}.$$

3. Визначаємо кут зсуву фаз кола за (4.56):

$$\varphi = \arccos \frac{3}{5} \approx 53^\circ.$$

4. Визначаємо початкову фазу струму:

$$\psi_i = \psi_u - \varphi = 70 - 53 = 17^\circ.$$

5. Записуємо вираз миттєвого струму:

$$i = 56,4 \sin(\omega t + 17^\circ) \text{ A.}$$

6. Визначаємо амплітуду напруги на активному опорі за (4.50):

$$U_{rm} = 3 \cdot 56,4 = 169,2 \text{ B.}$$

7. Визначаємо початкову фазу напруги на активному опорі:

$$\psi_{ur} = \psi_i = 17^\circ.$$

8. Записуємо вираз миттєвої напруги на активному опорі:

$$u_r = 169,2 \sin(\omega t + 17^\circ) \text{ B.}$$

9. Визначаємо амплітуду напруги на індуктивному опорі за (4.51):

$$U_{Lm} = 4 \cdot 56,4 = 225,6 \text{ B.}$$

10. Визначаємо початкову фазу напруги на індуктивному опорі:

$$\psi_{uL} = \psi_i + 90 = 17 + 90 = 107^\circ.$$

11. Записуємо вираз миттєвої напруги на індуктивному опорі:

$$u_L = 225,6 \sin(\omega t + 107^\circ) \text{ B.}$$

12. Визначаємо діюче значення струму за (4.13):

$$I = \frac{56,4}{\sqrt{2}} = 40 \text{ A.}$$

13. Визначаємо активну потужність за (4.57):

$$P = 3 \cdot 40^2 = 4800 \text{ Вт} = 4,8 \text{ кВт.}$$

14. Визначаємо реактивну потужність за (4.58):

$$Q_L = 4 \cdot 40^2 = 6400 \text{ вар} = 6,4 \text{ квар.}$$

15. Визначаємо повну потужність за (4.59):

$$S = 5 \cdot 40^2 = 8000 \text{ ВА} = 8,0 \text{ кВА.}$$

16. Визначаємо коефіцієнт потужності котушки за (4.62):

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{4800}{8000} = 0,6.$$

Запитання для самоконтролю

1. Опишіть фізичні явища, які спостерігаються в реальній котушці в колі синусоїдного струму.

2. Складіть розрахункову схему кола з ідеальним генератором і реальною котушкою.
3. Складіть рівняння електричної рівноваги кола синусоїдного струму з реальною котушкою.
4. Запишіть вираз миттєвого синусоїдного струму в колі, прийнявши, що його початкова фаза дорівнює нулю.
5. Отримайте вираз миттєвої синусоїдної напруги на затискачах кола, підставивши в рівняння електричної рівноваги вираз миттєвого синусоїдного струму в колі.
6. Побудуйте векторну діаграму синусоїдного струму і напруг кола (для діючих значень).
7. Запишіть вираз миттєвої синусоїдної напруги на затискачах кола, використовуючи векторну діаграму, з урахуванням кута зсуву фаз.
8. Отримайте з векторної діаграми і побудуйте трикутник діючих значень напруг котушки.
9. Перетворіть трикутник напруг у трикутник опорів, використовуючи закон Ома.
10. Установіть зв'язок між параметрами реальної котушки, використовуючи трикутник опорів.
11. Як розрахувати кут зсуву фаз реальної котушки за допомогою її параметрів?
12. Отримайте з трикутника опорів трикутник потужностей і побудуйте його.
13. Установіть зв'язок між потужностями реальної котушки, використовуючи трикутник потужностей.
14. Дайте визначення коефіцієнта потужності реальної котушки.
15. Запишіть і розшифруйте визначальну формулу коефіцієнта потужності реальної котушки.

Завдання для самоконтролю

Котушка з параметрами $r = 3 \text{ Ом}$ і $L = 12,7 \text{ мГн}$ підключена до джерела синусоїдної напруги $u = 282 \sin(\omega t + 70^\circ) \text{ В}$. Частота струму в колі дорівнює **50 Гц**.

1. Знайти індуктивний опір котушки.
2. Знайти повний опір котушки.
3. Знайти кут зсуву фаз котушки.
4. Знайти амплітуду струму в котушці.
5. Записати вираз миттєвого струму в котушці.
6. Знайти амплітуду напруги на активному опорі.
7. Знайти початкову фазу напруги на активному опорі.
8. Записати вираз миттєвої напруги на активному опорі.
9. Знайти амплітуду напруги на індуктивності.
10. Знайти початкову фазу напруги на індуктивності.
11. Записати вираз миттєвої напруги на індуктивності.
12. Побудувати векторну діаграму напруг і струму кола.
13. Знайти активну потужність котушки.
14. Знайти реактивну потужність котушки.
15. Знайти повну потужність котушки.
16. Знайти коефіцієнт потужності котушки.

Тема 5 СИМЕТРИЧНІ НЕРОЗГАЛУЖЕНІ ТРИФАЗНІ КОЛА СИНУСОЇДНОГО СТРУМУ

5.1 Трифазний генератор

Трифазним генератором називають пристрій, який перетворює механічну енергію обертового валу в електричну енергію трифазного струму. Трифазний генератор має дві основні частини: статор (зовнішня нерухома частина) і ротор (внутрішня рухома частина). На статорі є магнітопровід з пазами, у яких розміщуються три самостійні обмотки, осі яких зсунені одна щодо іншої в просторі на 120° . Обмотки виконані з проводу однакової довжини, перерізу і матеріалу. Ротор теж має магнітопровід, на якому розміщується обмотка (рис.5.1).

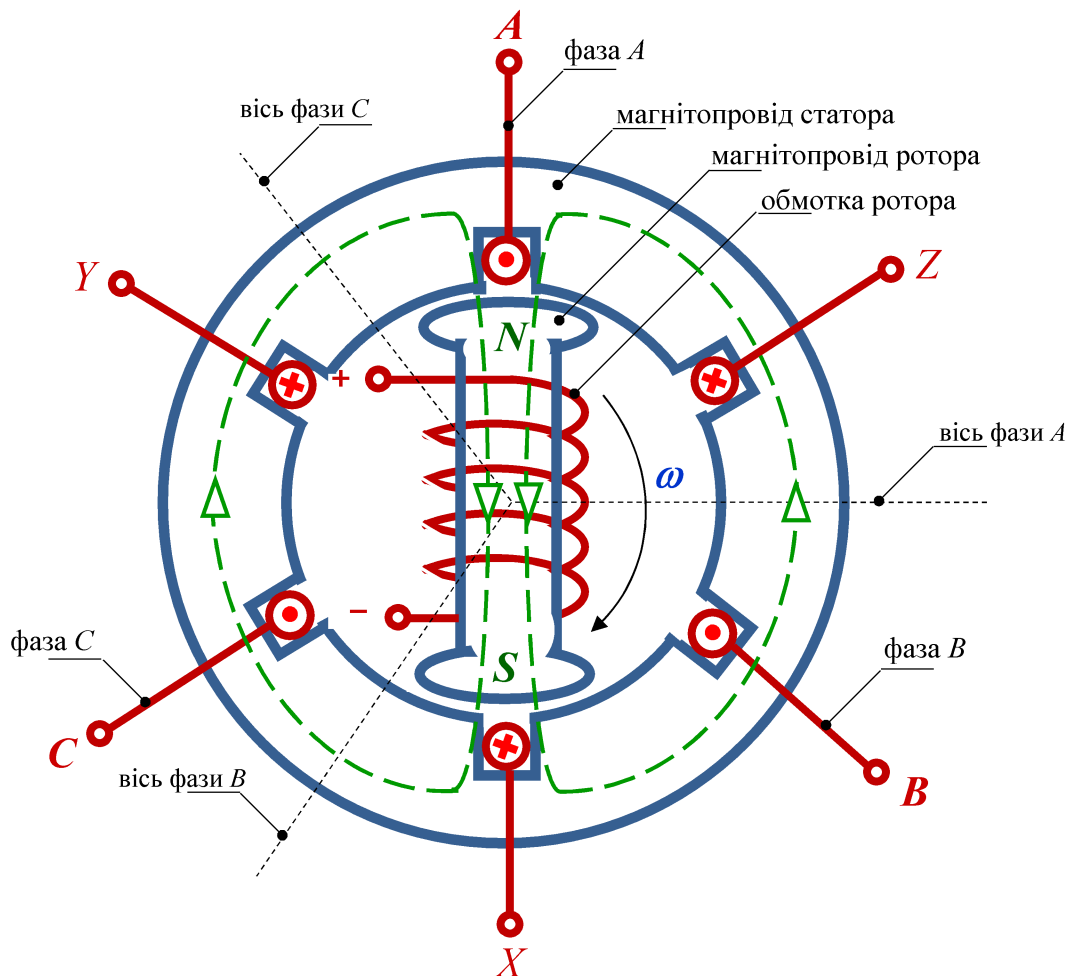


Рисунок 5.1 – Конструктивна схема трифазного генератора

При подачі постійної напруги на затискачі обмотки ротора у ній виникає постійний електричний струм, навколо якого створюється магнітне поле. При обертанні ротора стороннім агрегатом (турбіною, тепловим двигуном, тощо) разом із ротором обертається і створене його струмом магні-

тне поле. Це призводить до того, що по відношенню до обмоток статора магнітний потік цього поля стає змінним. Тому у обмотках статора, які пронизуються цим магнітним потоком, наводяться змінні синусоїдні електрорушійні сили. Оскільки е.р.с. в обмотках досягають максимальних значень, коли осі обмоток і полюсів ротора збігаються, то зсув за фазою між трьома е.р.с. становить 120° . Окремі обмотки генератора одержали назву **фаз**, а сам генератор за кількістю фаз називається **трифазним**.

Аналітичні вирази **миттєвих значень е.р.с.** окремих фаз будуть мати при цьому такий вигляд:

$$e_A = E_{Am} \sin \omega t ; \quad (5.1)$$

$$e_B = E_{Bm} \sin(\omega t - 120^\circ); \quad (5.2)$$

$$e_C = E_{Cm} \sin(\omega t - 240^\circ). \quad (5.3)$$

Зобразимо електрорушійні сили графічно (рис.5.2).

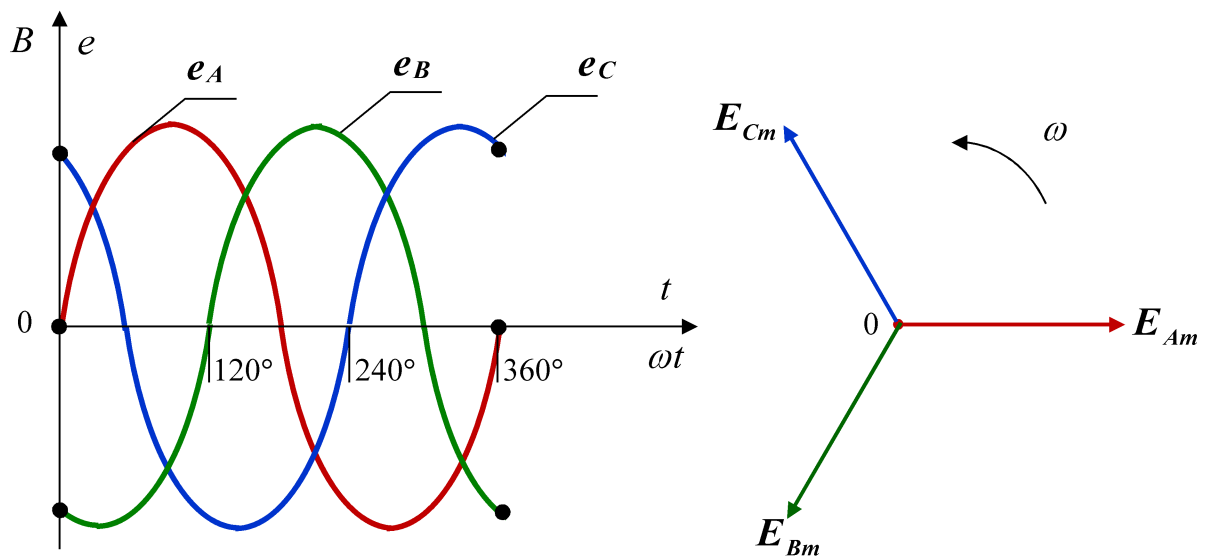


Рисунок 5.2 – Симетрична трифазна система електрорушійних сил

Приклад 5.1

Діюче значення фазної е.р.с. дорівнює **220 В**.

Записати миттєві значення фазних е.р.с., прийнявши $\psi_{eA} = 10^\circ$.

Розв'язок.

1. Максимальне значення фазної е.р.с.:

$$E_{\phi m} = \sqrt{2} \cdot E_{\phi};$$

$$E_{\phi m} = \sqrt{2} \cdot 220 = 310 \text{ В}.$$

2. Миттєві значення фазних е.р.с.:

$$e_A = 310 \sin(\omega t + 10^\circ) \text{ В};$$

$$e_B = 310 \sin(\omega t - 110^\circ) \text{ В};$$

$$e_C = 310 \sin(\omega t - 230^\circ) \text{ В}.$$

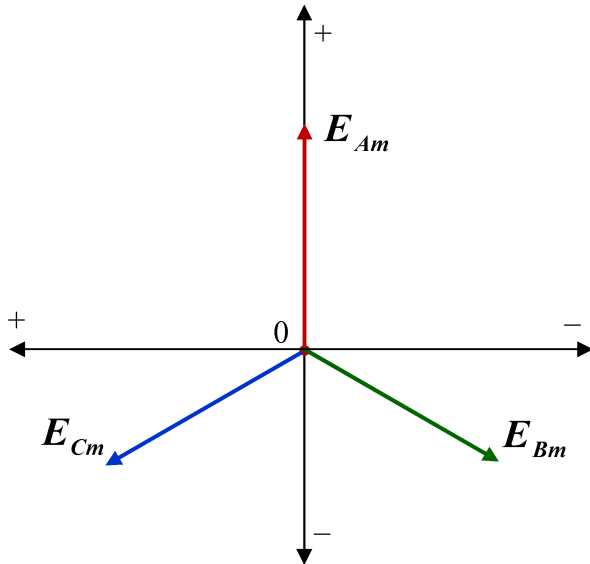


Рис.5.3

Побудуємо вектори е.р.с. на площині, осі якої зсуємо на 90° проти годинникової стрілки (рис.5.3).

Система трьох е.р.с., однакових за величиною і зсунених за фазою одна щодо іншої на 120° , називається **симетричною трифазною системою е.р.с.** Сума миттєвих значень фазних е.р.с. у будь-який момент часу дорівнює нулю, що видно з векторної діаграми (рис.5.3).

Трифазний генератор, у якого при роботі в фазах створюється симетрична трифазна система е.р.с., називається **симетричним трифазним генератором.**

Запитання для самоконтролю

1. Яке явище лежить в основі принципу дії трифазного генератора змінного синусоїдного струму?
2. З яких основних частин складається трифазний генератор?
3. Що розуміється під фазою генератора?
4. Складіть конструктивну схему трифазного генератора.
5. Опишіть будову трифазного генератора.
6. Опишіть принцип дії трифазного генератора.
7. Запишіть вирази миттєвих фазних е.р.с., прийнявши, що початкова фаза е.р.с. фази *A* дорівнює 40° .
8. Зобразіть векторами на площині фазні е.р.с. з п.7.
9. Що називають симетричною трифазною системою е.р.с.?
10. Яку властивість має симетрична трифазна система е.р.с.?
11. Який трифазний генератор називають симетричним?

5.2 Трифазні системи

При роботі генератора у кожній його фазі спостерігаються такі фізичні явища: електромагнітної індукції (взаємної індукції та самоіндукції),

електричного струму, електромагнетизму, теплової дії струму. Тому розрахункова схема окремої фази генератора (наприклад, фази A) має вигляд, зображений на рис.5.4. Але частіше її показують так, як зображено на рис.5.5.

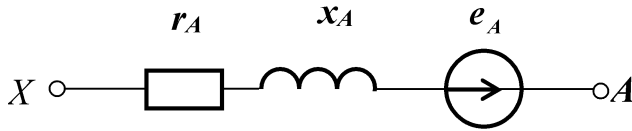


Рис.5.4

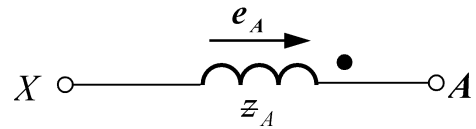


Рис.5.5

На цих схемах r , x_A , z_A – відповідно активний, реактивний і повний опори обмотки.

Кожну фазу (обмотку) трифазного генератора можна з'єднати з окремим споживачем електричної енергії (фазою навантаження), як показано на рис.5.6. У цьому випадку створюється **незв'язана трифазна система** з трьома самостійними колами і шістьма проводами. Така система неекономічна і тому не знайшла застосування.

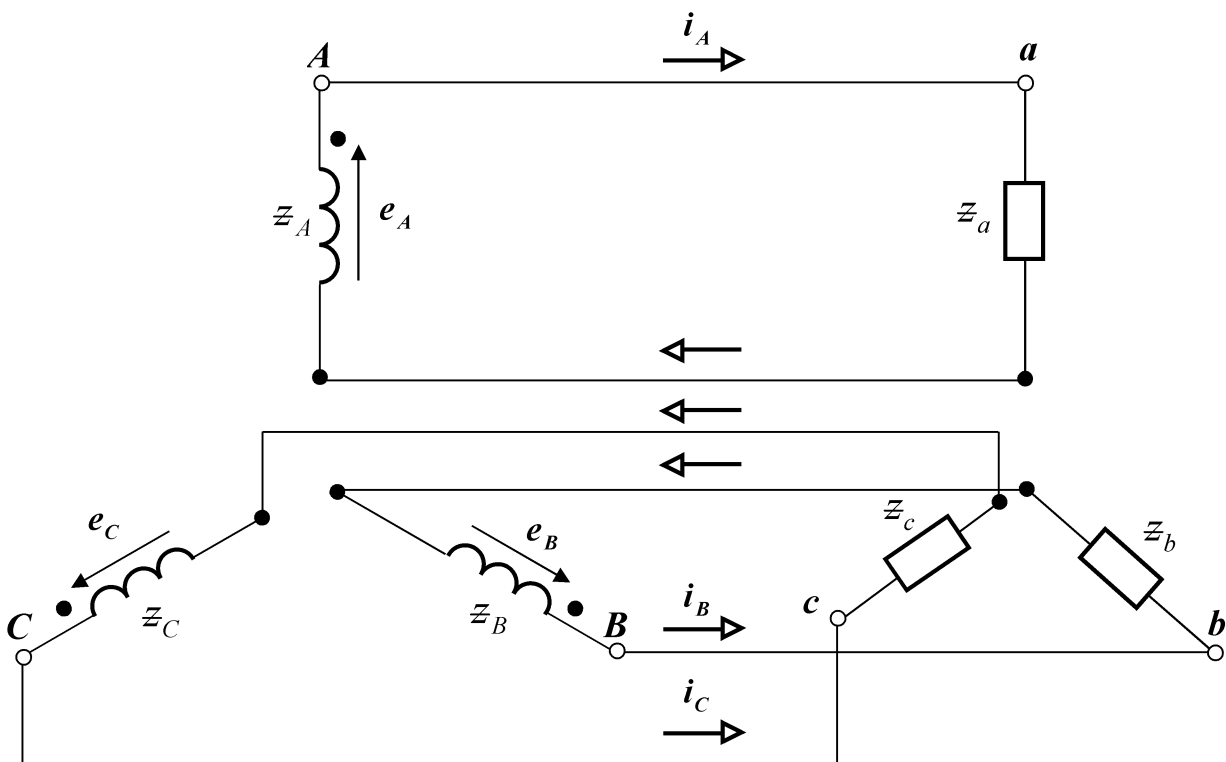


Рисунок 5.6 – Розрахункова схема незв'язаної трифазної системи

Три фази генератора або три фази навантаження можна з'єднати за схемою **зірки**, при цьому однойменні затискачі фаз генератора або фаз навантаження поєднуються в один вузол. Цей вузол називають нульовою (нейтральною) точкою (рис.5.7).

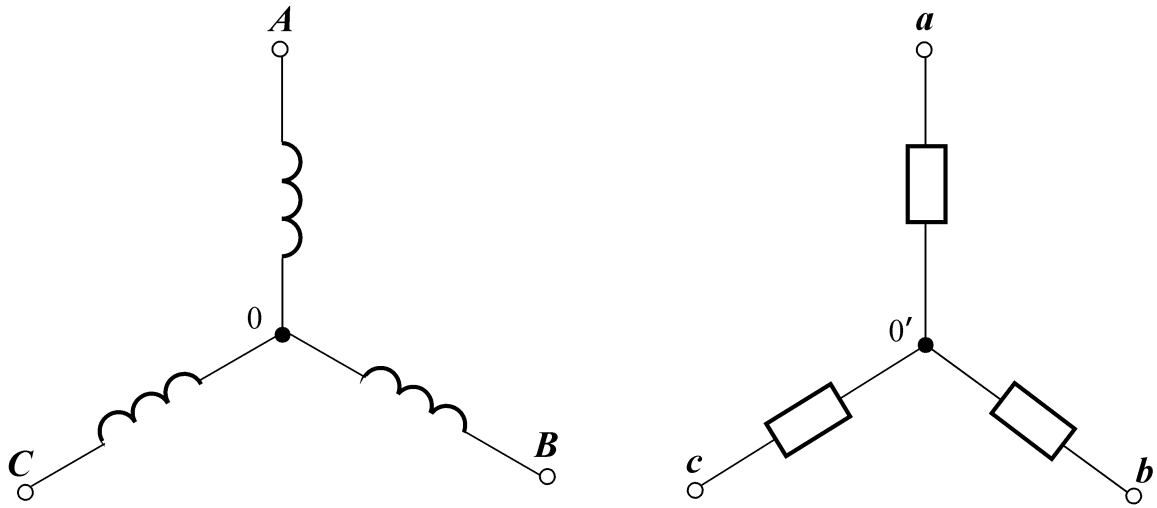


Рисунок 5.7 – Принципові електричні схеми фаз джерела і навантаження, з'єднаних зіркою

Якщо фази генератора і навантаження, які з'єднані за схемою зірки, поєднати між собою, то створиться *зв'язана трифазна чотирипровідна система* (рис.5.8).

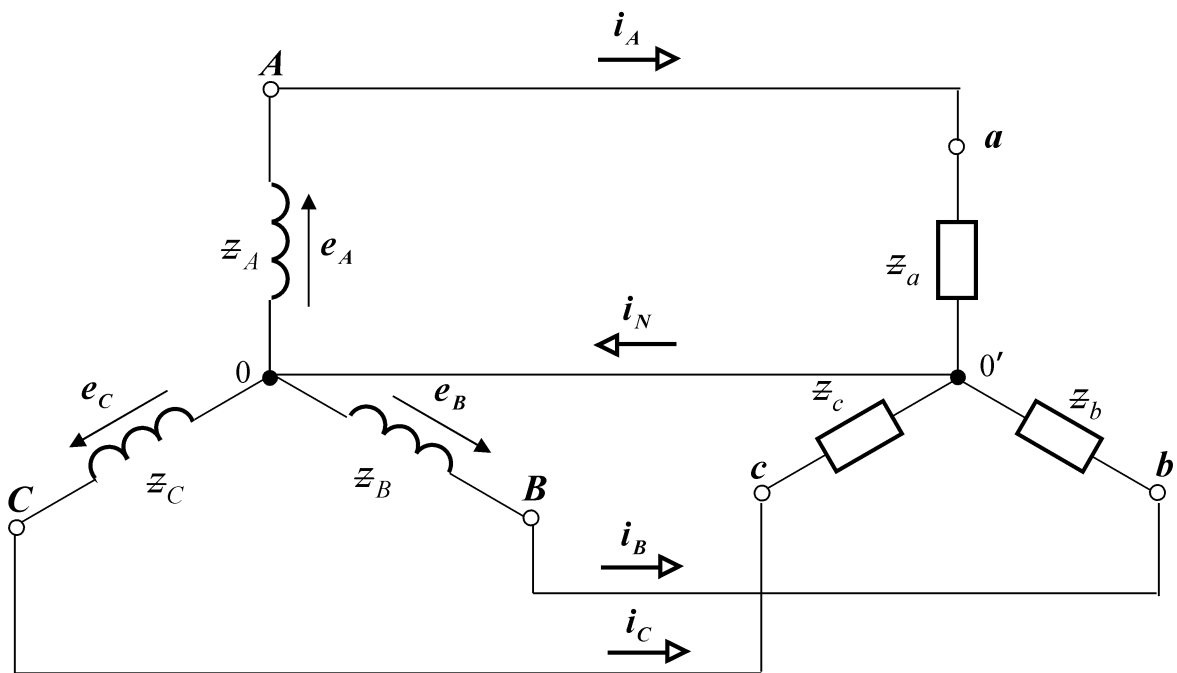


Рисунок 5.8 – Розрахункова схема зв'язаної трифазної чотирипровідної системи «зірка – зірка з нулем»

Три проводи, що з'єднують початки фаз генератора і навантаження, називаються *лінійними*, а четвертий, який з'єднує нульові точки генератора і навантаження, називається *нульовим (нейтральним) проводом*. Відповідно струм, що проходить по лінійному проводу, називається *лінійним струмом*, а по нульовому (нейтральному) проводу – *нульовим (нейтральним) струмом*.

Під дією симетричної трифазної системи е.р.с. генератора e_A, e_B, e_C виникає симетрична трифазна система лінійних струмів i_A, i_B, i_C . Тому сума миттєвих значень лінійних струмів у будь-який момент часу теж дорівнює нулю.

Відповідно до першого закону Кірхгофа нульовий (нейтральний) струм

$$i_N = i_A + i_B + i_C. \quad (5.4)$$

Звідси випливає, що в симетричному трифазному колі нульовий (нейтральний) струм дорівнює нулю. Тому нульовий (нейтральний) провід в такому колі застосовують тільки для приєднання до джерела однофазних споживачів. Причому, потужність однофазних споживачів повинна бути рівномірна розподілена між фазами джерела.

Три фази генератора або три фази навантаження можна з'єднати за схемою **трикутника**: кінець першої фази з'єднується з початком другої і так далі до утворення замкненого контуру (рис.5.9).

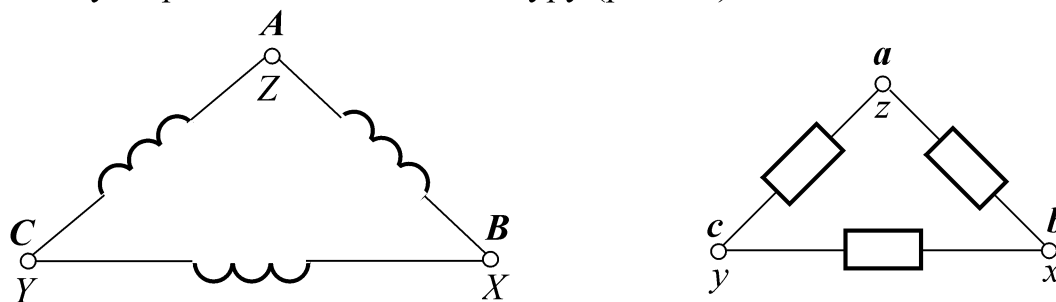


Рисунок 5.9 – Принципові електричні схеми фаз джерела і навантаження, з'єднаних трикутником

Якщо фази генератора і навантаження, які з'єднані за схемою трикутника, поєднати між собою, то створиться зв'язана **трифазна трипровідна система** (рис.5.10).

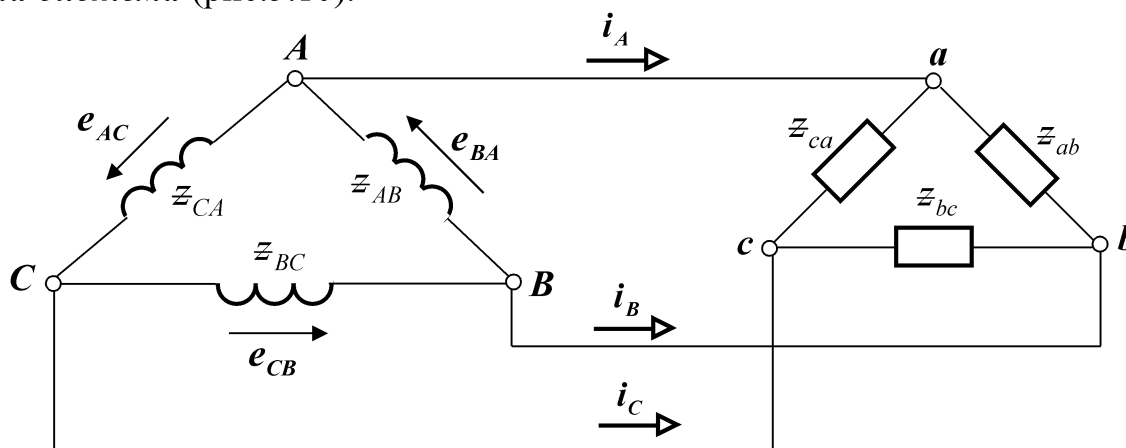


Рисунок 5.10 – Розрахункова схема зв'язаної трифазної трипровідної системи «трикутник – трикутник»

Можна також створити зв'язані трифазні трипровідні системи зі схемами з'єднання фаз генератора і навантаження: зірка – зірка, зірка – трикутник, трикутник – зірка.

Запитання для самоконтролю

1. Складіть розрахункову схему фази *A* генератора для миттєвих значень.
2. Складіть спрощену розрахункову схему фази *A* генератора для миттєвих значень.
3. Що таке незв'язана трифазна система?
4. Яку схему з'єднання фаз генератора (або навантаження) називають «зірка»?
5. Яку схему з'єднання фаз генератора (або навантаження) називають «трикутник»?
6. Що таке зв'язана трифазна система?
7. Що таке лінійний провід?
8. Що таке нульовий (нейтральний) провід?
9. Що таке лінійний струм?
10. Що таке нульовий (нейтральний) струм?
11. Приведіть приклад зв'язаної трифазної чотирипровідної системи.
12. Приведіть приклади зв'язаних трифазних трипровідних систем.

5.3 З'єднання фаз генератора зіркою

Складемо розрахункову схему генератора, фази якого з'єднані зіркою, у випадку, коли генератор не навантажений, тобто працює на холостому ході (рис.5.11).

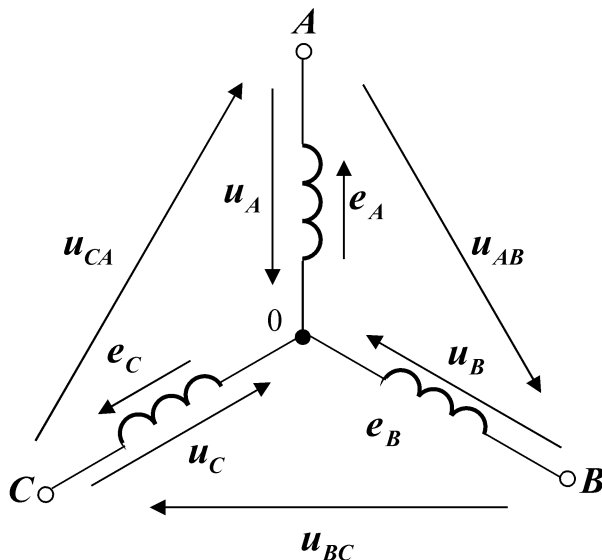


Рис.5.11

Приймемо, що потенціал точки *0* дорівнює нулю, і знайдемо потенціали точок *A*, *B* і *C*:

$$\varphi_0 = 0; \quad (5.5)$$

$$\varphi_A = e_A; \quad (5.6)$$

$$\varphi_B = e_B; \quad (5.7)$$

$$\varphi_C = e_C. \quad (5.8)$$

Різниця потенціалів між початком і кінцем фази генератора називається **фазною напругою**. Знайдемо миттєві значення фазних напруг генератора:

$$u_A = \varphi_A - \varphi_0 = e_A; \quad (5.9)$$

$$u_B = \varphi_B - \varphi_0 = e_B; \quad (5.10)$$

$$u_C = \varphi_C - \varphi_0 = e_C. \quad (5.11)$$

Різниця потенціалів між вивідними затискачами фаз генератора називається *лінійною напругою*. Знайдемо миттєві значення лінійних напруг генератора:

$$u_{AB} = \varphi_A - \varphi_B = u_A - u_B; \quad (5.12)$$

$$u_{BC} = \varphi_B - \varphi_C = u_B - u_C; \quad (5.13)$$

$$u_{CA} = \varphi_C - \varphi_A = u_C - u_A. \quad (5.14)$$

Побудуємо векторну діаграму фазних і лінійних напруг генератора (для діючих значень) на площині, прийнявши, що початкова фаза напруги на фазі А генератора дорівнює нулю (рис.5.12). З векторної діаграми випливає, що лінійні напруги випереджають фазні напруги за фазою на 30° .

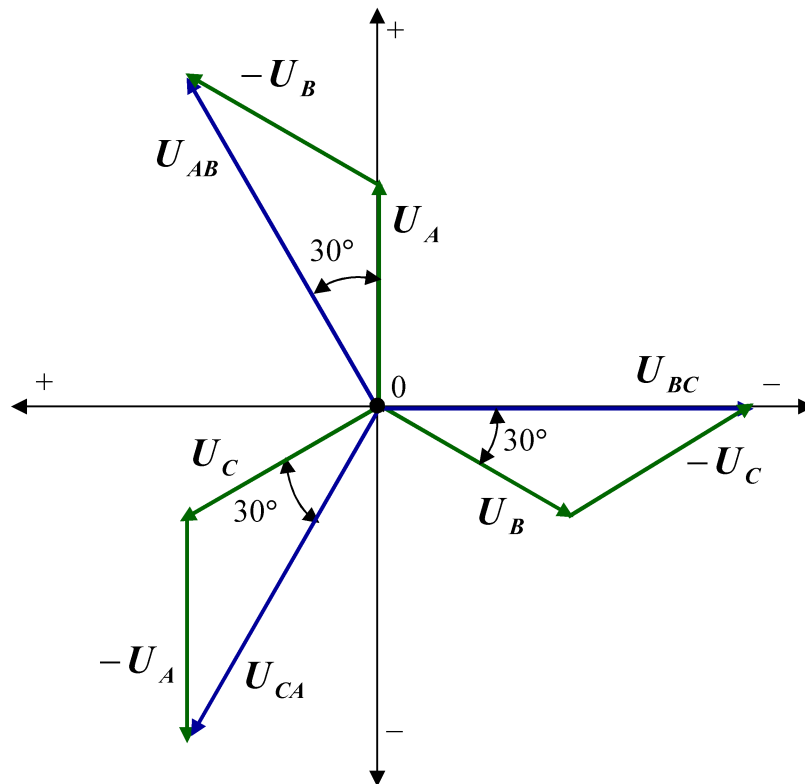


Рисунок 5.12 – Векторна діаграма фазних і лінійних напруг генератора, з'єднаного зіркою

Запишемо миттєві значення фазних і лінійних напруг генератора:

$$u_A = U_{\phi m} \sin \omega t; \quad (5.15)$$

$$u_B = U_{\phi m} \sin(\omega t - 120^\circ); \quad (5.16)$$

$$u_C = U_{\phi m} \sin(\omega t - 240^\circ); \quad (5.17)$$

$$u_{AB} = U_{\text{лm}} \sin(\omega t + 30^\circ); \quad (5.18)$$

$$u_{BC} = U_{\text{лm}} \sin(\omega t - 90^\circ); \quad (5.19)$$

$$u_{CA} = U_{\text{лm}} \sin(\omega t - 210^\circ), \quad (5.20)$$

де $U_{\phi m}$ і $U_{\text{лm}}$ – максимальні (амплітудні) значення відповідно фазних і лінійних напруг генератора, B .

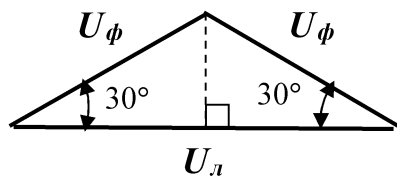


Рис.5.13

Встановимо зв'язок між діючими значеннями фазних (U_ϕ) і лінійних ($U_\text{л}$) напруг генератора, для чого розглянемо трикутник напруг (рис.5.13), який одержано з векторної діаграми.

З трикутника напруг знаходимо:

$$\frac{U_\text{л}}{2 \cdot U_\phi} = \cos 30^\circ; \quad \frac{U_\text{л}}{2 \cdot U_\phi} = \frac{\sqrt{3}}{2}; \quad \frac{U_\text{л}}{U_\phi} = \sqrt{3}; \quad U_\text{л} = \sqrt{3} \cdot U_\phi. \quad (5.21)$$

Приклад 5.2

Записати миттєві значення фазних і лінійних напруг генератора на холостому ході, якщо діюче значення фазної напруги дорівнює **220 В** і $\psi_{uA} = -20^\circ$.

Розв'язок.

1. Максимальне значення фазної напруги:

$$U_{\phi m} = \sqrt{2} \cdot U_\phi;$$

$$U_{\phi m} = \sqrt{2} \cdot 220 = 310 \text{ В}.$$

2. Миттєві значення фазних напруг:

$$u_A = 310 \sin(\omega t - 20^\circ) \text{ В};$$

$$u_B = 310 \sin(\omega t - 140^\circ) \text{ В};$$

$$u_C = 310 \sin(\omega t - 260^\circ) \text{ В}.$$

3. Максимальне значення лінійної напруги:

$$U_{\text{лн}} = \sqrt{2} \cdot U_{\text{л}};$$

$$U_{\text{лн}} = \sqrt{2} \cdot 380 = 536 \text{ В}.$$

4. Миттєві значення лінійних напруг:

$$u_{AB} = 536 \sin(\omega t + 10^\circ) \text{ В};$$

$$u_{BC} = 536 \sin(\omega t - 110^\circ) \text{ В};$$

$$u_{CA} = 536 \sin(\omega t - 240^\circ) \text{ В}.$$

Складемо розрахункову схему генератора, фази якого з'єднані зіркою, у випадку, коли генератор навантажений (рис.5.14).

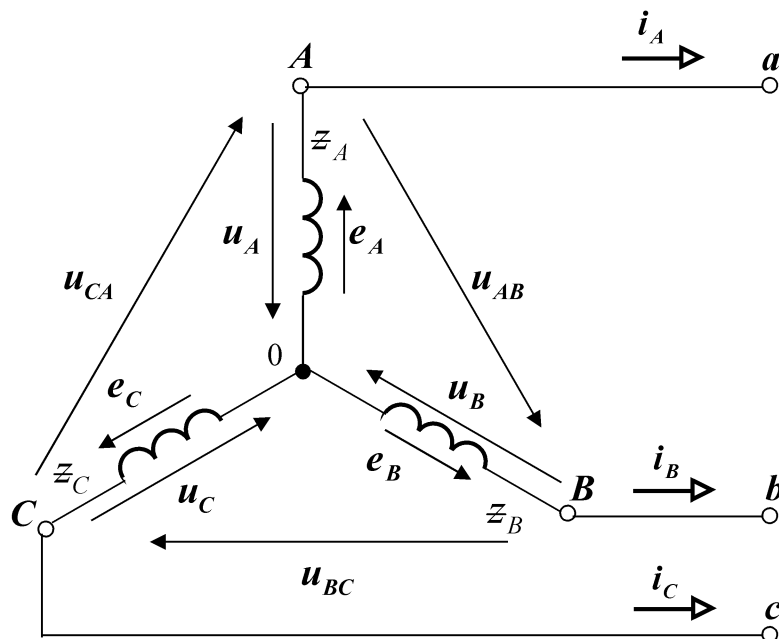


Рисунок 5.14 – Розрахункову схема генератора, з'єданого зіркою, у режимі навантаження

Введемо поняття **фазного струму**, під яким будемо розуміти струм, що проходить у фазі генератора. Як видно з розрахункової схеми, при з'єднанні фаз генератора зіркою фазний струм дорівнює лінійному струму, тобто

$$I_{\phi} = I_{\text{л}}. \quad (5.22)$$

Запитання для самоконтролю

1. Як з'єднуються фази генератора за схемою зірки?
2. Складіть розрахункову схему генератора при з'єднанні зіркою для миттєвих значень.
3. Що таке фазна напруга генератора?
4. Запишіть вирази миттєвих фазних напруг при холостому ході генератора і з'єднанні його фаз зіркою.
5. Що таке лінійна напруга генератора?

6. Запишіть вирази миттєвих лінійних напруг при холостому ході генератора і з'єднанні його фаз зіркою.
7. Побудуйте векторну діаграму діючих значень фазних і лінійних напруг при холостому ході генератора і з'єднанні його фаз зіркою на площині.
8. Яке співвідношення між значеннями фазних і лінійних напруг генератора при з'єднанні його фаз зіркою?
9. Що таке фазний струм генератора? Яке співвідношення між значеннями фазних і лінійних струмів генератора при з'єднанні його фаз зіркою?

5.4 З'єднання фаз навантаження трикутником

Складемо розрахункову схему при з'єднанні навантаження трикутником (рис.5.15).

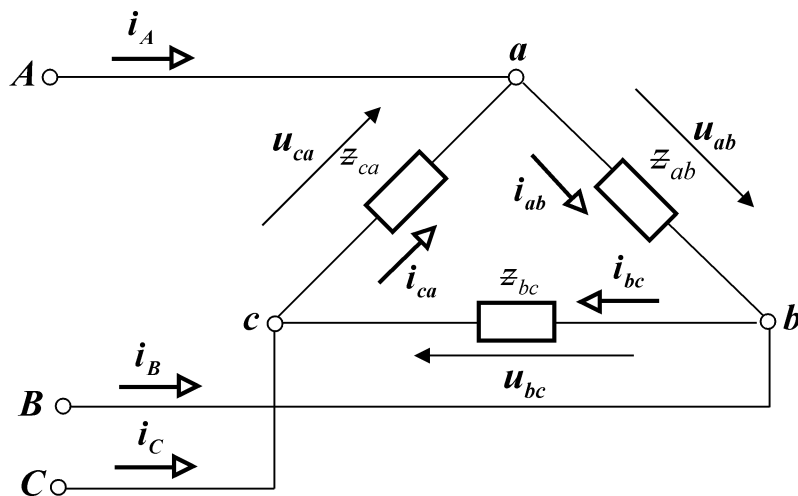


Рисунок 5.15 – Розрахункова схема трифазного навантаження, з'єданого трикутником

На розрахунковій схемі позначено: i_A, i_B, i_C – лінійні струми навантаження, A ; i_{ab}, i_{bc}, i_{ca} – фазні струми навантаження, A ; u_{ab}, u_{bc}, u_{ca} – фазні (лінійні) напруги навантаження, B ; Z_{ab}, Z_{bc}, Z_{ca} – повні опори фаз навантаження, Ом .

Як видно з розрахункової схеми, при з'єднанні фаз навантаження трикутником фазна напруга навантаження дорівнює лінійній напрузі навантаження, тобто

$$U_{\phi} = U_{\text{л}} . \quad (5.23)$$

За першим законом Кірхгофа знайдемо лінійні струми через фазні:

$$i_A = i_{ab} - i_{ca} ; \quad (5.24)$$

$$i_B = i_{bc} - i_{ab} ; \quad (5.25)$$

$$i_C = i_{ca} - i_{bc} . \quad (5.26)$$

Побудуємо векторну діаграму лінійних напруг, фазних і лінійних струмів (для діючих значень) на площині (рис.5.16). З векторної діаграми випливає, що лінійні струми відстають від фазних за фазою на 30° .

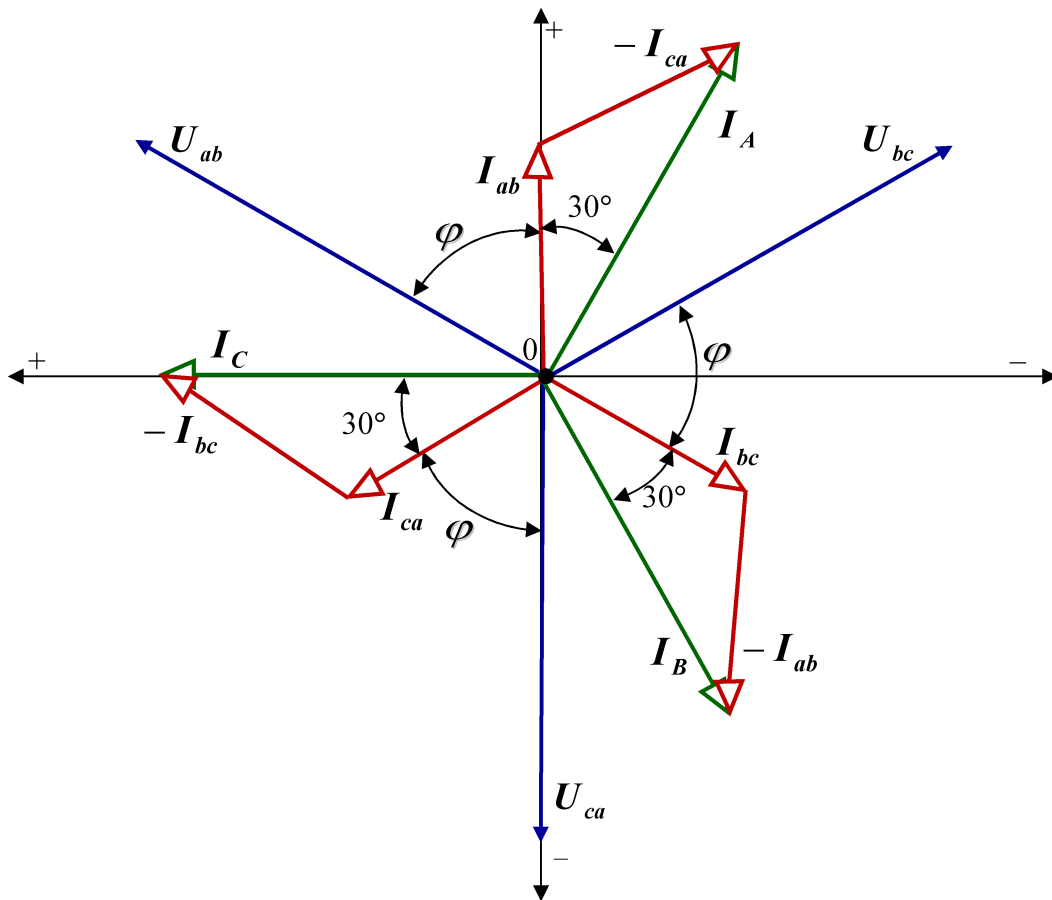


Рисунок 5.16 – Векторна діаграма лінійних напруг, фазних і лінійних струмів навантаження, з'єднаного трикутником

Запишемо миттєві значення фазних і лінійних струмів навантаження:

$$i_{ab} = I_{\phi m} \sin \omega t ; \quad (5.27)$$

$$i_{bc} = I_{\phi m} \sin(\omega t - 120^\circ); \quad (5.28)$$

$$i_{ca} = I_{\phi m} \sin(\omega t - 240^\circ); \quad (5.29)$$

$$i_A = I_{\lambda m} \sin(\omega t - 30^\circ); \quad (5.30)$$

$$i_B = I_{\lambda m} \sin(\omega t - 150^\circ); \quad (5.31)$$

$$i_C = I_{\lambda m} \sin(\omega t - 270^\circ), \quad (5.32)$$

де $I_{\phi m}$ і $I_{\Delta m}$ – максимальні (амплітудні) значення відповідно фазних і лінійних струмів навантаження, A .

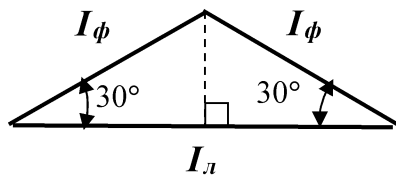


Рис.5.17

Встановимо зв'язок між діючими значеннями фазних (I_{ϕ}) і лінійних (I_L) струмів навантаження при з'єднанні його фаз трикутником, для чого розглянемо трикутник струмів (рис.5.17), який одержано з векторної діаграми.

З трикутника струмів знаходимо:

$$\frac{I_L}{2 \cdot I_{\phi}} = \cos 30^{\circ}; \quad \frac{I_L}{2 \cdot I_{\phi}} = \frac{\sqrt{3}}{2}; \quad \frac{I_L}{I_{\phi}} = \sqrt{3}; \quad I_L = \sqrt{3} \cdot I_{\phi}. \quad (5.33)$$

Запитання для самоконтролю

1. Як з'єднують фази навантаження за схемою трикутника?
2. Що розуміється під фазою навантаження?
3. Яке співвідношення між значеннями фазних і лінійних напруг навантаження при з'єднанні його фаз трикутником?
4. Складіть розрахункову схему навантаження при з'єднанні його фаз трикутником для миттєвих значень.
5. Запишіть миттєві значення фазних (лінійних) напруг навантаження при з'єднанні його фаз трикутником, прийнявши, що початкова фаза напруги фази A генератора дорівнює нулю.
6. Побудуйте векторну діаграму фазних і лінійних напруг і струмів навантаження при з'єднанні його фаз трикутником (для діючих значень).
7. Яке співвідношення між значеннями фазних і лінійних струмів при з'єднанні навантаження трикутником?

5.5 Потужності трифазного кола

Кожна фаза трифазного навантаження споживає активну, реактивну і повну потужності. При симетричному навантаженні та схемі з'єднання фаз навантаження зіркою ці потужності в кожній фазі відповідно до рис.4.19 та (4.61) можна розрахувати в такий спосіб:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{\phi} = U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi; \\ Q_{\phi} = U_{\phi} I_{\phi} \sin \varphi; \\ S_{\phi} = U_{\phi} I_{\phi}. \end{array} \right. \quad (5.34)$$

Потужності, які споживають три фази навантаження, можна розрахувати, помноживши на кількість фаз навантаження (тобто на три) потужності, які споживає одна фаза:

$$\left\{ \begin{array}{l} P = 3 \cdot U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi; \\ Q = 3 \cdot U_{\phi} I_{\phi} \sin \varphi; \\ S = 3 \cdot U_{\phi} I_{\phi}. \end{array} \right. \quad (5.35)$$

Визначимо ці потужності через лінійні напруги і струми:

$$\left\{ \begin{array}{l} P = 3 \cdot \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} \cdot I_{\text{л}} \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos \varphi; \\ Q = 3 \cdot \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} \cdot I_{\text{л}} \sin \varphi = \sqrt{3} \cdot U_{\text{л}} I_{\text{л}} \sin \varphi; \\ S = 3 \cdot \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} \cdot I_{\text{л}} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{л}} I_{\text{л}}. \end{array} \right. \quad (5.36)$$

При з'єднанні фаз навантаження трикутником вирази (5.28) і (5.29) справедливі, тільки в цих виразах будуть відповідні фазні струми і напруги. Визначимо ці потужності через лінійні напруги і струми:

$$\left\{ \begin{array}{l} P = 3 \cdot U_{\text{л}} \cdot \frac{I_{\text{л}}}{\sqrt{3}} \cdot \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos \varphi; \\ Q = 3 \cdot U_{\text{л}} \cdot \frac{I_{\text{л}}}{\sqrt{3}} \cdot \sin \varphi = \sqrt{3} \cdot U_{\text{л}} I_{\text{л}} \sin \varphi; \\ S = 3 \cdot U_{\text{л}} \cdot \frac{I_{\text{л}}}{\sqrt{3}} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{л}} I_{\text{л}}. \end{array} \right. \quad (5.37)$$

Таким чином, потужності, які споживає трифазне навантаження (незалежно від схеми його з'єднання), можна розрахувати в такий спосіб:

$$\left\{ \begin{array}{l} P = \sqrt{3} \cdot U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos \varphi; \\ Q = \sqrt{3} \cdot U_{\text{л}} I_{\text{л}} \sin \varphi; \\ S = \sqrt{3} \cdot U_{\text{л}} I_{\text{л}}. \end{array} \right. \quad (5.38)$$

Запитання для самоконтролю

1. Як визначити активну потужність, яку споживає трифазне навантаження?
2. Як визначити реактивну потужність, яку споживає трифазне навантаження?
3. Як визначити повну потужність, яку споживає трифазне навантаження?

5.6 Розрахунок нерозгалужених трифазних кіл синусоїдного струму

Розглянемо розрахункову схему трифазного трипровідного електричного кола, яке складається з ідеального генератора, з'єднаного зіркою, реальної лінії електропередачі і навантаження, з'єднаного зіркою (рис.5.18).

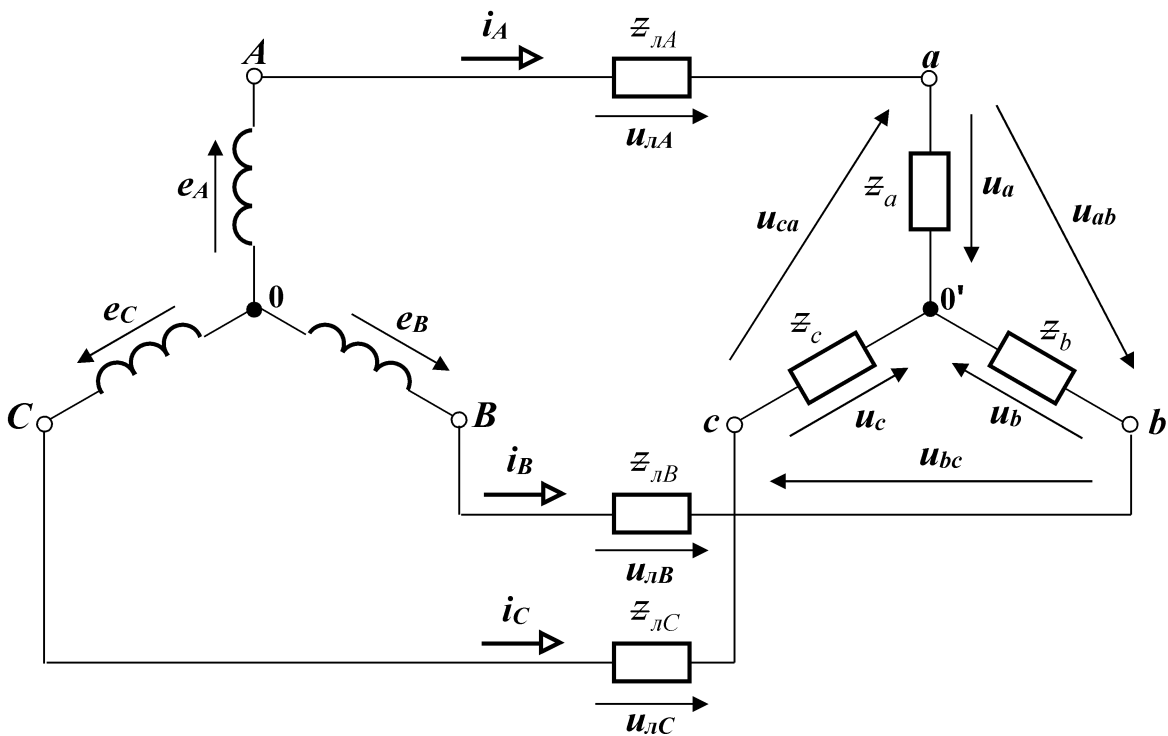


Рисунок 5.18 – Розрахункова схема трифазного кола «зірка – зірка»

Нехай задано діюче значення електрорушійної сили E в фазі симетричного генератора, повні опори лінійних проводів і фаз навантаження:

$$z_{лA} = z_{лB} = z_{лC}; \quad z_a = z_b = z_c,$$

а також коефіцієнти потужності лінії електропередачі та фаз навантаження:

$$\cos \varphi_{лA} = \cos \varphi_{лB} = \cos \varphi_{лC}; \quad \cos \varphi_a = \cos \varphi_b = \cos \varphi_c.$$

Необхідно розрахувати діючі значення фазних і лінійних сил струмів генератора і навантаження, спадання напруги в лінії електропередачі, фаз-

них і лінійних напруг генератора і навантаження, а також потужності, які віддаються генератором, втрачаються в лінії і споживаються навантаженням.

Алгоритм розрахунку наступний:

1. Складаємо розрахункову схему однієї фази кола.

Приймаємо, що потенціал точки 0 дорівнює нулю. Можна довести, що при симетричному режимі роботи кола потенціал точки 0' також дорівнює нулю. Тому з'єднання точок 0 і 0' не змінює режиму роботи кола.

Виділяємо одну фазу кола, яка складається з послідовно з'єднаних фази джерела, лінійного проводу і фази навантаження (рис.5.19).

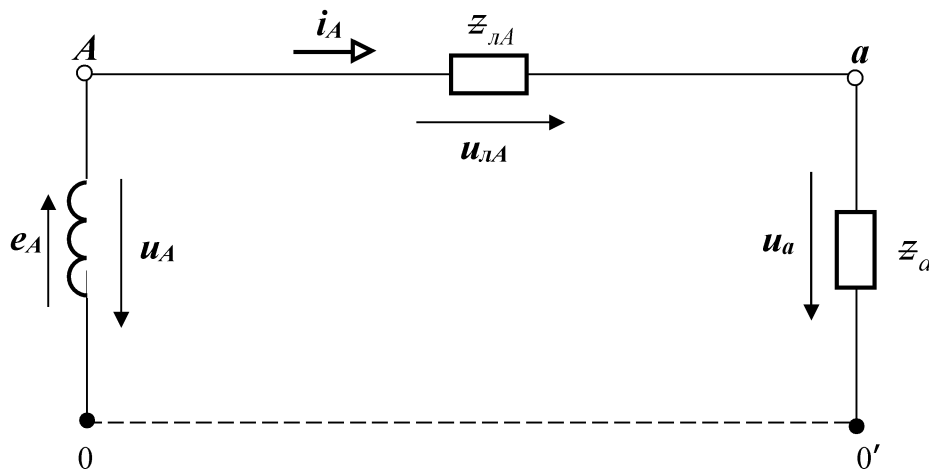


Рисунок 5.19 – Розрахункова схема фази А трифазного кола «зірка – зірка»

2. Визначаємо діючі значення сил струмів.

У даному випадку фазний струм генератора дорівнює лінійному струму і дорівнює фазному струму навантаження. Наприклад, для фази А кола він дорівнює:

$$I_A = \frac{E_A}{\sqrt{(r_{лА} + r_a)^2 + (x_{лА} + x_a)^2}}.$$

Інші струми I_B і I_C дорівнюють струму I_A .

3. Визначаємо діючі значення фазних напруг генератора.

У даному випадку (через те, що генератор ідеальний) фазні напруги генератора дорівнюють е.р.с., які розвиваються у фазах генератора. Наприклад, для фази А фазна напруга дорівнює:

$$U_A = E_A.$$

Інші напруги U_B і U_C дорівнюють U_A .

4. *Визначаємо діючі значення лінійних напруг генератора.*
Лінійна напруга між затискачами A і B генератора дорівнює:

$$U_{AB} = \sqrt{3} \cdot U_A.$$

Інші напруги U_{BC} і U_{CA} дорівнюють U_{AB} .

5. *Визначаємо діючі значення спадань напруг в лінії електропередачі.*

Спадання напруги у лінійному проводі A -а дорівнює:

$$U_{\lambda A} = z_{\lambda A} \cdot I_A.$$

Інші спадання напруг в лінії $U_{\lambda B}$ і $U_{\lambda C}$ дорівнюють $U_{\lambda A}$.

6. *Визначаємо діючі значення фазних напруг навантаження.*
Діюче значення напруги на фазі a навантаження дорівнює:

$$U_a = z_a \cdot I_A.$$

Інші напруги U_b і U_c дорівнюють U_a .

7. *Визначаємо діючі значення лінійних напруг навантаження.*
Діюче значення напруги між затискачами a і b навантаження дорівнює:

$$U_{ab} = \sqrt{3} \cdot U_a.$$

Інші напруги U_{bc} і U_{ca} дорівнюють U_{ab} .

8. *Визначаємо потужності навантаження.*

Активна потужність, яку споживає навантаження дорівнює:

$$P_n = 3 \cdot U_a \cdot I_A \cdot \cos \varphi_a,$$

або

$$P_n = \sqrt{3} \cdot U_{ab} \cdot I_A \cdot \cos \varphi_a.$$

Реактивна потужність, яку споживає навантаження дорівнює:

$$Q_n = 3 \cdot U_a \cdot I_A \cdot \sin \varphi_a,$$

або

$$Q_n = \sqrt{3} \cdot U_{ab} \cdot I_A \cdot \sin \varphi_a.$$

Повна потужність, яку споживає навантаження дорівнює:

$$S_H = 3 \cdot U_a \cdot I_A,$$

або

$$S_H = \sqrt{3} \cdot U_{ab} \cdot I_A,$$

або

$$S_H = \sqrt{P_H^2 + Q_H^2}.$$

9. Визначаємо втрати потужності в лінії електропередачі.

Втрати активної потужності в лінії дорівнюють:

$$P_l = 3 \cdot U_{lA} \cdot I_A \cdot \cos \varphi_{lA}.$$

Реактивна потужність лінії дорівнює:

$$Q_l = 3 \cdot U_{lA} \cdot I_A \cdot \sin \varphi_{lA}.$$

Повна потужність лінії дорівнює:

$$S_l = 3 \cdot U_{lA} \cdot I_A,$$

або

$$S_l = \sqrt{P_l^2 + Q_l^2}.$$

10. Визначаємо потужності генератора.

У даному випадку потужності, які розвиває генератор, і потужності, які віддає генератор, однакові (через те, що генератор ідеальний).

Активна потужність генератора дорівнює:

$$P_g = P_l + P_H.$$

Реактивна потужність генератора дорівнює:

$$Q_g = Q_l + Q_H.$$

Повна потужність генератора дорівнює:

$$S_g = \sqrt{P_g^2 + Q_g^2},$$

або

$$S_2 = 3 \cdot U_A \cdot I_A;$$

$$S_2 = \sqrt{3} \cdot U_{AB} \cdot I_A.$$

Приклад 5.3

Трифазне симетричне навантаження одержує живлення від ідеального трифазного симетричного генератора за допомогою реальної лінії електропередачі. Генератор з'єднаний зіркою, навантаження з'єднане зіркою, лінія електропередачі трипровідна. Активний опір лінійного проводу дорівнює **3 Ом**, індуктивний опір лінійного проводу дорівнює **4 Ом**. Активний опір фази навантаження дорівнює **12 Ом**, індуктивний опір фази навантаження дорівнює **16 Ом**. Діюче значення е.р.с. у фазі генератора дорівнює **300 В**.

Розрахувати дане трифазне електричне коло.

Розв'язок.

1. Розрахункова схема кола приведена на рис.5.18, а для однієї фази – на рис.5.19.

2. Визначаємо діючі значення фазних і лінійних сил струмів генератора і навантаження:

$$I_\phi = I_n = \frac{E}{\sqrt{(r_n + r_h)^2 + (x_n + x_h)^2}}; \quad I_\phi = I_n = \frac{300}{\sqrt{(3+12)^2 + (4+16)^2}} = \frac{300}{25} = 12 \text{ А.}$$

3. Визначаємо діючі значення фазних напруг генератора:

$$U_{\phi,Г} = E; \quad U_{\phi,Г} = 300 \text{ В.}$$

4. Визначаємо діючі значення лінійних напруг генератора:

$$U_{л,Г} = \sqrt{3} \cdot U_{\phi,Г}; \quad U_{л,Г} = 1,73 \cdot 300 = 519 \text{ В.}$$

5. Визначаємо діючі значення спадань напруг в лінії:

$$U_n = \sqrt{r_n^2 + x_n^2} \cdot I_\phi; \quad U_n = \sqrt{3^2 + 4^2} = 5 \cdot 12 = 60 \text{ В.}$$

6. Визначаємо діючі значення фазних напруг навантаження:

$$U_{\phi,Н} = \sqrt{r_n^2 + x_n^2} \cdot I_\phi; \quad U_{\phi,Н} = \sqrt{12^2 + 16^2} = 20 \cdot 12 = 240 \text{ В.}$$

7. Визначаємо діючі значення лінійних напруг навантаження:

$$U_{л,Н} = \sqrt{3} \cdot U_{\phi,Н}; \quad U_{л,Н} = 1,73 \cdot 240 = 415 \text{ В.}$$

8. Визначаємо кут зсуву фаз лінії електропередачі:

$$\varphi_n = \arccos \frac{r_n}{z_n}; \quad \varphi_n = \arccos \frac{3}{5} = \arccos 0,6 \approx 53^\circ.$$

9. Визначаємо кут зсуву фаз навантаження:

$$\varphi_H = \arccos \frac{r_H}{z_H}; \quad \varphi_H = \arccos \frac{12}{20} = \arccos 0,6 \approx 53^\circ.$$

10. Визначаємо активну потужність, що споживається навантаженням:

$$P_H = 3 \cdot U_{\phi,H} I_{\phi} \cos \varphi_H; \quad P_H = 3 \cdot 240 \cdot 12 \cdot 0,6 = 5184 \text{ Вт}.$$

11. Визначаємо реактивну потужність навантаження:

$$Q_H = 3 \cdot U_{\phi,H} I_{\phi} \sin \varphi_H; \quad Q_H = 3 \cdot 240 \cdot 12 \cdot 0,8 = 6912 \text{ вар}.$$

12. Визначаємо повну потужність, що споживається навантаженням:

$$S_H = 3 \cdot U_{\phi,H} I_{\phi}; \quad S_H = 3 \cdot 240 \cdot 12 = 8640 \text{ ВА}.$$

13. Визначаємо активну потужність, що втрачається в лінії:

$$P_{\pi} = 3 \cdot U_{\pi} I_{\phi} \cos \varphi_{\pi}; \quad P_{\pi} = 3 \cdot 60 \cdot 12 \cdot 0,6 = 1296 \text{ Вт}.$$

14. Визначаємо реактивну потужність навантаження:

$$Q_{\pi} = 3 \cdot U_{\pi} I_{\phi} \sin \varphi_{\pi}; \quad Q_{\pi} = 3 \cdot 60 \cdot 12 \cdot 0,8 = 1728 \text{ вар}.$$

15. Визначаємо повну потужність, що втрачається в лінії:

$$S_{\pi} = 3 \cdot U_{\pi} I_{\phi}; \quad S_{\pi} = 3 \cdot 60 \cdot 12 = 2160 \text{ ВА}.$$

16. Визначаємо активну потужність, що віддається генератором:

$$P_{\Sigma} = P_{\pi} + P_H; \quad P_{\Sigma} = 1296 + 5184 = 6480 \text{ Вт}.$$

17. Визначаємо реактивну потужність генератора:

$$Q_{\Sigma} = Q_{\pi} + Q_H; \quad Q_{\Sigma} = 1728 + 6912 = 8640 \text{ вар}.$$

18. Визначаємо повну потужність, що віддається генератором:

$$S_{\Sigma} = \sqrt{P_{\Sigma}^2 + Q_{\Sigma}^2}; \quad S_{\Sigma} = \sqrt{6480^2 + 8640^2} = 10800 \text{ ВА}.$$

Розглянемо розрахункову схему трифазного трипровідного електричного кола, яке складається з ідеального генератора, з'єднаного зіркою, ідеальної лінії електропередачі, навантаження, з'єднаного трикутником (рис.5.20).

Нехай задано діюче значення електрорушійної сили E в фазі симетричного генератора і повні опори фаз навантаження:

$$z_{ab} = z_{bc} = z_{ca},$$

а також коефіцієнти потужності фаз навантаження

$$\cos \varphi_{ab} = \cos \varphi_{bc} = \cos \varphi_{ca} = \cos \varphi.$$

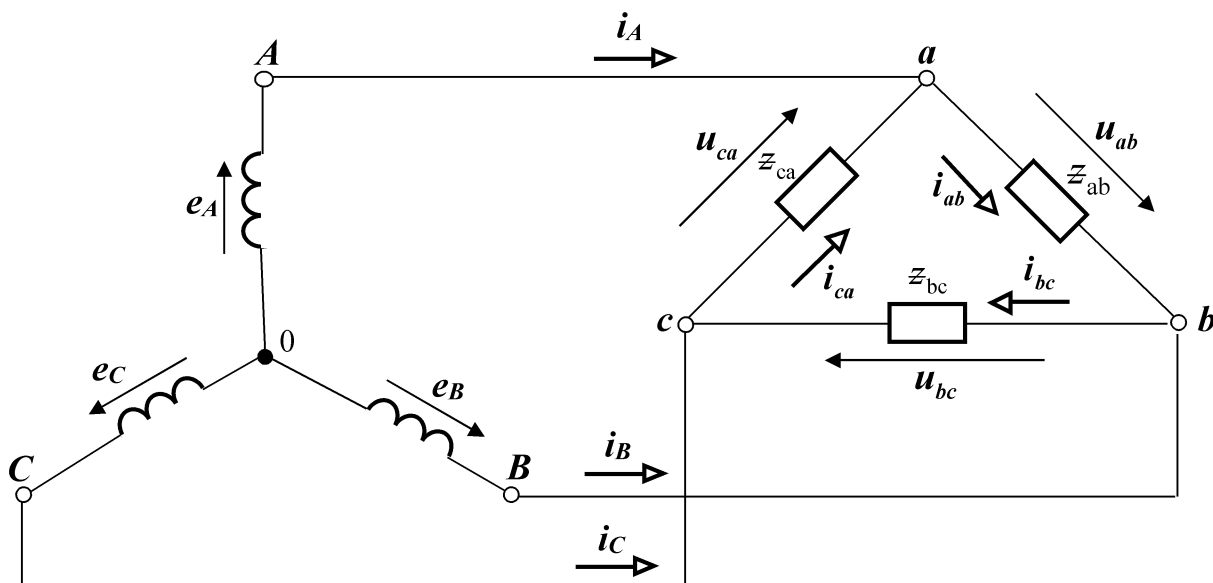


Рисунок 5.20 – Розрахункова схема трифазного кола «зірка – трикутник»

Необхідно розрахувати діючі значення фазних і лінійних сил струмів генератора і навантаження, фазних і лінійних напруг генератора і навантаження, а також потужності, які віддаються генератором і споживаються навантаженням.

Алгоритм розрахунку наступний:

1. Визначаємо діючі значення лінійних напруг.

У даному випадку лінійні напруги генератора дорівнюють фазним (лінійним) напругам навантаження. Наприклад:

$$U_{ab} = \sqrt{3}E_A.$$

Інші напруги U_{bc} , U_{ca} дорівнюють U_{ab} .

2. Визначаємо діючі значення сил фазних струмів навантаження.

Наприклад, для фази ab він дорівнює:

$$I_{ab} = \frac{U_{ab}}{Z_{ab}}.$$

Інші струми I_{bc} і I_{ca} дорівнюють струму I_{ab} .

3. Визначаємо діючі значення сил лінійних струмів.

У даному випадку лінійні струми генератора дорівнюють лінійним струмам навантаження. Наприклад, для лінійного проводу A - a він дорівнює:

$$I_A = \sqrt{3} \cdot I_{ab}.$$

Інші струми I_B, I_C дорівнюють струму I_A .

4. Визначаємо активну потужність.

У даному випадку активна потужність, яка віддається генератором, дорівнює активній потужності, яку споживає навантаження:

$$P = 3 U_{ab} I_{ab} \cos \varphi_{ab}$$

або

$$P = \sqrt{3} U_{ab} I_A \cos \varphi_{ab},$$

де U_ϕ і U_L – відповідно фазна і лінійна напруги навантаження, B ;
 I_ϕ і I_L – відповідно фазний і лінійний струми навантаження, A .

5. Визначаємо реактивну потужність.

У даному випадку реактивна потужність, яка віддається генератором, дорівнює реактивній потужності, яку споживає навантаження:

$$Q = 3 U_{ab} I_{ab} \sin \varphi_{ab}$$

або

$$Q = \sqrt{3} U_{ab} I_A \sin \varphi_{ab}.$$

6. Визначаємо повну потужність.

У даному випадку повна потужність, яка віддається генератором, дорівнює повній потужності, яку споживає навантаження:

$$S = 3 U_{ab} I_{ab}$$

або

$$S = \sqrt{3} U_{ab} I_A.$$

Приклад 5.4

Трифазне симетричне навантаження одержує живлення від трифазного симетричного генератора за допомогою ідеальної лінії електропередачі. Генератор з'єднаний зіркою, навантаження з'єднане трикутником. Активний опір фази навантаження дорівнює **24 Ом**, індуктивний опір фази навантаження дорівнює **18 Ом**. Діюче значення е.р.с. у фазі генератора дорівнює **86,7 В**.

Розрахувати дане трифазне електричне коло.

Розв'язок.

1. Розрахункова схема кола приведена на рис.5.20.
2. Визначаємо повні опори навантаження:

$$z_{\phi.n} = \sqrt{r_{\phi.n}^2 + x_{\phi.n}^2}; \quad z_{\phi.n} = \sqrt{24^2 + 18^2} = \sqrt{576 + 324} = \sqrt{900} = 30 \text{ Ом}.$$

3. Визначаємо діючі значення лінійних напруг генератора і фазних (лінійних) напруг навантаження:

$$U_{\phi.n} = \sqrt{3} \cdot E; \quad U_{\phi.n} = 1,73 \cdot 86,7 = 150 \text{ В}.$$

4. Визначаємо діючі значення фазних струмів навантаження:

$$I_{\phi.n} = \frac{U_{\phi.n}}{z_{\phi.n}}; \quad I_{\phi.n} = \frac{150}{30} = 5 \text{ А}.$$

5. Визначаємо діючі значення сил лінійних струмів генератора і навантаження:

$$I_l = \sqrt{3} \cdot I_{\phi.n}; \quad I_l = 1,73 \cdot 5 = 8,65 \text{ А}.$$

6. Визначаємо кут зсуву фаз навантаження:

$$\varphi = \arccos \frac{r_{\phi.n}}{z_{\phi.n}}; \quad \varphi = \arccos \frac{24}{30} = \arccos 0,8 = 37^\circ.$$

7. Визначаємо активну потужність, яка віддається генератором і споживається навантаженням:

$$P = 3 \cdot U_{\phi.n} \cdot I_{\phi.n} \cdot \cos \varphi; \quad P = 3 \cdot 150 \cdot 5 \cdot 0,8 = 1800 \text{ Вт}.$$

8. Визначаємо реактивну потужність генератора і навантаження:

$$Q = 3 \cdot U_{\phi.n} \cdot I_{\phi.n} \cdot \sin \varphi; \quad Q = 3 \cdot 150 \cdot 5 \cdot 0,6 = 1350 \text{ вар}.$$

9. Визначаємо повну потужність, яка віддається генератором і споживається навантаженням:

$$S = 3 \cdot U_{\phi.n} \cdot I_{\phi.n}; \quad S = 3 \cdot 150 \cdot 5 = 2250 \text{ ВА}.$$

Запитання для самоконтролю

1. Складіть розрахункову схему трифазного кола, яке складається з трифазного ідеального генератора, з'єданого зіркою, реальної трипровідної лінії електропередачі, навантаження, з'єданого зіркою.
2. Наведіть алгоритм розрахунку зазначеного у п.1 кола, якщо задано діюче значення електрорушійної сили у фазі генератора, повні опори фаз навантаження, а також коефіцієнти потужності фаз навантаження.
3. Складіть розрахункову схему трифазного кола, яке складається з трифазного ідеального генератора, з'єданого зіркою, ідеальної трипровідної лінії електропередачі, навантаження, з'єданого трикутником.
4. Наведіть алгоритм розрахунку зазначеного у п.3 кола, якщо задано діюче значення електрорушійної сили у фазі генератора, повні опори фаз навантаження, а також коефіцієнти потужності фаз навантаження.

Завдання для самоконтролю

Трифазне симетричне навантаження отримує живлення від ідеального трифазного симетричного генератора за допомогою реальної лінії електропередачі. Генератор з'єднаний зіркою, навантаження з'єднане зіркою, лінія електропередачі трипровідна. Активний опір лінійного проводу дорівнює **4 Ом**, індуктивний опір лінійного проводу дорівнює **3 Ом**. Активний опір фази навантаження дорівнює **20 Ом**, індуктивний опір фази навантаження дорівнює **15 Ом**. Вольтметр, включений між початками фаз *A* і *B* генератора, показав **346 В**.

1. Скласти розрахункову схему кола.
2. Визначити діючі значення лінійних напруг генератора.
3. Визначити діючі значення фазних напруг генератора.
4. Визначити повні опори лінійних проводів.
5. Визначити повні опори фаз навантаження.
6. Визначити діючі значення сил фазних струмів навантаження.
7. Визначити діючі значення сил лінійних струмів.
8. Визначити діючі значення спадань напруг у лінійних проводах.
9. Визначити діючі значення фазних напруг навантаження.
10. Визначити діючі значення лінійних напруг навантаження.
11. Визначити кут зсуву фаз лінії електропередачі.
12. Визначити кут зсуву фаз навантаження.
13. Визначити втрату активної потужності в лінії електропередачі.
14. Визначити реактивну потужність лінії електропередачі.
15. Визначити втрату повної потужності в лінії електропередачі.
16. Визначити активну потужність генератора.
17. Визначити реактивну потужність генератора.
18. Визначити повну потужність генератора.

Трифазне симетричне навантаження отримує живлення від ідеального трифазного симетричного генератора за допомогою ідеальної лінії електропередачі. Генератор з'єднаний зіркою, навантаження з'єднане трикутником. Активний опір фази навантаження дорівнює **4 Ом**, індуктивний опір фази навантаження дорівнює **3 Ом**. Вольтметр, включений у фазу *A* генератора, показав **28,9 В**.

19. Скласти розрахункову схему кола.
20. Визначити діючі значення фазних напруг генератора.
21. Визначити діючі значення лінійних напруг генератора.
22. Визначити діючі значення фазних (лінійних) напруг навантаження.
23. Визначити повні опори фаз навантаження.
24. Визначити діючі значення сил фазних струмів навантаження.
25. Визначити діючі значення сил лінійних струмів.
26. Визначити кут зсуву фаз між фазним струмом і фазною напругою навантаження.
27. Визначити коефіцієнт потужності навантаження.
28. Визначити активну потужність навантаження.
29. Визначити реактивну потужність навантаження.
30. Визначити повну потужність навантаження.

5.7 Переключення навантаження із зірки на трикутник

Одержимо основні співвідношення між струмами та між потужностями при переключенні схеми з'єднання фаз навантаження зіркою на схему трикутника (рис.5.21).

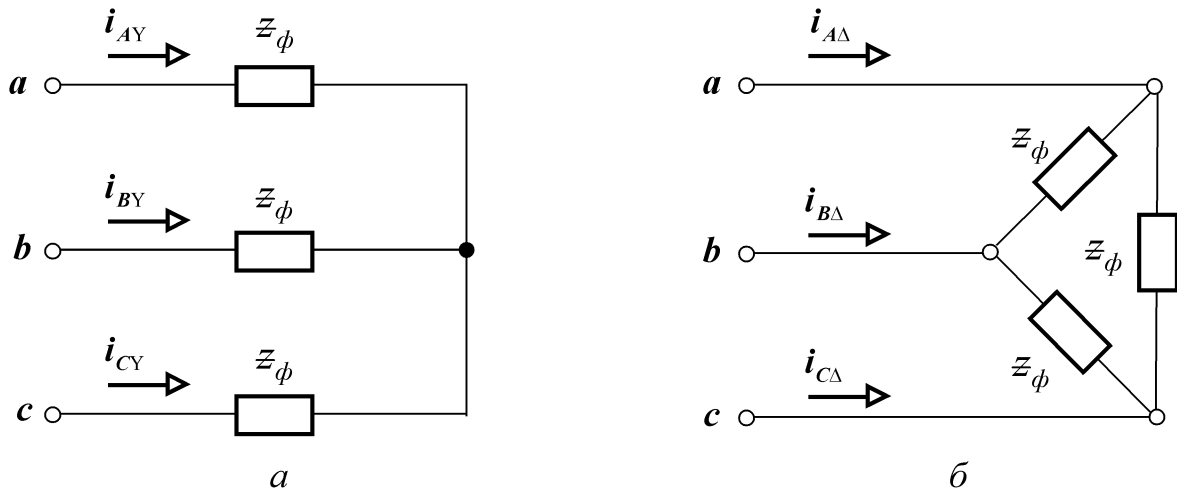


Рисунок 5.21 – Розрахункові схеми навантаження при з'єднанні зіркою (а) і трикутником (б)

При з'єднанні фаз навантаження зіркою лінійний (фазний) струм дорівнює:

$$I_{лY} = I_{\phi Y} = \frac{U_{\phi}}{z_{\phi}} = \frac{U_{л}}{\sqrt{3}z_{\phi}}. \quad (5.39)$$

Знаходимо потужності при з'єднанні фаз навантаження зіркою:

$$P_Y = \sqrt{3} U_{л} I_{л} \cos \varphi = \sqrt{3} U_{л} \frac{U_{л}}{\sqrt{3}z_{\phi}} \cos \varphi = \frac{U_{л}^2}{z_{\phi}} \cos \varphi; \quad (5.40)$$

$$Q_Y = \frac{U_{л}^2}{z_{\phi}} \sin \varphi; \quad (5.41)$$

$$S_Y = \frac{U_{л}^2}{z_{\phi}}. \quad (5.42)$$

При з'єднанні фаз навантаження трикутником лінійний струм більше фазного в $\sqrt{3}$ раз:

$$I_{л\Delta} = \sqrt{3}I_{\phi\Delta} = \sqrt{3} \frac{U_{л}}{z_{\phi}}. \quad (5.43)$$

Знаходимо потужності при з'єднанні фаз навантаження трикутником:

$$P_{\Delta} = \sqrt{3} U_{л} I_{л} \cos \varphi = \sqrt{3} U_{л} \sqrt{3} \frac{U_{л}}{z_{\phi}} \cos \varphi = 3 \frac{U_{л}^2}{z_{\phi}} \cos \varphi; \quad (5.44)$$

$$Q_{\Delta} = 3 \frac{U_{л}^2}{z_{\phi}} \sin \varphi; \quad (5.45)$$

$$S_{\Delta} = 3 \frac{U_{л}^2}{z_{\phi}}. \quad (5.46)$$

Співвідношення між струмами дорівнює:

$$\frac{I_{л\Delta}}{I_{лY}} = \frac{\sqrt{3}U_{л}}{z_{\phi}} : \frac{U_{л}}{\sqrt{3}z_{\phi}} = 3. \quad (5.47)$$

Знайдемо співвідношення між потужностями:

$$\frac{P_{\Delta}}{P_Y} = \frac{3U_{л}^2 \cos \varphi}{z_{\phi}} : \frac{U_{л}^2 \cos \varphi}{z_{\phi}} = 3. \quad (5.48)$$

Аналогічно:

$$\frac{Q_{\Delta}}{Q_Y} = 3; \quad \frac{S_{\Delta}}{S_Y} = 3. \quad (5.49)$$

Таким чином, при переключенні фаз навантаження зі схеми з'єднання зіркою на схему трикутника лінійні струми і потужності, які споживає навантаження, збільшуються в три рази.

Запитання для самоконтролю

1. Як зміняться споживані струми навантаження при переключенні його фаз із зірки на трикутник?
2. Як зміняться споживані потужності навантаження при переключенні його фаз із зірки на трикутник?

Тема 6 ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

6.1 Генератор постійного струму

Будова та принцип дії генератора

Електрична машина, у якій механічна енергія обертового вала перетворюється в електричну енергію постійного струму, називається **генератором постійного струму**. Робота генератора основана на явищі електромагнетизму та явищі електромагнітної індукції, які розглянуті відповідно у п.3.1 і 4.1. Крім цих явищ при роботі генератора спостерігаються явища теплової дії струму, гістерезису, які розглянуті відповідно у п.1.4 і 3.4, а також явище електромагнітної сили.

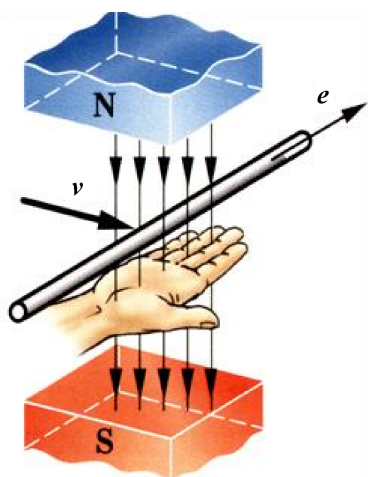


Рис.6.1

Явище електромагнітної індукції полягає у тому, що при переміщенні провідника у постійному магнітному полі у провіднику наводиться електрорушійна сила. Напрямок дії цієї електрорушійної сили визначається за **правилом «правої руки»** (рис.6.1): якщо розташувати праву руку так, щоб силові лінії магнітного поля входили в долоню, а великий відігнутий на 90° палець збігався з напрямком руху провідника, то чотири пальці будуть вказувати напрям електрорушійної сили, яка наводиться у провіднику. Значення електрорушійної сили, яка наводиться у провіднику, дорівнює:

$$e = B \cdot l \cdot v \cdot \sin \alpha, \quad (6.1)$$

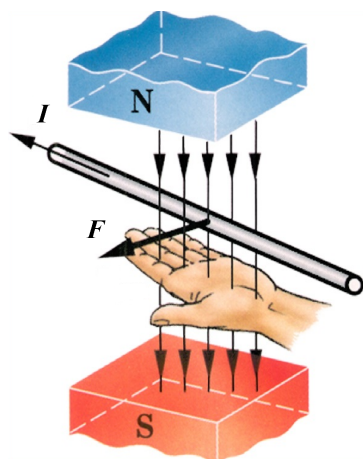


Рис.6.2

де e – миттєве значення е.р.с., яка наводиться у провіднику, B ;
 B – магнітна індукція поля, $Tл$;
 l – ефективна довжина провідника, $м$;
 v – лінійна швидкість провідника, $м/с$;
 α – кут між провідником і вектором магнітної індукції, *градус*.

Явище електромагнітної сили полягає в тому, що на провідник зі струмом, поміщений у магнітне поле, діє механічна сила, яка виштовхує цей провідник з магнітного поля. Напрямок дії цієї сили

визначається за **правилом «лівої руки»** (рис.6.2): якщо розташувати ліву руку так, щоб силові лінії магнітного поля входили в долоню, а чотири пальці вказували напрям струму в провіднику, то великий відігнутий палець буде вказувати напрям механічної сили, яка діє на провідник зі струмом.

Закон електромагнітної сили (закон Ампера): сила, що діє на провідник зі струмом, поміщений у магнітне поле, прямо пропорційна магнітній індукції поля, силі струму в провіднику і його довжині:

$$F = B \cdot I \cdot l \cdot \sin \alpha, \quad (6.2)$$

де F – сила, що діє на провідник зі струмом у магнітному полі, H ;
 B – магнітна індукція поля, $Tл$;
 l – ефективна довжина провідника, $м$;
 α – кут між напрямом струму в провіднику і вектором магнітної індукції поля, *градус*.

Розглянемо конструкцію та принцип дії генератора постійного струму на його фізичній моделі (рис.6.3).

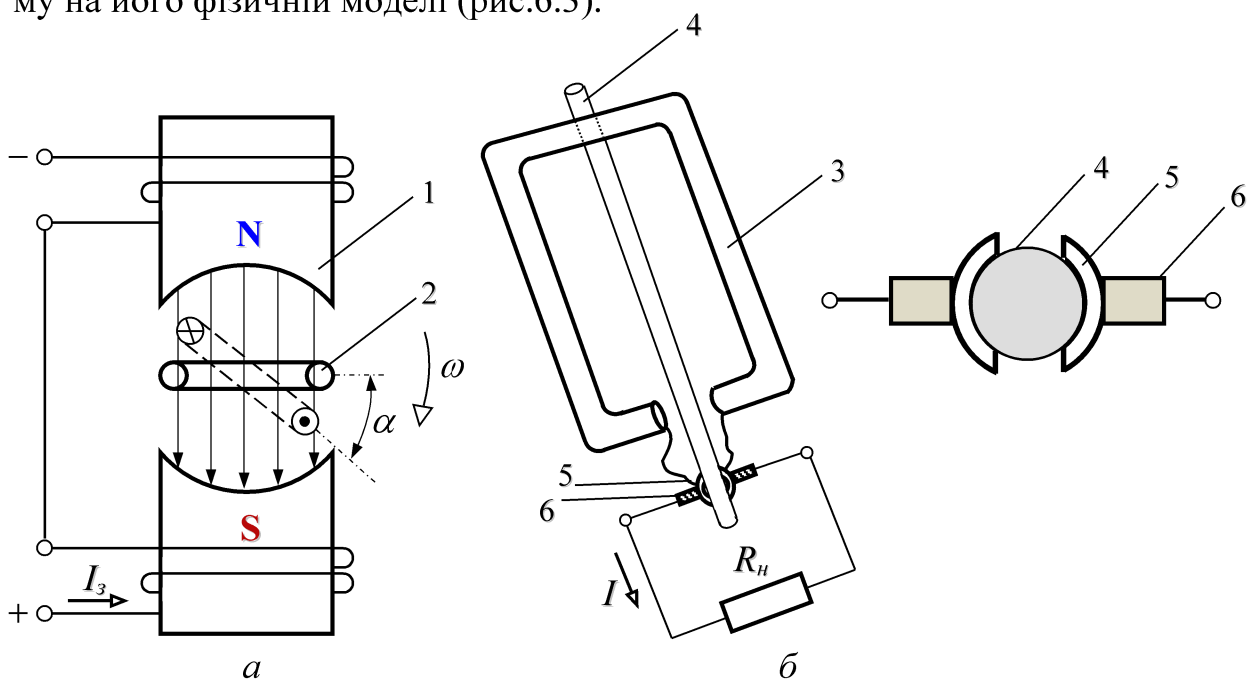


Рисунок 6.3 – Конструктивна схема фізичної моделі генератора постійного струму (а) і рамки (б)

Фізична модель генератора складається з електромагніту 1, між полюсами якого розташована рамка 2. Рамка являє собою провідник 3, розташований на осі 4 та підключений до контактних півкіл (пластин) 5, на які накладені щітки 6. До щіток підключене навантаження R_n .

Принцип дії фізичної моделі наступний: до затискачів обмотки електромагніту підводиться постійна напруга, під дією якої у ній протікає постійний електричний струм I_3 . Навколо цього струму виникає магнітне поле, яке пронизує рамку. При обертанні рамки з кутовою швидкістю ω виникає явище електромагнітної індукції й у ній наводиться е.р.с. При підключенні до рамки навантаження у ній буде протікати електричний струм I . На сто-

рони рамки зі струмом у магнітному полі будуть діяти сили, протилежні напрямку обертання.

Електрорушійна сила, яка наводиться у рамці, змінюється в часі за синусоїдним законом та створює різницю потенціалів на її кінцях. Знаки потенціалів на кінцях рамки (позитивний, негативний) через півоберти теж змінюються, тому що змінюється напрям е.р.с., яка наводиться в сторонах рамки. Проте знаки потенціалів щіток не змінюються. Це пояснюється тим, що при обертанні рамки вони нерухомі та завжди підключені через контактні півкола (пластини) до тієї сторони рамки, на кінці якої потенціал однакового знаку (тобто е.р.с. у стороні рамки спрямована в той самий бік). Завдяки ковзному контакту на одній щітці утворюється позитивний потенціал, а на іншій – негативний, тому між щітками діє постійна е.р.с..

Конструкція генератора постійного струму наступна (рис.6.4): індуктор (нерухома частина), який створює магнітне поле та якір (обертюва частина), у якому наводиться е.р.с. Вони відділені один від одного мінімальним повітряним зазором.

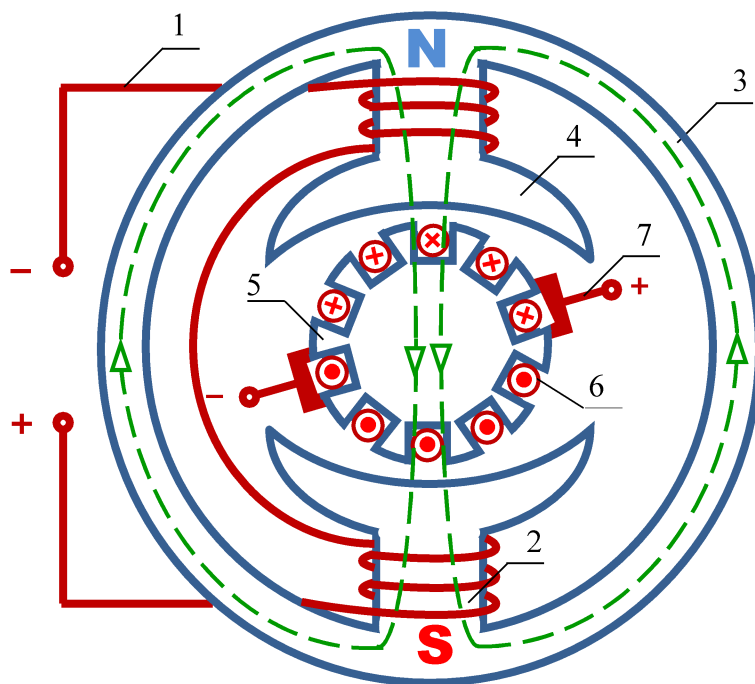


Рисунок 6.4 – Конструктивна схема машини постійного струму

Індуктор складається з обмотки збудження 1, укріпленої на полюсах 2 генератора. Затискачі обмотки збудження виводять на клемну коробку і позначають літерами Н1 і Н2 (або Ш1 і Ш2). Полюси генератора виготовляють з феромагнітного матеріалу та кріплять до чавунного корпусу 3 (який має вигляд кола) за допомогою болтів та ізолюючих прокладок. До них кріплять полюсні наконечники 4, які мають вигляд півкіл, для поліпшення розподілу магнітного поля в повітряному зазорі генератора.

Якір генератора має форму циліндра, який розташований на валу. Його магнітопровід 5 виконують з феромагнітного матеріалу та укріплюють на валу генератора. На вал генератора встановлюють підшипники, які запресовують у підшипникові щити. Ці підшипникові щити служать опорою для валу генератора, їх кріплять до його корпусу. Якірна обмотка 6, яку укладають у пази магнітопроводу якоря генератора, складається з декількох витків, кожний з яких кріплять до окремої колекторної пластини. Колекторні пластини ізолювані одна від одної та від валу генератора. На колекторні пластини накладають щітки 7, затискачі яких виводять на клемну коробку і позначають буквами Я1 і Я2.

Сукупність таких колекторних пластин, які дозволяють за наявності змінної е.р.с. у якірній обмотці отримувати постійну полярність щіток, називають колектором (рис.6.5). Напруга з колектора знімається за допомогою щіткового механізму. Призначення колектора і щіткового механізму в генератора – це спрямлення електрорушійної сили (тобто перетворення змінної е.р.с. у постійну е.р.с.).

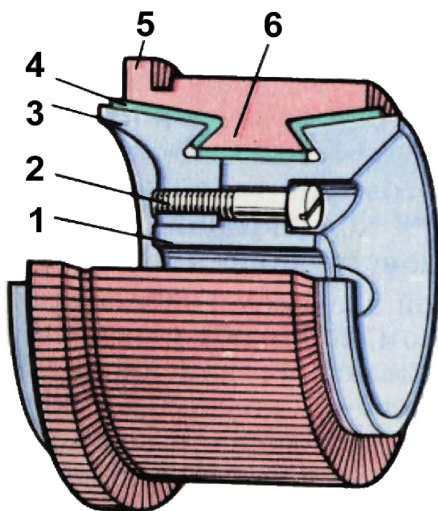


Рисунок 6.5 – Будова колектора:

- 1, 3 – сталеві шайби;
- 2 – гвинт;
- 4 – міканітова прокладка;
- 5 – верхня частина колекторної пластини;
- 6 – нижня частина колекторної пластини;

Обмотка збудження та обмотка якоря можуть підключатися незалежно одна від одної, тоді в генератора буде *незалежне збудження* (затискачі Н1 і Н2 підключають до стороннього джерела постійної е.р.с., а до затискачів Я1 і Я2 підключають навантаження).

Принцип дії генератора постійного струму з незалежним збудженням наступний. До обмотки збудження подається постійна напруга під дією якої у цій обмотці виникає постійний електричний струм. Цей струм створює незмінне у часі магнітне поле, силові лінії якого пронизують обмотку якоря. При обертанні якоря у цьому магнітному полі за допомогою приводного агрегату (турбіни, ДВС, тощо) положення якоря по відношенню до силових ліній магнітного поля змінюється і в його обмотці індукуюється е.р.с., яка змінюється за синусоїдним законом. За допомогою колектору та щіткового механізму ця е.р.с. випрямляється, тобто стає пос-

тійною. При приєднанні до щіток навантаження в утвореному колі під дією цієї е.р.с. починає протікати постійний електричний струм.

Спрямлена е.р.с. є пульсуючою, тобто змінюється за подвоєним синусоїдним законом при збереженні знаку. На рис.6.6а показана е.р.с., яка діє між двома колекторними пластинами. Зі збільшенням кількості колекторних пластин пульсація е.р.с. зменшується. На рис.6.6б показано: $e_{рез}$ – результуюча е.р.с. між щітками; e_1 – е.р.с., яка наводиться в першому витку обмотки якоря; e_2 – е.р.с., яка наводиться в другому витку обмотки якоря. Результуюча е.р.с. дорівнює:

$$e_{рез} = e_1 + e_2. \quad (6.3)$$

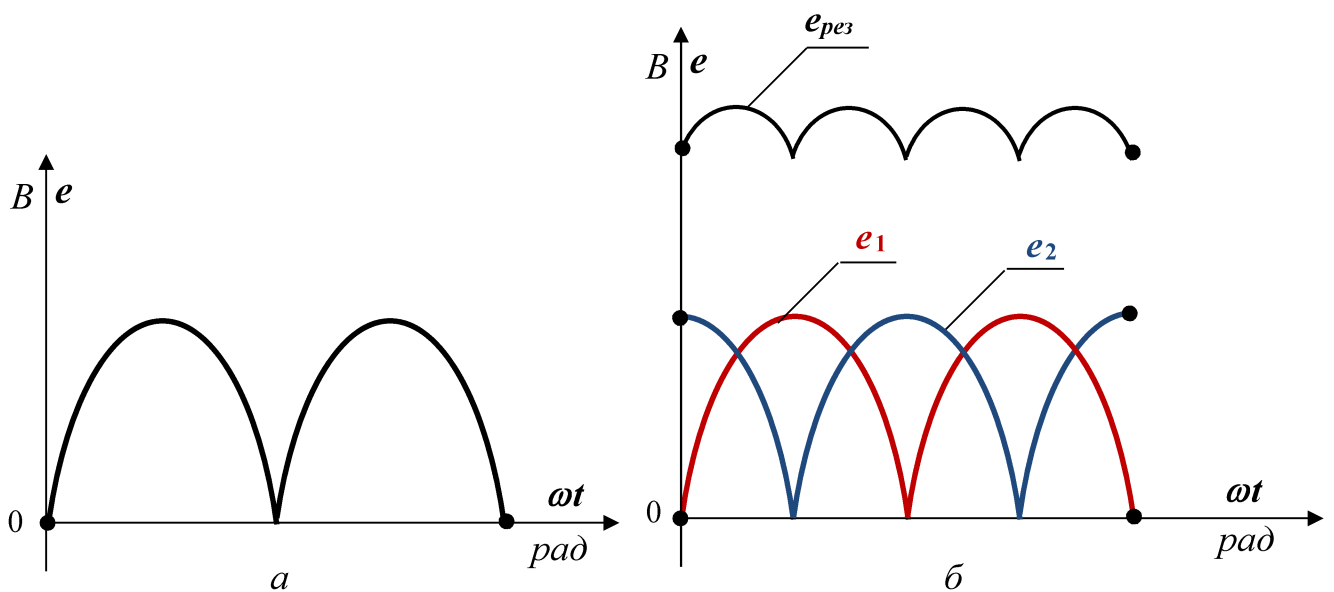


Рисунок 6.6 – Електрорушійні сили, які наводяться у одному витку (а) та двох витках (б) обмотки якоря

Через те, що у генератора на колекторі розташована значна кількість колекторних пластин (див. рис.6.5), то між щітками генератора діє постійна е.р.с. Середнє значення цієї спрямованої е.р.с., що діє між щітками, визначається наступним виразом:

$$E = k\Phi\omega, \quad (6.4)$$

де k – конструкційний коефіцієнт;
 Φ – магнітний потік полюсів генератора, Вб;
 ω – кутова швидкість обертання валу генератора, рад/с.

У генератора буде **самозбудження**, якщо різниця потенціалів на за- тискачах обмотки збудження створюється електрорушійною силою, яка наводиться в обмотці якоря. У цьому випадку при підключенні обмотки

збудження паралельно обмотці якоря в генератора буде *паралельне збудження* (Ш1 підключають до Я1, Ш2 підключають до Я2, при цьому до затискачів Я1 та Я2 підключають навантаження).

Принцип дії генератора постійного струму з самозбудженням (з паралельним збудженням) наступний. У такого генератора на полюсах є залишкова намагніченість, тобто присутнє магнітне поле з незначною незмінною у часі магнітною індукцією, яка називається залишковою. При обертанні якоря у цьому магнітному полі за допомогою приводного агрегату (турбіни, ДВС, тощо) положення якоря по відношенню до силових ліній залишкового магнітного поля змінюється і в його обмотці індуктується е.р.с., яка змінюється за синусоїдним законом. За допомогою колектору та щіткового механізму ця е.р.с. випрямляється, тобто стає постійною. Під дією цієї е.р.с. у колі з'єднаних між собою обмоток збудження та якоря виникає постійний електричний струм. Цей струм сприяє збільшенню залишкової магнітної індукції, а це, у свою чергу, призводить до збільшення е.р.с., яка індуктується у обмотці якоря. Збільшення е.р.с. призводить до збільшення сили електричного струму у обмотках і, як наслідок, до збільшення магнітної індукції. Таким чином, відбувається самозбудження генератора постійного струму до моменту насичення його полюсів, поки магнітна індукція не перестане збільшуватись. Після цього до щіток приєднують навантаження, на затискачах якого встановлюється постійна напруга, а в утвореному колі під дією цієї напруги починає протікати постійний електричний струм.

Запитання для самоконтролю

1. У чому суть явища електромагнетизму?
2. Сформулюйте закон електромагнетизму.
3. Запишіть математично і розшифруйте закон електромагнетизму.
4. У чому суть явища електромагнітної індукції?
5. Сформулюйте правило «правої руки».
6. Сформулюйте закон електромагнітної індукції.
7. Запишіть математично і розшифруйте закон електромагнітної індукції.
8. У чому суть явища електромагнітної сили?
9. Сформулюйте правило «лівої руки».
10. Сформулюйте закон електромагнітної сили.
11. Запишіть математично і розшифруйте закон електромагнітної сили.
12. Яка електрична машина називається генератором постійного струму?
13. Складіть і опишіть конструктивну схему генератора постійного струму.
14. Що таке незалежне збудження генератора постійного струму?
15. опишіть принцип дії генератора постійного струму з незалежним збудженням.
16. Яке призначення колектора та щіткового механізму у генератора?
17. Як визначити електрорушійну силу, яку розвиває генератор?
18. Що таке самозбудження генератора постійного струму?
19. опишіть принцип дії генератора постійного струму з самозбудженням.

Фізичні явища і процеси в елементах конструкції генератора

При обертанні якоря в магнітному полі індуктора (тобто при роботі генератора) в елементах конструкції генератора спостерігаються наступні фізичні явища і процеси.

В індукторі:

- явище електричного струму в обмотці збудження;
- явище електромагнетизму в обмотці збудження;
- явище теплової дії струму в обмотці збудження;
- процес нагрівання обмотки збудження.

В якорі:

- явище електромагнітної індукції в обмотці якоря;
- явище електричного струму в обмотці якоря;
- явище електромагнітної сили від дії струму в обмотці якоря;
- явище електромагнетизму в обмотці якоря;
- явище теплової дії струму в обмотці якоря;
- процес нагрівання обмотки якоря;
- явище електромагнітної індукції в магнітопроводі якоря;
- явище вихрових струмів у магнітопроводі якоря;
- явище електромагнітної сили від дії вихрових струмів;
- явище теплової дії вихрових струмів у магнітопроводі якоря;
- явище гістерезису магнітопроводу якоря;
- явище теплової дії гістерезису магнітопроводу якоря;
- явище тертя в підшипниках;
- явище тертя між колектором та щітками;
- явище тертя якоря об повітря;
- процес нагрівання магнітопроводу якоря.

Запитання для самоконтролю

1. Перелічіть фізичні явища, які спостерігаються в механічній системі генератора постійного струму.
2. Перелічіть фізичні явища, які спостерігаються в колі збудження генератора постійного струму.
3. Перелічіть фізичні явища, які спостерігаються в колі якоря генератора постійного струму.
4. Перелічіть фізичні явища, які спостерігаються в магнітопроводі генератора постійного струму.

Енергетична діаграма генератора

Енергетична діаграма генератора – це зображення перетворення в ньому енергії. При роботі генератора, як показано вище, частина споживаної ним енергії втрачається марно та розсіюється у вигляді теплоти. Втра-

чену енергію в одиницю часу називають втратами потужності (або втратами). У генераторі є три шляхи втрат енергії: у механічній системі, в електричних колах, у магнітопроводі якоря.

Механічні втрати (ΔP_{mx}):

- втрати на тертя в підшипниках ($\Delta P_{підш}$);
- втрати на тертя між щітками та колектором ($\Delta P_{щім}$);
- втрати на вентиляцію ($\Delta P_{вент}$).

$$\Delta P_{mx} = \Delta P_{підш} + \Delta P_{щім} + \Delta P_{вент} . \quad (6.5)$$

Електричні втрати ($\Delta P_{ел}$):

- втрати в провідниках обмотки збудження в результаті теплової дії струму, що в ній протікає (ΔP_z);
- втрати в провідниках обмотки якоря в результаті теплової дії струму, що в ній протікає ($\Delta P_я$);
- втрати в щітках та колекторі в результаті теплової дії струму, що в них протікає ($\Delta P_{щ}$).

$$\Delta P_{ел} = R_z I_z^2 + R_я I_я^2 + R_{щ} I_я^2 , \quad (6.6)$$

де R_z – опір обмотки збудження, Ом;
 I_z – сила струму в обмотці збудження, А;
 $R_я$ – опір обмотки якоря, Ом;
 $I_я$ – сила струму в обмотці якоря, А;
 $R_{щ}$ – опір щіткових контактів, В.

Втрати в магнітопроводі ($\Delta P_{мг}$):

- втрати в магнітопроводі якоря в результаті теплової дії вихрових струмів, що у ньому протікають ($\Delta P_{вх}$);
- втрати в магнітопроводі якоря в результаті теплової дії гістерезису ($\Delta P_{гс}$).

$$\Delta P_{мг} = \Delta P_{вх} + \Delta P_{гс} . \quad (6.7)$$

Додаткові втрати (ΔP_{δ}) виникають у генераторі в результаті інших не врахованих явищ.

Отже, сумарні втрати (ΔP_{Σ}) при роботі генератора дорівнюють:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{mx} + \Delta P_{ел} + \Delta P_{мг} + \Delta P_{\delta} . \quad (6.8)$$

Таким чином, **енергетична діаграма** генератора має такий вигляд (рис.6.7).

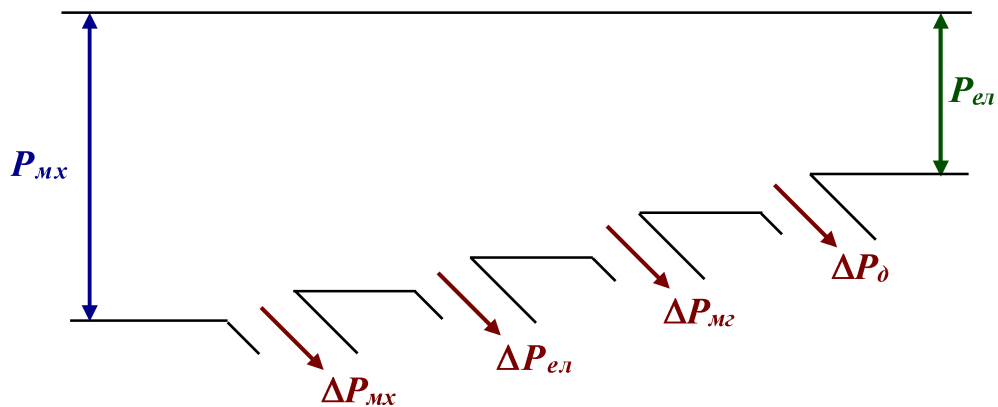


Рисунок 6.7 – Енергетична діаграма генератора постійного струму

Механічна потужність на валу генератора дорівнює:

$$P_{mx} = M \cdot \omega, \quad (6.9)$$

- де M – механічний момент на валу генератора, $H \cdot м$;
 ω – кутова швидкість обертання валу генератора, $рад/с$.
 Кутова швидкість обертання валу генератора дорівнює:

$$\omega = \frac{2\pi \cdot n}{60}, \quad (6.10)$$

- де n – частота обертання валу генератора, $об./хв$.
 Електрична потужність, яка віддається генератором навантаженню, дорівнює:

$$P_{ел} = U \cdot I, \quad (6.11)$$

- де U – напруга на затискачах генератора (на затискачах обмотки якоря), $В$;
 I – сила струму, споживаного навантаженням, $А$.

В іншому вигляді:

$$P_{ел} = P_{mx} - \Delta P_{\Sigma}. \quad (6.12)$$

Коефіцієнт корисної дії генератора дорівнює:

$$\eta = \frac{P_{ел}}{P_{mx}} = \frac{P_{mx} - \Delta P_{\Sigma}}{P_{mx}} = 1 - \frac{\Delta P_{\Sigma}}{P_{mx}}. \quad (6.13)$$

Запитання для самоконтролю

1. Складіть енергетичну діаграму генератора постійного струму та розшифруйте літерних позначень.
2. Запишіть і розшифруйте рівняння механічних втрат.
3. Запишіть і розшифруйте рівняння електричних втрат.
4. Запишіть і розшифруйте рівняння втрат у магнітопроводі якоря.
5. Які ще види втрат виникають у генераторі постійного струму?
6. Запишіть і розшифруйте формулу механічної потужності на валу генератора постійного струму.
7. Запишіть і розшифруйте формулу електричної потужності, яка віддається генератором постійного струму навантаженню.
8. Як визначити коефіцієнт корисної дії генератора постійного струму?

Розрахункова схема генератора

Відповідно до фізичних явищ і процесів у колі збудження та у колі якоря розрахункова схема генератора з незалежним збудженням має вигляд, наведений на рис.6.8а, а з самозбудженням (з паралельним збудженням) – на рис.6.8б.

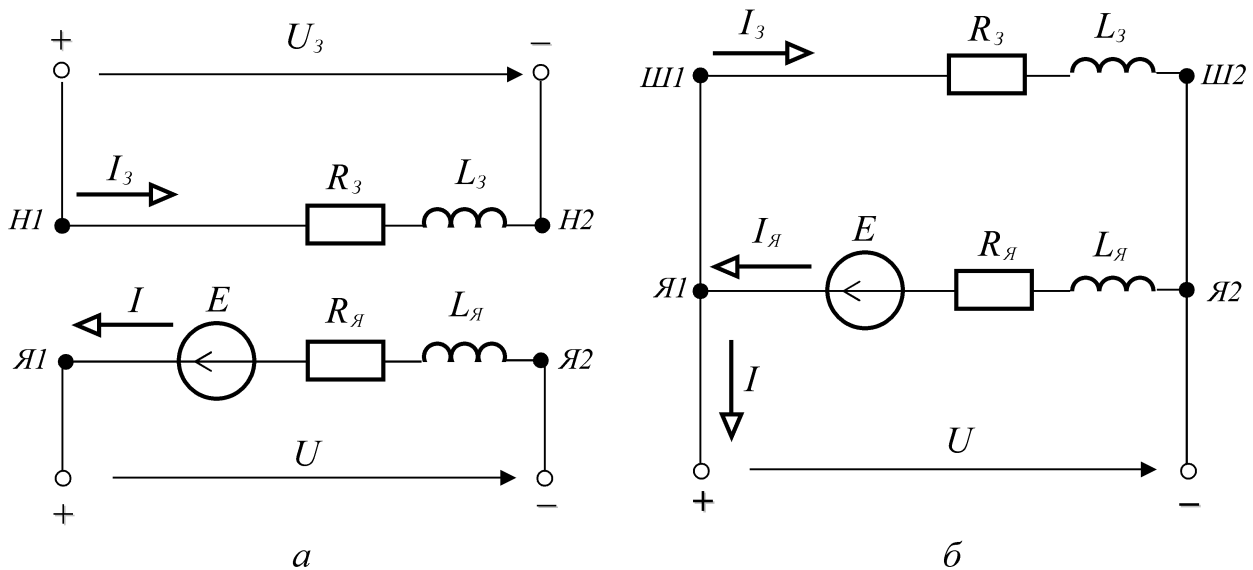


Рисунок 6.8 – Розрахункові схеми генератора постійного струму

На розрахункових схемах (рис.6.8) наведені наступні позначення:

- R_3 – опір кола обмотки збудження, Ом;
- L_3 – індуктивність обмотки збудження, Гн;
- I_3 – сила струму в обмотці збудження, А;
- E – е.р.с., яка наводиться в обмотці якоря, В;
- $R_я$ – опір обмотки якоря, Ом;
- $L_я$ – індуктивність обмотки якоря, Гн;
- $I_я$ – сила струму в обмотці якоря, А;
- I – сила струму навантаження, А;

U_3 – напруга на затискачах обмотки збудження генератора, B .

U – напруга на затискачах генератора, B .

Запитання для самоконтролю

1. Складіть розрахункову схему генератора постійного струму незалежного збудження і розшифруйте літерні позначення.
2. Складіть розрахункову схему генератора постійного струму паралельного збудження і розшифруйте літерні позначення.

Зовнішня характеристика генератора

Дана характеристика показує, як змінюється напруга на затискачах генератора при зміні сили струму навантаження, тобто **зовнішня характеристика генератора** – це залежність напруги на затискачах (на щітках) генератора від сили струму навантаження, приєднаного до генератора, при незмінних силі струму збудження і частоті обертання валу. Одержимо рівняння цієї характеристики на підставі розрахункової схеми генератора (рис.6.8а), для чого виразимо потенціал точки Я1 ($\varphi_{Я1}$) через потенціал точки Я2 ($\varphi_{Я2}$):

$$\varphi_{Я1} = \varphi_{Я2} - R_{я} \cdot I + E . \quad (6.14)$$

В індуктивності обмотки якоря спадання напруги не виникає через те, що струм постійний, а тому реактивний опір обмотки якоря дорівнює нулю.

Перепишемо (6.14) у наступному вигляді:

$$\varphi_{Я1} - \varphi_{Я2} = E - R_{я} \cdot I . \quad (6.15)$$

З огляду на те, що різниця потенціалів між точками Я1 і Я2 є напругою на затискачах генератора (тобто $\varphi_{Я1} - \varphi_{Я2} = U$), одержимо наступне:

$$U = E - R_{я} \cdot I . \quad (6.16)$$

Отримане рівняння (6.16) являє собою **рівняння зовнішньої характеристики генератора**.

Графічно зовнішня характеристика генератора (її робоча ділянка) виглядає так, як показано на рис.6.9. На рис.6.9 пунктирною лінією показана зовнішня характеристика ідеального генератора, у якого $R_{я} = 0$. Точка А – точка номінального режиму роботи генератора.

Зовнішня характеристика є похилою лінією тому, що згідно (6.16) при навантаженні генератора у його обмотці якоря виникає спадання напруги.

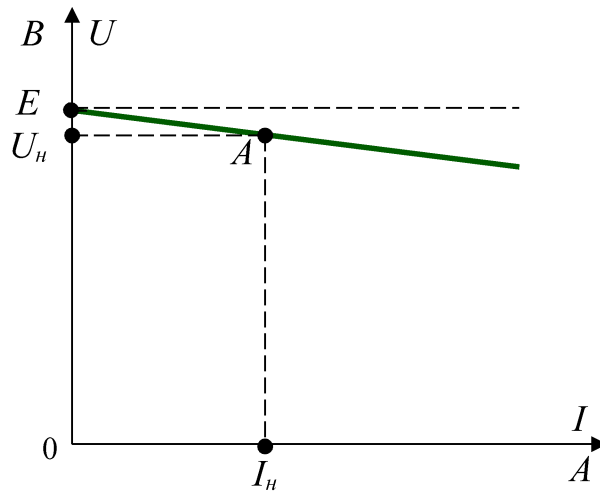


Рисунок 6.9 – Зовнішня характеристика генератора постійного струму

Запитання для самоконтролю

1. Дайте визначення зовнішньої характеристики генератора.
2. Запишіть і розшифруйте вираз зовнішньої характеристики генератора.
3. Зобразіть якісно зовнішню характеристику генератора.
4. Чому зовнішня характеристика генератора є похилою лінією?
5. Що відбувається з напругою на затискачах генератора при збільшенні навантаження? Чому?

Регулювання напруги генератора

Напруга на затискачах генератора, як видно з (6.16), залежить від значення е.р.с., що наводиться в обмотці якоря, та сили струму навантаження. Е.р.с., що наводиться в обмотці якоря, як видно з (6.5), залежить від значення магнітного потоку і швидкості обертання якоря. Магнітний потік, як видно з (3.6), залежить від сили струму в обмотці збудження:

$$\Phi = \frac{L_z}{w_z} \cdot I_z, \quad (6.17)$$

де w_z – кількість витків обмотки збудження.

Тому можемо записати рівняння зовнішньої характеристики генератора в іншому вигляді:

$$U = k \cdot \frac{L_z}{w_z} \cdot I_z \cdot \omega - R_a \cdot I. \quad (6.18)$$

З рівняння (6.18) випливає, що регулювати напругу на затискачах генератора можна наступними способами:

- 1) зміною сили струму в обмотці збудження (для цього використовують реостат, включений послідовно з обмоткою збудження); при збільшенні

сили струму збудження напруга на затискачах генератора буде збільшуватись, і навпаки (рис.6.10а);

- 2) зміною швидкості обертання якоря (для цього використовують приводний агрегат); при збільшенні швидкості обертання якоря напруга на затискачах генератора буде збільшуватись, і навпаки (рис.6.10б).

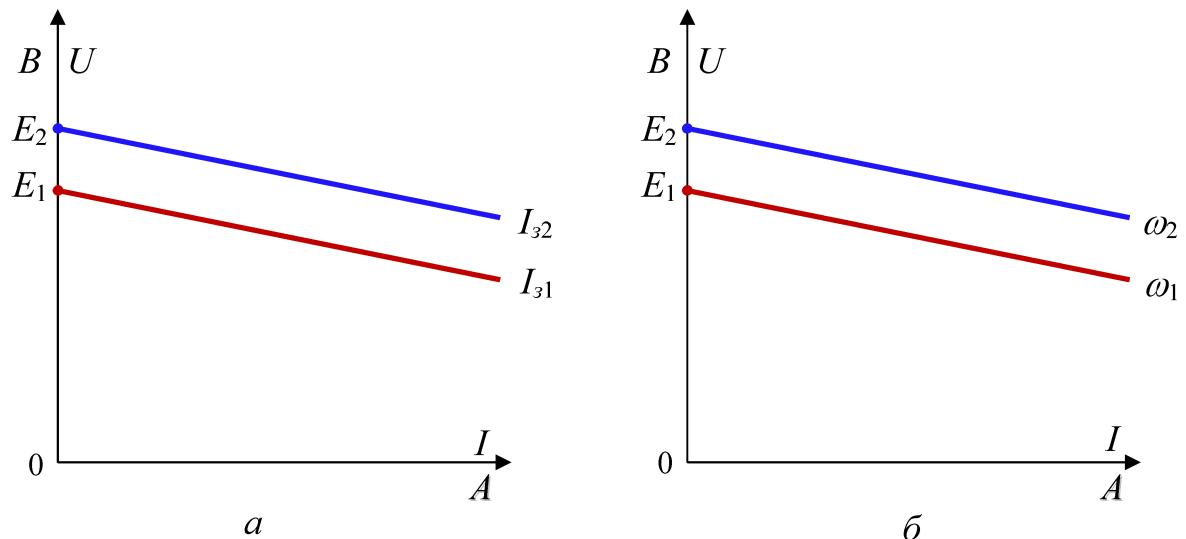


Рисунок 6.10 – Сімейство зовнішніх характеристик генератора постійного струму (а – при регулюванні силою струму в обмотці збудження: $I_{31} < I_{32}$; б – при регулюванні швидкістю обертання якоря: $\omega_1 < \omega_2$)

Запитання для самоконтролю

1. Перелічіть способи регулювання напруги на затискачах генератора, укажіть технічні засоби для їх реалізації.
2. Наведіть сімейства зовнішніх характеристик генератора при різних способах регулювання напруги на його затискачах, поясніть їх.

Принципова електрична схема керування генератором

Відповідно до викладеного вище, принципова електрична схема керування генератором з незалежним збудженням буде мати вигляд, показаний на рис.6.11а, а генератором з паралельним збудженням – на рис.6.11б.

На даних схемах приведені наступні позначення:

- $PЗ$ – регулювальний реостат у колі збудження;
- $OЗ$ – обмотка збудження;
- $H1, H2$ – затискачі обмотки збудження;
- $Ш1, Ш2$ – затискачі обмотки збудження;
- $Я1, Я2$ – затискачі обмотки якоря;
- G – якір генератора;
- ω – кутова швидкість обертання валу генератора;
- $РА$ – амперметр, що вимірює силу струму навантаження;

- PV* – вольтметр, що вимірює напругу на затискачах генератора;
PH – реостат, що моделює навантаження.

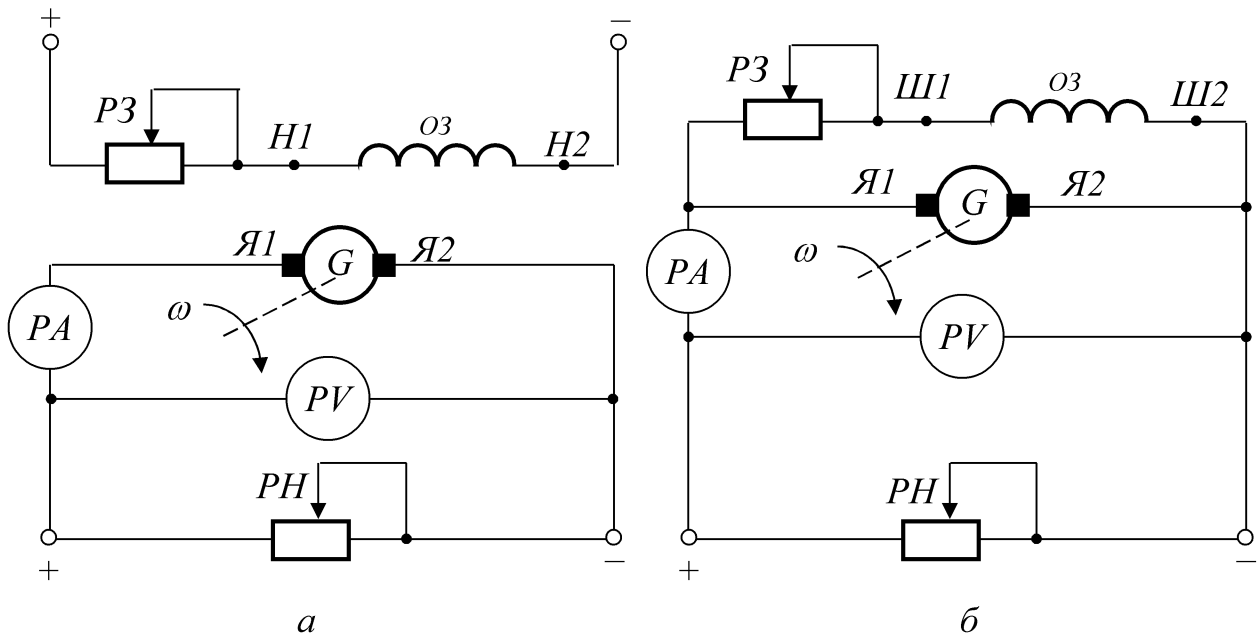


Рисунок 6.11 – Принципові електричні схеми керування генератором

Керування генератором здійснюється так: при пересуванні повзуна реостата $P3$ ліворуч опір реостата зменшується. Внаслідок цього сила струму збудження збільшується, що призводить до зростання магнітного потоку генератора. Останнє обумовлює збільшення е.р.с., яка наводиться в обмотці якоря генератора, та, як наслідок, напруги на затискачах генератора. При пересуванні повзуна реостата $P3$ праворуч усе відбувається навпаки. При такому способі регулювання робота генератора буде характеризуватись сімейством зовнішніх характеристик, показаних на рис.6.12.

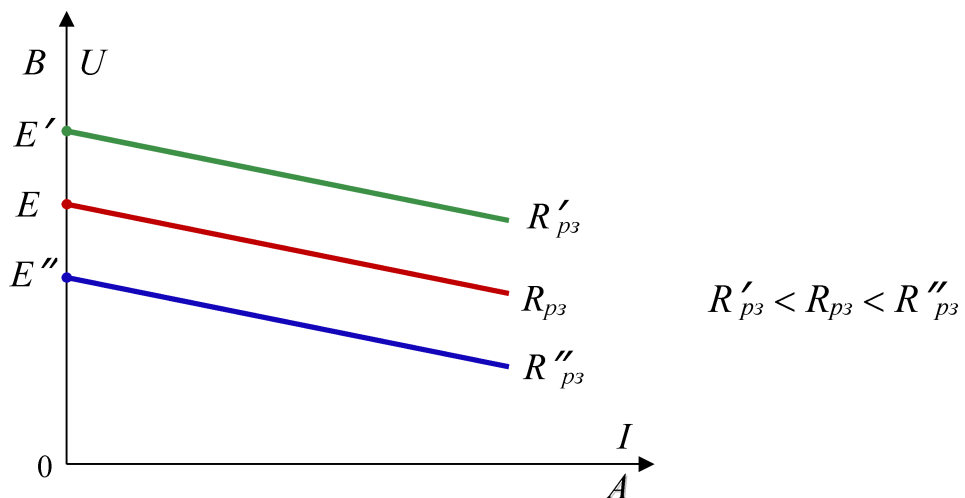


Рисунок 6.12 – Сімейство зовнішніх характеристик генератора постійного струму при регулюванні за допомогою реостата збудження

Приклад 6.1

До генератора постійного струму незалежного збудження при незмінній кутовій швидкості підводиться механічна потужність, яка дорівнює **7,0 кВт**. Генератор розвиває електрорушійну силу, яка дорівнює **300 В**. Опір обмотки якоря генератора (включаючи опір щіток) дорівнює **1,5 Ом**. Опір кола збудження генератора дорівнює **270 Ом**. На затискачі кола збудження подається напруга, яка дорівнює **270 В**.

До генератора підключене навантаження опором **13,5 Ом** за допомогою ідеальної лінії електропередачі. Втрати потужності в механічній системі генератора складають **1,5 %** від потужності, яка підводиться до валу. Втрати потужності в магнітопроводі генератора складають **3,0 %** від потужності, яка підводиться до валу. Додаткові втрати складають **0,1 %** від потужності, яка підводиться до валу.

Скласти розрахункову схему якірного кола з навантаженням і кола збудження.

Визначити:

- силу струму в якірному колі;
- потужність, яка розвивається генератором;
- втрати потужності в обмотці якоря;
- силу струму в колі збудження;
- втрати потужності в колі збудження;
- втрати потужності в механічній системі;
- втрати потужності в магнітопроводі;
- сумарні втрати потужності в генераторі;
- потужність, яка віддається генератором у мережу (потужність навантаження);
- електричний коефіцієнт корисної дії генератора;
- коефіцієнт корисної дії генератора як електромеханічного перетворювача;
- електроенергію, яку споживе навантаження за **100 год**.

Побудувати в масштабі по двох точках зовнішню характеристику генератора.

Розв'язок.

1. Розрахункова схема якірного кола і кола збудження наведена на рис.6.8а.

2. Визначаємо силу струму в якірному колі:

$$I_{\text{я}} = \frac{E}{R_{\text{я}} + R_{\text{НАВ}}}; \quad I_{\text{я}} = \frac{300}{1,5 + 13,5} = \frac{300}{15} = 20 \text{ А.}$$

3. Визначаємо потужність, яка розвивається генератором:

$$P = E \cdot I; \quad P = 300 \cdot 20 = 6000 \text{ Вт} = 6,0 \text{ кВт.}$$

4. Визначаємо втрати потужності в обмотці якоря:

$$\Delta P_{\text{Я}} = R_{\text{Я}} I_{\text{Я}}^2; \quad \Delta P_{\text{Я}} = 1,5 \cdot 20^2 = 1,5 \cdot 400 = 600 \text{ Вт}.$$

5. Визначаємо силу струму в колі збудження:

$$I_3 = \frac{U_3}{R_3}; \quad I_3 = \frac{270}{270} = 1 \text{ А}.$$

6. Визначаємо втрати потужності в колі збудження:

$$\Delta P_3 = R_3 I_3^2; \quad \Delta P_3 = 270 \cdot 1^2 = 270 \text{ Вт}.$$

7. Визначаємо втрати потужності в механічній системі:

$$\Delta P_{\text{МХ}} = 0,015 \cdot P_1; \quad \Delta P_{\text{МХ}} = 0,015 \cdot 7000 = 105 \text{ Вт}.$$

8. Визначаємо втрати потужності в магнітопроводі:

$$\Delta P_{\text{МГ}} = 0,03 \cdot P_1; \quad \Delta P_{\text{МГ}} = 0,03 \cdot 7000 = 210 \text{ Вт}.$$

9. Визначаємо додаткові втрати потужності в генераторі:

$$\Delta P_{\text{Д}} = 0,001 \cdot P_1; \quad \Delta P_{\text{Д}} = 0,001 \cdot 7000 = 7 \text{ Вт}.$$

10. Визначаємо сумарні втрати потужності в генераторі:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_3 + \Delta P_{\text{Я}} + \Delta P_{\text{МХ}} + \Delta P_{\text{МГ}} + \Delta P_{\text{Д}};$$

$$\Delta P_{\Sigma} = 600 + 270 + 105 + 210 + 7 = 1192 \text{ Вт}.$$

11. Визначаємо потужність, яка віддається генератором у мережу (потужність навантаження):

$$P_{\text{ЕЛ}} = R_{\text{НАВ}} I_{\text{Я}}^2; \quad P_{\text{ЕЛ}} = 13,5 \cdot 20^2 = 5400 \text{ Вт} = 5,4 \text{ кВт}.$$

12. Визначаємо електричний коефіцієнт корисної дії генератора:

$$\eta_{\text{ЕЛ}} = \frac{P_{\text{ЕЛ}}}{P}; \quad \eta_{\text{ЕЛ}} = \frac{5400}{6000} = 0,9.$$

13. Визначаємо коефіцієнт корисної дії генератора як електромеханічного перетворювача:

$$\eta = \frac{P_{\text{ЕЛ}}}{P_{\text{МХ}}}; \quad \eta = \frac{5400}{7000} = 0,77.$$

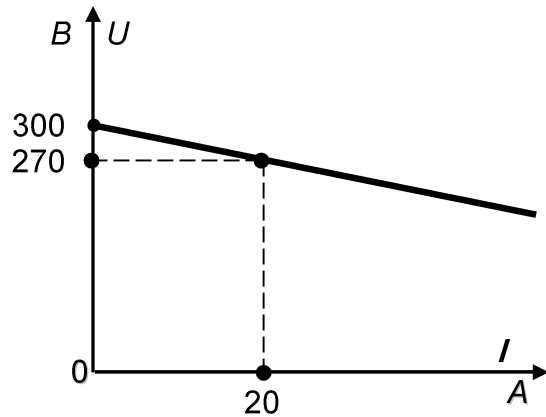
14. Визначаємо електроенергію, яку споживе навантаження за 100 год:

$$W = P_2 \cdot t; \quad W = 5,4 \cdot 100 = 540 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

15. Розраховуємо та будуємо зовнішню характеристику генератора:

$$U = E - R_{\text{я}}I; \quad U = 300 - 1,5 \cdot I.$$

$U, \text{В}$	300	270
$I, \text{А}$	0	20



Запитання для самоконтролю

1. Складіть принципову електричну схему керування генератором постійного струму незалежного і паралельного збудження.
2. Поясніть, як регулюється напруга на затискачах генератора при зміні навантаження, використовуючи зовнішню характеристику генератора та принципову схему керування.

Завдання для самоконтролю

До генератора постійного струму незалежного збудження при незмінній кутовій швидкості підводиться механічна потужність, яка дорівнює **5,0 кВт**. Генератор розвиває електрорушійну силу, яка дорівнює **240 В**. Опір обмотки якоря генератора (включаючи опір щіток) дорівнює **0,5 Ом**. Опір кола збудження дорівнює **220 Ом**. На затискачі кола збудження подається напруга, яка дорівнює **220 В**.

До генератора підключене навантаження опором **11,5 Ом** за допомогою ідеальної лінії електропередачі. Втрати потужності в механічній системі генератора складають **0,5 %** від потужності, що підводиться до валу. Втрати потужності в магнітопроводі генератора складають **1,0 %** від потужності, що підводиться до валу. Додаткові втрати потужності в генераторі складають **0,2 %** від потужності, що підводиться до валу.

1. Скласти розрахункові схеми якірного кола з навантаженням і кола збудження.
2. Визначити силу струму в якірному колі.
3. Визначити потужність, яка розвивається генератором.
4. Визначити втрати потужності в обмотці якоря.
5. Визначити силу струму в обмотці збудження.
6. Визначити втрати потужності в обмотці збудження
7. Визначити втрати потужності в механічній системі.
8. Визначити втрати потужності в магнітопроводі.
9. Визначити додаткові втрати потужності в генераторі.
10. Визначити сумарні втрати потужності в генераторі.
11. Визначити потужність, яка віддається генератором у мережу (потужність навантаження).
12. Визначити електричний коефіцієнт корисної дії генератора.
13. Визначити коефіцієнт корисної дії генератора як електромеханічного перетворювача.

14. Побудувати в масштабі по двох точках зовнішню характеристику генератора.
15. Визначити напругу на затискачах генератора при силі струму в якірному колі, яка дорівнює 10 A .
16. Визначити електроенергію, яку споживе навантаження за 10 год .

6.2 Електродвигун постійного струму

Будова та принцип дії двигуна

Будова електродвигуна постійного струму аналогічна будові генератора постійного струму (рис.6.4, 6.5). Властивість електричних машин працювати як генератором, так і електродвигуном при незмінній конструкції називається **оборотністю**. Відмінністю електродвигуна від генератора постійного струму є призначення колектора і щіткового механізму. В електродвигуна – це зміна напрямку струму в провідниках обмотки якоря (тобто збереження напрямку обертання якоря електродвигуна).

Принцип дії електродвигуна заснований на явище електромагнітної сили, яке викладене у п.6.1. Принцип дії наступний: індуктор (обмотка збудження, яка розташована на полюсах) створює основне магнітне поле. До обмотки якоря підводиться постійна напруга, в результаті чого у ній протікає електричний струм. При протіканні струму в обмотці якоря спостерігається явище електромагнітної сили. Сили, що діють на провідники обмотки якоря, створюють обертаючий момент і двигун приходить в обертання (його якір). При обертанні якоря електродвигуна обмотка якоря перетинає силові лінії магнітного поля, в результаті чого провідний контур (обмотка якоря) пронизується змінним магнітним полем. Це призводить до виникнення в ній явища електромагнітної індукції та наведення в обмотці якоря е.р.с., яка протилежна напрямку струму (противо-е.р.с.).

Запитання для самоконтролю

1. Яка електрична машина називається двигуном постійного струму?
2. У чому суть явища електромагнітної сили?
3. Сформулюйте правило «лівої руки».
4. Сформулюйте закон електромагнітної сили.
5. Запишіть математично і розшифруйте закон електромагнітної сили.
6. Що розуміється під оборотністю електричної машини?
7. Складіть і опишіть конструктивну схему двигуна постійного струму.
8. Опишіть принцип дії двигуна постійного струму.
9. Яке призначення колектора та щіткового механізму у двигуна постійного струму?
10. Що таке незалежне збудження двигуна постійного струму?
11. Що таке самозбудження двигуна постійного струму?

Фізичні явища і процеси в елементах конструкції двигуна

У кожному з елементів конструкції електродвигуна протікають такі ж фізичні явища та процеси, як і в генераторі, за винятком явища електромагнітної сили, яка діє на провідники обмотки якоря зі струмом та замість гальмівної стає рушійною.

Запитання для самоконтролю

1. Перелічіть фізичні явища, які спостерігаються в колі збудження двигуна постійного струму.
2. Перелічіть фізичні явища, які спостерігаються в колі якоря двигуна постійного струму.
3. Перелічіть фізичні явища, які спостерігаються в магнітопроводі двигуна постійного струму.
4. Перелічіть фізичні явища, які спостерігаються в механічній системі двигуна постійного струму.

Енергетична діаграма двигуна

Енергетична діаграма електродвигуна аналогічна енергетичній діаграмі генератора, яка представлена в зворотному порядку (рис.6.13).

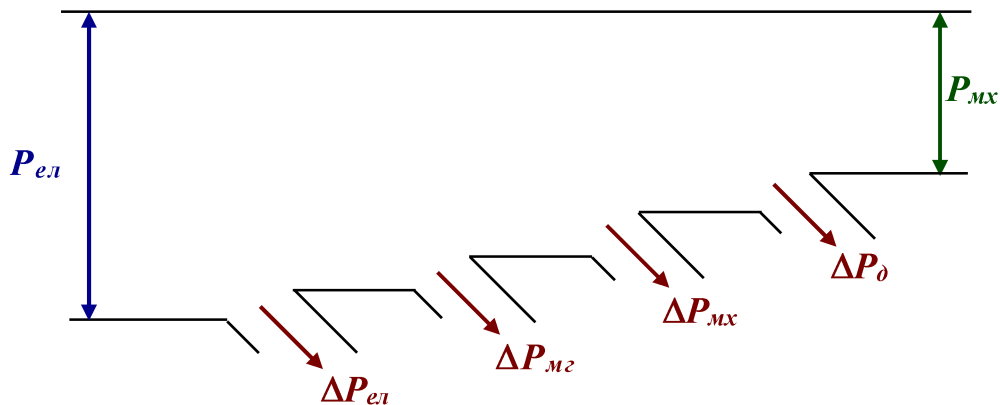


Рисунок 6.13 – Енергетична діаграма двигуна постійного струму

Обертаючий момент на валу двигуна (M) дорівнює моменту опору механічного навантаження ($M_{он}$):

$$M = M_{он} . \quad (6.19)$$

Момент, що розвивається на валу електродвигуна, дорівнює:

$$M = k\Phi \cdot I_{я} . \quad (6.20)$$

Механічна потужність на валу електродвигуна дорівнює:

$$P_{\text{мх}} = M \cdot \omega, \quad (6.21)$$

де ω – кутова швидкість обертання валу електродвигуна, рад/с .
Електрична потужність, споживана електродвигуном з мережі, дорівнює:

$$P_{\text{ел}} = U \cdot I + U_3 \cdot I_3 \quad \text{або} \quad P_{\text{ел}} = U \cdot I, \quad (6.22)$$

де I – сила струму, споживаного електродвигуном, A .
 U – напруга на затискачах електродвигуна (на затискачах обмотки якоря), V ;
 I_3 – сила струму в обмотці збудження електродвигуна, A .
 U_3 – напруга на затискачах обмотки збудження електродвигуна, V .
Перший вираз (6.22) відповідає електродвигу з незалежним збудженням, другий вираз (6.22) – електродвигу з паралельним збудженням.

В іншому вигляді:

$$P_{\text{ел}} = P_{\text{мх}} + \Delta P_{\Sigma}. \quad (6.23)$$

Коефіцієнт корисної дії електродвигуна дорівнює:

$$\eta = \frac{P_{\text{мх}}}{P_{\text{ел}}} = \frac{P_{\text{ел}} - \Delta P_{\Sigma}}{P_{\text{ел}}} = 1 - \frac{\Delta P_{\Sigma}}{P_{\text{ел}}}. \quad (6.24)$$

Приклад 6.2

Якір електродвигуна обертається зі швидкістю **1000 об./хв.** До електродвигуна підведена напруга **200 В**. Електродвигун споживає струм силою **5 А**. Коефіцієнт корисної дії електродвигуна дорівнює **89 %**.

Визначити потужність на валу та обертаючий момент електродвигуна.

Розв'язок.

1. Визначаємо потужність на валу електродвигуна:

$$P_{\text{мх}} = U \cdot I \cdot \eta; \quad P_{\text{мх}} = 200 \cdot 5 \cdot 0,89 = 890 \text{ Вт}.$$

2. Визначаємо кутову швидкість обертання валу електродвигуна:

$$\omega = \frac{2\pi \cdot n}{60}; \quad \omega = \frac{6,28 \cdot 1000}{60} = 105 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

3. Визначаємо обертаючий момент електродвигуна:

$$M = \frac{P_{\text{мх}}}{\omega}; \quad M = \frac{890}{105} = 8,5 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Запитання для самоконтролю

1. Складіть енергетичну діаграму двигуна постійного струму, розшифруйте літерні позначення.
2. Запишіть і розшифруйте рівняння електричних втрат.
3. Запишіть і розшифруйте рівняння втрат у магнітопроводі якоря.
4. Запишіть і розшифруйте рівняння механічних втрат.
5. Які ще види втрат виникають у двигуні постійного струму?
6. Як визначити сумарні втрати потужності у двигуні постійного струму?
7. Запишіть і розшифруйте вираз моменту, який розвивається електродвигуном постійного струму.
8. Запишіть і розшифруйте вираз механічної потужності на валу електродвигуна постійного струму.
9. Запишіть і розшифруйте вираз електричної потужності, яку споживає електродвигун постійного струму.
10. Як визначити коефіцієнт корисної дії двигуна постійного струму?

Розрахункова схема двигуна

Відповідно до фізичних явищ і процесів у колі збудження та у колі якоря розрахункова схема двигуна з незалежним збудженням має вигляд, наведений на рис.6.14а, а з самозбудженням (з паралельним збудженням) – на рис.6.14б.

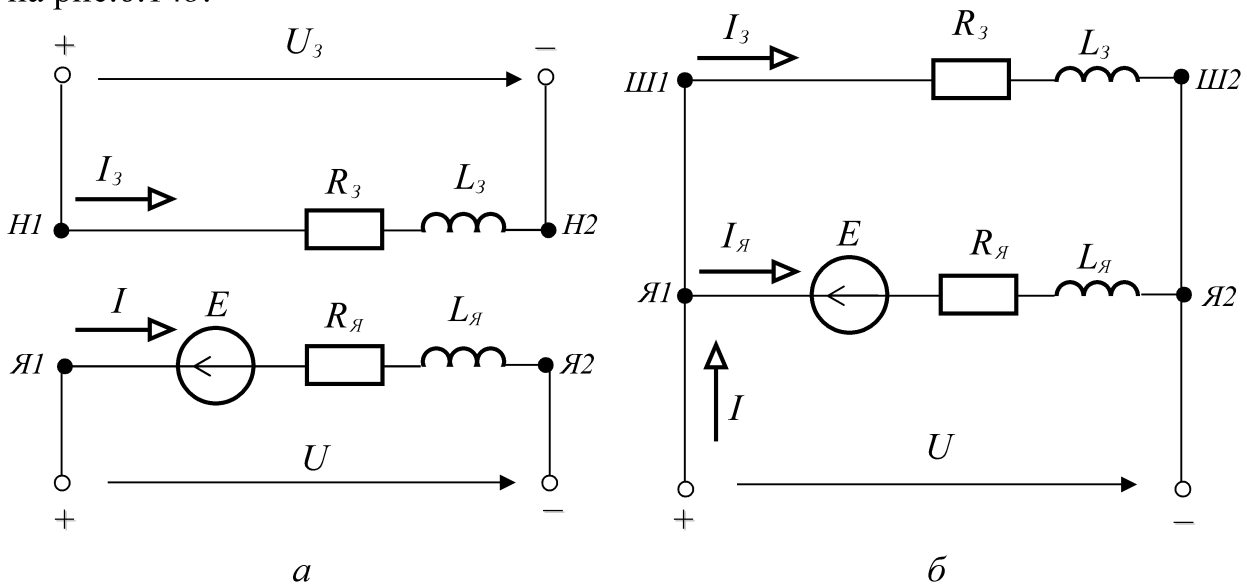


Рисунок 6.14 – Розрахункові схеми двигуна постійного струму

На розрахункових схемах (рис.6.14) наведені наступні позначення:

- R_3 – опір кола обмотки збудження, Ом;
- L_3 – індуктивність обмотки збудження, Гн;
- I_3 – сила струму в обмотці збудження, А;
- E – протипо-е.р.с., що наводиться в обмотці якоря, В;
- $R_я$ – опір кола обмотки якоря, Ом;

- $L_{я}$ – індуктивність обмотки якоря, Гн;
 $I_{я}$ – сила струму в обмотці якоря, А;
 I – сила струму, споживаного електродвигуном, А;
 $U_з$ – напруга на затискачах обмотки збудження електродвигуна, В.
 U – напруга на затискачах електродвигуна (на затискачах обмотки якоря), В.

Запитання для самоконтролю

1. Складіть розрахункову схему двигуна постійного струму незалежного збудження і розшифруйте літерні позначення.
2. Складіть розрахункову схему двигуна постійного струму паралельного збудження і розшифруйте літерні позначення.

Швидкісна характеристика двигуна

Одержимо рівняння швидкісної характеристики на підставі розрахункової схеми електродвигуна (рис.6.13б), для чого складемо рівняння електричної рівноваги якірного кола та виразимо потенціал точки Я2 ($\varphi_{Я2}$) через потенціал точки Я1 ($\varphi_{Я1}$):

$$\varphi_{Я2} = \varphi_{Я1} - E - R_{я} \cdot I_{я}. \quad (6.25)$$

Перепишемо (6.25) у наступному вигляді:

$$E = \varphi_{Я1} - \varphi_{Я2} - R_{я} \cdot I_{я}. \quad (6.26)$$

З огляду на те, що різниця потенціалів між точками Я1 і Я2 є напругою на затискачах електродвигуна (тобто $\varphi_{Я1} - \varphi_{Я2} = U$), одержимо наступне:

$$E = U - R_{я} \cdot I_{я}. \quad (6.27)$$

З урахуванням (6.4) одержимо:

$$k\Phi \cdot \omega = U - R_{я} \cdot I_{я}. \quad (6.28)$$

З (6.28) отримаємо **рівняння швидкісної характеристики електродвигуна** – залежність кутової швидкості обертання якоря від сили струму в якірному колі при незмінних напрузі на затискачах електродвигуна і магнітному потоці:

$$\omega = \frac{U - R_{я} \cdot I_{я}}{k\Phi} \quad (6.29)$$

Графічно дана залежність виглядає так, як показано на рис.6.15.

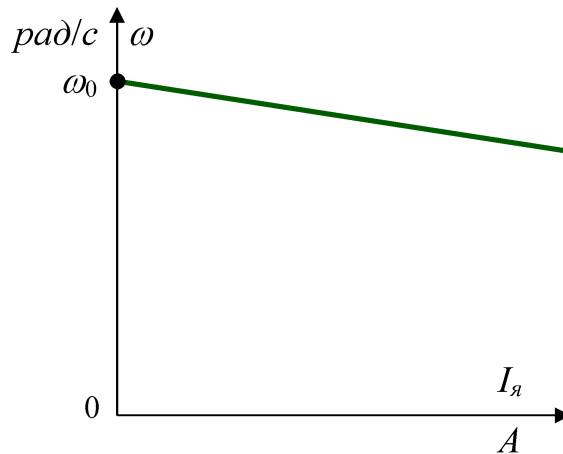


Рисунок 6.15 – Швидкісна характеристика двигуна постійного струму

Швидкісна характеристика є похилою лінією тому, що при збільшенні навантаження електродвигуна у його колі якоря збільшується спадання напруги, а це згідно (6.29) призводить до зменшення швидкості обертання валу електродвигуна.

На рис.6.14 ω_0 – кутова швидкість обертання якоря при ідеальному холостому ході електродвигуна (тобто $I_{я} = 0$):

$$\omega_0 = \frac{U}{k\Phi} \quad (6.30)$$

Запитання для самоконтролю

1. Запишіть і розшифруйте вираз швидкісної характеристики двигуна.
2. Зобразіть якісно швидкісну характеристику двигуна.
3. Чому швидкісна характеристика двигуна є похилою лінією?
4. Як розрахувати швидкість обертання якоря при ідеальному холостому ході електродвигуна?

Регулювання швидкості двигуна

Рівняння швидкісної характеристики (6.29) з урахуванням (6.17) можна записати у такому вигляді:

$$\omega = \frac{U - R_{я} \cdot I_{я}}{k \cdot \frac{L_{з}}{w_{з}} \cdot I_{з}} \quad (6.31)$$

З отриманого рівняння (6.31) випливає, що швидкість електродвигуна можна регулювати наступними способами:

- 1) *змінюючи напругу на затискачах електродвигуна*: напругу, як правило, можна тільки знижувати відносно номінального значення за допомогою регулятора напруги, тому швидкість двигуна можна регулювати тільки вниз – у бік зниження в порівнянні з номінальним значенням;
- 2) *змінюючи силу струму збудження*: силу струму збудження, як правило, можна тільки зменшувати відносно номінального значення за допомогою реостата в колі збудження, тому швидкість двигуна можна регулювати тільки вверх – у бік підвищення в порівнянні з номінальним значенням (рис.6.16а);
- 3) *змінюючи опору якірного кола*: швидкість двигуна можна регулювати вниз від швидкості ідеального холостого ходу за допомогою реостата у якірному колі (його називають пусковим) (рис.6.16б).

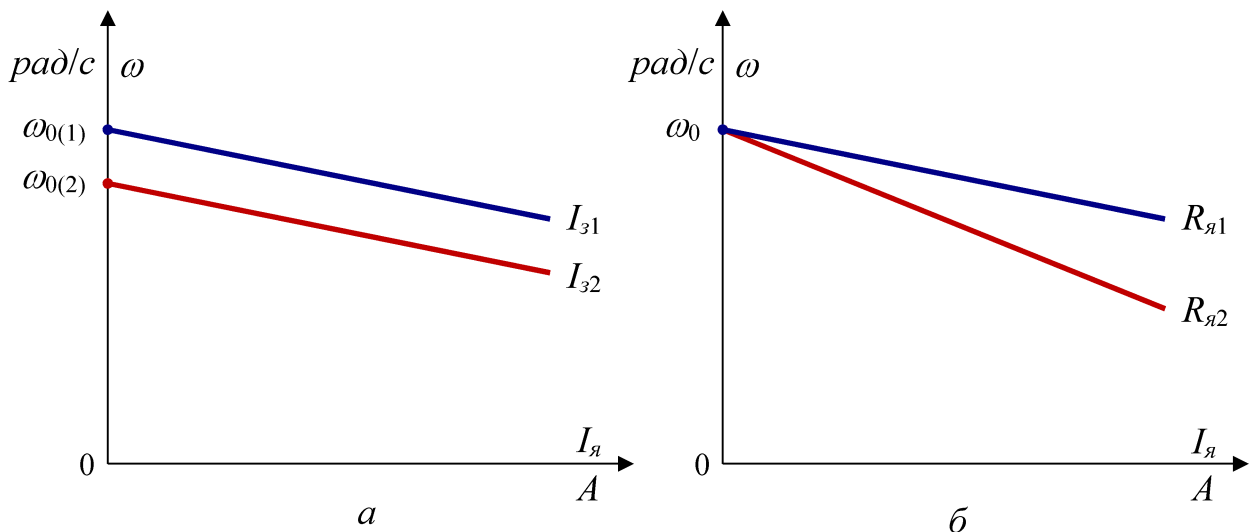


Рисунок 6.16 – Сімейство швидкісних характеристик двигуна постійного струму (а – при регулюванні силою струму в обмотці збудження: $I_{з1} < I_{з2}$; б – при регулюванні опором якірного кола: $R_{я1} < R_{я2}$)

Зміна напрямку обертання валу електродвигуна називається **реверс**. Його можна здійснити, помінявши напрям струму в обмотці якоря або в обмотці збудження (на підставі правила «лівої руки»). Для цього необхідно поміняти місцями кінці з'єднувальних проводів, які приєднані до затискачів Я1 і Я2 або до затискачів Н1 і Н2 (Ш1 і Ш2). При одночасній зміні струмів в обмотках електродвигуна напрям його обертання не зміниться.

Запитання для самоконтролю

1. Перелічіть способи регулювання швидкості двигуна постійного струму, укажіть технічні засоби для їх реалізації.
2. Наведіть сімейства швидкісних характеристик електродвигуна та поясніть їх.
3. Що таке реверс електродвигуна? Як його здійснити?

Принципова електрична схема керування двигуном

Відповідно до викладеного вище, складаємо принципову електричну схему керування двигуном з незалежним збудженням (рис.6.17а) і двигуном з паралельним збудженням (рис.6.17б).

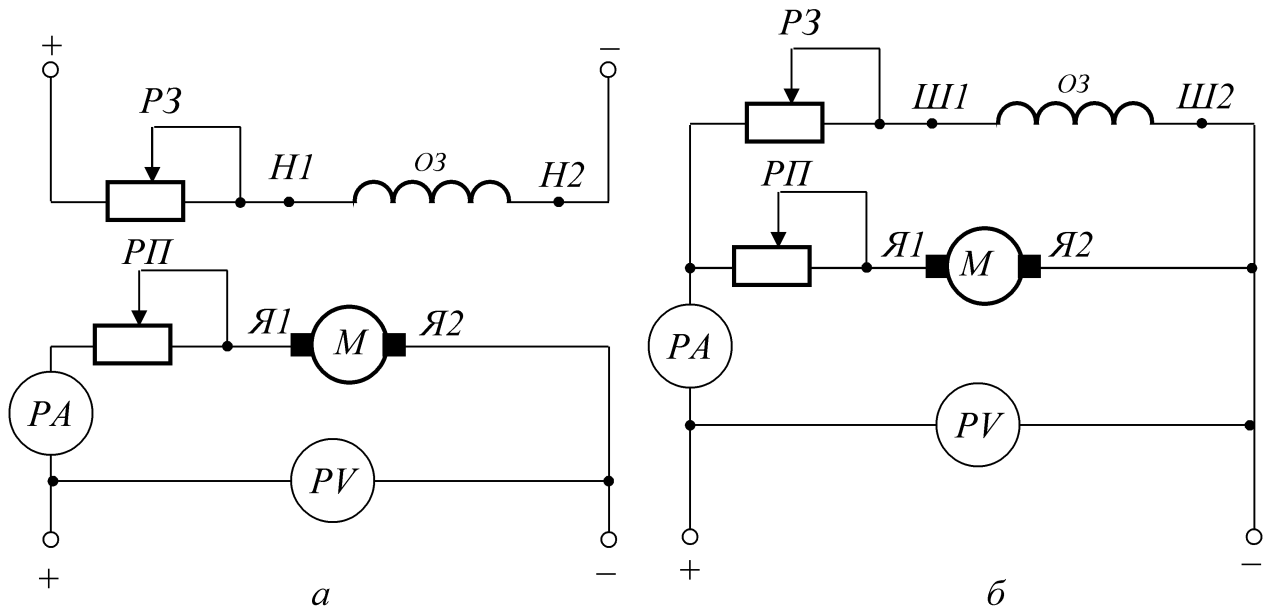


Рисунок 6.17 – Принципові електричні схеми керування електродвигуном

На даних схемах (рис.6.17) наведені наступні позначення:

- $P3$ – регулювальний реостат у колі збудження;
- $O3$ – обмотка збудження;
- $H1, H2$ – затискачі обмотки збудження;
- $Ш1, Ш2$ – затискачі обмотки збудження;
- PP – пусковий реостат у колі якоря;
- $Я1, Я2$ – затискачі обмотки якоря;
- M – якір електродвигуна;
- PA – амперметр, що вимірює силу струму, споживаного електродвигуном;
- PV – вольтметр, що вимірює напругу на затискачах електродвигуна.

З урахуванням принципових електричних схем керування електродвигуном (рис.6.16) опори кола збудження і кола якоря на розрахункових схемах електродвигуна (рис.6.13) будуть дорівнювати:

$$R_z = R_{обм.з} + R_{pz}, \quad (6.32)$$

де $R_{обм.з}$ – опір обмотки збудження, Ом;
 $R_{рз}$ – опір реостата у колі збудження, Ом.

$$R_{я} = R_{обм.я} + R_{рп}, \quad (6.33)$$

де $R_{обм.я}$ – опір обмотки якоря, Ом;
 $R_{рп}$ – опір пускового реостата, Ом.

Тому рівняння швидкісної характеристики електродвигуна (6.29) на підставі (6.33) може бути записано так:

$$\omega = \frac{U - (R_{обм.я} + R_{рп}) \cdot I_{я}}{k\Phi}. \quad (6.34)$$

Регулювання швидкості електродвигуна здійснюється за рахунок переміщення повзунів реостатів РЗ і РП. При пересуванні повзуна реостата РП ліворуч опір якірного кола зменшується, внаслідок чого спадання напруги у якірному колі зменшується, а швидкість обертання валу збільшується, і навпаки. При пересуванні повзуна реостата РЗ праворуч його опір збільшується, внаслідок чого зменшується сила струму збудження і магнітний потік електродвигуна, а швидкість обертання валу збільшується, і навпаки.

У початковий момент пуску якір електродвигуна нерухомий ($\omega = 0$), тому противо-е.р.с. в обмотці якоря згідно (6.4) дорівнює нулю ($E = 0$). Тому сила струму в обмотці якоря при пуску на підставі (6.27) дорівнює:

$$I_{я.п} = \frac{U}{R_{я}}. \quad (6.35)$$

Опір обмотки якоря незначний, тому опір якірного кола без застосування пускового реостата теж буде незначним. Внаслідок цього сила струму в обмотці якоря без застосування цього реостата в початковий момент пуску в декілька разів перевищить номінальне значення, що є небезпечним для електродвигуна. Щоб зменшити силу струму в обмотці якоря при пуску, послідовно з цією обмоткою включають пусковий реостат, який при пуску повинен бути введений.

Зі зниженням сили струму в обмотці якоря при пуску згідно (6.20) зменшується і момент, який розвиває електродвигун. Щоб його збільшити, необхідно підвищити магнітний потік в електродвигуні, що досягається збільшенням сили струму збудження за рахунок виведення регулювального реостату у колі збудження при пуску.

Отже, при пуску регулювальний реостат у колі збудження повинен бути виведений, а пусковий реостат повинен бути введений.

Приклад 6.3

Електродвигун постійного струму з паралельним збудженням, який має номінальну потужність **2,2 кВт**, номінальну частоту обертання **1500 об./хв.**, номінальну напругу **110 В**, номінальний коефіцієнт корисної дії **85 %**, підключений до мережі постійного струму напругою **110 В**. Опір обмотки якоря двигуна (включаючи опір щіток) дорівнює **0,5 Ом**; опір обмотки збудження дорівнює **55 Ом**.

Скласти принципову електричну схему керування електродвигуном та розрахункову схему якорного кола і кола збудження.

Визначити:

- потужність, яку споживає електродвигун з мережі при номінальному навантаженні;
- номінальний струм електродвигуна;
- струм в обмотці збудження;
- номінальний струм кола якоря електродвигуна;
- пусковий струм кола якоря електродвигуна;
- значення пускового опору, яке забезпечує пусковий струм кола якоря рівним номінальному струму якоря;
- сумарні втрати потужності в електродвигуні.

Розв'язок.

1. Принципова електрична схема керування електродвигуном наведена на рис.6.16б. Складаємо розрахункову схему, яка має у своєму складі якорне коло і коло збудження (рис.6.18):

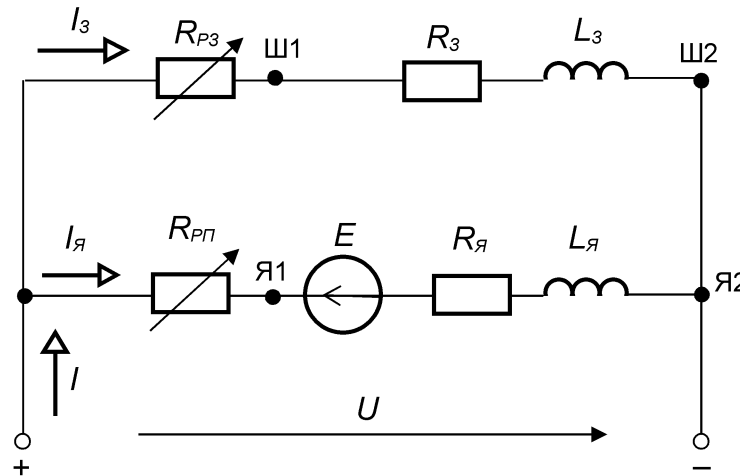


Рис.6.18

2. Визначаємо потужність, споживану електродвигуном з мережі при номінальному навантаженні:

$$P_{\text{ЕЛ.Н}} = \frac{P_{\text{МХ.Н}}}{\eta_{\text{Н}}}; \quad P_{\text{ЕЛ.Н}} = \frac{2200}{0,85} = 2588 \text{ Вт.}$$

3. Визначаємо номінальний струм електродвигуна:

$$I_{\text{Н}} = \frac{P_{\text{ЕЛ.Н}}}{U_{\text{Н}}}; \quad I_{\text{Н}} = \frac{2588}{110} = 23,5 \text{ А.}$$

4. Визначаємо струм в обмотці збудження електродвигуна:

$$I_3 = \frac{U_H}{R_3}; \quad I_3 = \frac{110}{55} = 2 \text{ A}.$$

5. Визначаємо номінальний струм у колі якоря електродвигуна:

$$I_H - I_{\text{я.н}} - I_3 = 0; \quad I_{\text{я.н}} = I_H - I_3; \quad I_{\text{я.н}} = 23,5 - 2 = 21,5 \text{ A}.$$

6. Визначаємо пусковий струм у колі якоря електродвигуна при виведеному пусковому реостаті:

$$I_{\text{я.п}} = \frac{U_H}{R_{\text{я}}}; \quad I_{\text{я.п}} = \frac{110}{0,5} = 220 \text{ A}.$$

7. Визначаємо значення пускового опору, яке забезпечує пусковий струм у колі якоря, що дорівнює номінальному струму якоря:

$$I_{\text{я.н}} = \frac{U_H}{R_{\text{я}} + R_{\text{рп}}}; \quad R_{\text{я}} I_{\text{я.н}} + R_{\text{рп}} I_{\text{я.н}} = U_H;$$

$$R_{\text{рп}} = \frac{U_H - R_{\text{я}} I_{\text{я.н}}}{I_{\text{я.н}}}; \quad R_{\text{рп}} = \frac{U_H}{I_{\text{я.н}}} - R_{\text{я}};$$

$$R_{\text{рп}} = \frac{110}{21,5} - 0,5 = 5,2 - 0,5 = 4,7 \text{ Ом}.$$

8. Визначаємо сумарні втрати потужності в електродвигуні:

$$\Delta P_{\Sigma} = P_{\text{ел.н}} - P_{\text{мх.н}}; \quad \Delta P_{\Sigma} = 2588 - 2200 = 388 \text{ Вт}.$$

Запитання для самоконтролю

1. Складіть та поясніть принципові електричні схеми керування двигуном постійного струму з незалежним збудженням та з паралельним збудженням.
2. Поясніть, як запустити двигун постійного струму, використовуючи швидкісну характеристику двигуна та принципові електричні схеми керування.
3. Поясніть, як змінити напрям обертання валу двигуна постійного струму, використовуючи принципову електричну схему керування.
4. Поясніть, як регулюється швидкість валу двигуна постійного струму, використовуючи швидкісну характеристику двигуна та принципову електричну схему керування.

Завдання для самоконтролю

Якір електродвигуна обертається зі швидкістю **1500 об./хв.** До електродвигуна підведена напруга **220 В.** Електродвигун споживає струм силою **10 А.** Коефіцієнт корисної дії електродвигуна дорівнює **87 %.**

1. Визначити потужність на валу електродвигуна.
2. Визначити обертаючий момент електродвигуна.

Електродвигун постійного струму з паралельним збудженням, який має номінальну потужність **4,0 кВт**, номінальну частоту обертання **1000 об./хв.**, номінальну напругу **220 В**, номінальний коефіцієнт корисної дії **85 %**, підключений до мережі постійного струму напругою **220 В**. Опір обмотки якоря двигуна (включаючи опір щіток) дорівнює **1 Ом**, опір обмотки збудження дорівнює **110 Ом**.

3. Скласти принципову електричну схему керування електродвигуном.
4. Скласти розрахункову схему якорного кола і кола збудження.
5. Розрахувати потужність, яку споживає електродвигун з мережі при номінальному навантаженні.
6. Розрахувати номінальний струм електродвигуна.
7. Розрахувати струм в обмотці збудження.
8. Розрахувати номінальний струм кола якоря електродвигуна.
9. Розрахувати пусковий струм кола якоря електродвигуна без пускового реостата.
10. Розрахувати значення пускового опору, що забезпечує пусковий струм кола якоря, який дорівнює номінальному струму якоря.
11. Визначити сумарні втрати потужності в електродвигуні.

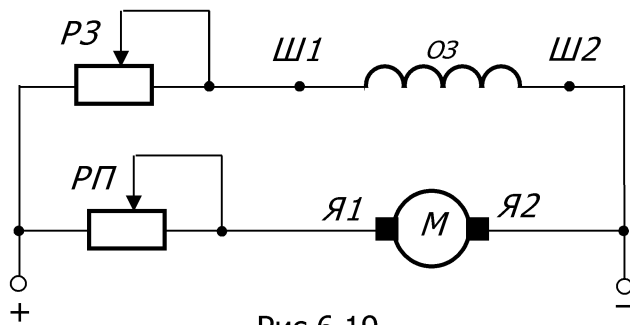


Рис.6.19

Принципова електрична схема керування двигуном постійного струму з паралельним збудженням наведена на рисунку 6.19.

12. Як зміниться напрям обертання якоря електродвигуна, якщо поміняти місцями кінці з'єднувальних проводів, які підключені до затискачів Ш1 і Ш2? Своє рішення обґрунтувати.
13. Як зміниться напрям обертання якоря електродвигуна, якщо поміняти місцями кінці з'єднувальних проводів, які підключені до затискачів Я1 і Я2? Своє рішення обґрунтувати.
14. Як зміниться напрям обертання якоря електродвигуна, якщо одночасно поміняти місцями кінці з'єднувальні проводів, які підключені до затискачів Ш1 і Ш2 та Я1 і Я2? Своє рішення обґрунтувати.
15. Як зміниться швидкість обертання якоря електродвигуна, якщо при його роботі частково ввести реостат PП?
16. Що необхідно зробити з реостатом PЗ, щоб відновити попереднє значення швидкості?
17. У якому положенні повинні знаходитися реостати PП і PЗ при пуску електродвигуна і чому?

Тема 7 ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ ЗМІННОГО СТРУМУ

7.1 Трифазний асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором

Будова та принцип дії

Будову і принцип дії асинхронного електродвигуна спочатку розглянемо на його фізичній моделі (рис.7.1), у якій між полюсами постійного магніту 1 на всі 2 розташована короткозамкнена рамка 3.

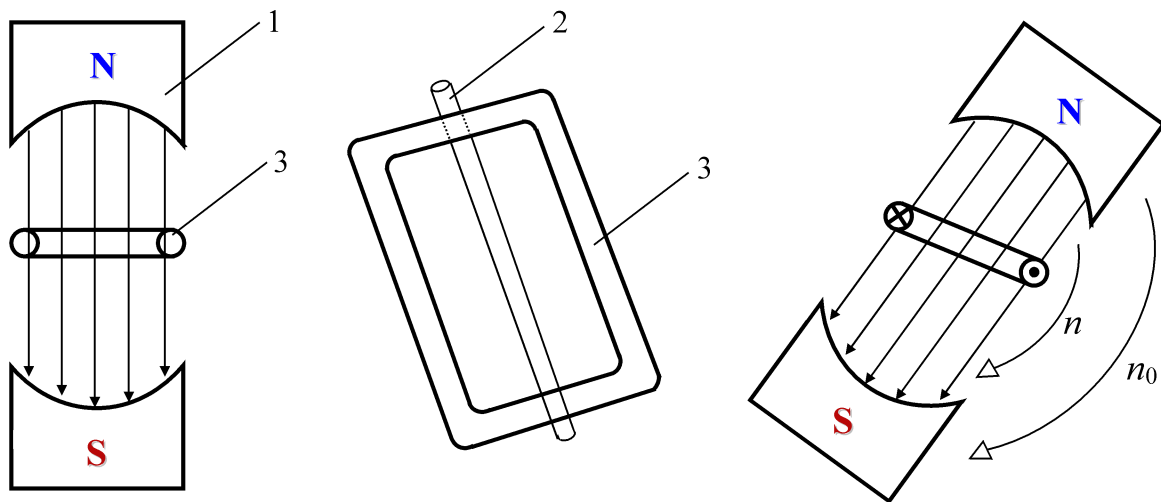


Рисунок 7.1 – Будова та принцип дії фізичної моделі асинхронного електродвигуна

Якщо обертати магніт навколо осі рамки зі швидкістю n_0 , то магнітний потік, який пронизує рамку, буде змінюватися в часі за синусоїдним законом. В результаті буде спостерігатися явище електромагнітної індукції й у рамці наведеться електрорушійна сила, під дією якої у рамці почне протікати електричний струм. Через те, що рамка знаходиться в магнітному полі, буде спостерігатися явище електромагнітної сили. Це призведе до виникнення обертаючого моменту, який буде діяти на рамку. В результаті рамка почне обертатися зі швидкістю n в напрямку обертання магнітного поля. Швидкість обертання рамки завжди менша за швидкість обертання магнітного поля ($n < n_0$), тому що інакше зміни магнітного потоку відносно рамки не буде, е.р.с. наводитися не буде, струму в рамці не буде й обертаючий момент зникне.

Із прискоренням обертання рамки швидкість обертання магнітного поля щодо неї буде зменшуватися і може наступити такий момент, коли швидкість обертання рамки наблизиться до швидкості обертання магнітного поля. В цьому випадку значно зменшаться е.р.с., яка наводиться в рамці, сила струму в рамці та обертаючий момент. Якщо цей момент буде меншим за момент опору обертання рамки, то рамка почне пригальмовуватися. В результаті збільшаться е.р.с., сила струму та обертаючий момент до такої величини, коли він стане дорівнювати моменту опору обертання рамки. Таким чином, обертаючий момент рамки завжди буде дорівнювати моменту опору обертання рамки. При збільшенні моменту опору обертання рамки швидкість рамки буде зменшуватися і навпаки, тобто рамка і магнітне поле обертаються з різними швидкостями (*асинхронно*).

Трифазний асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором має дві основні частини – статор і ротор, які відділені одна від одної мінімальним повітряним зазором. Конструктивна схема цього електродвигуна представлена на рис.7.2.

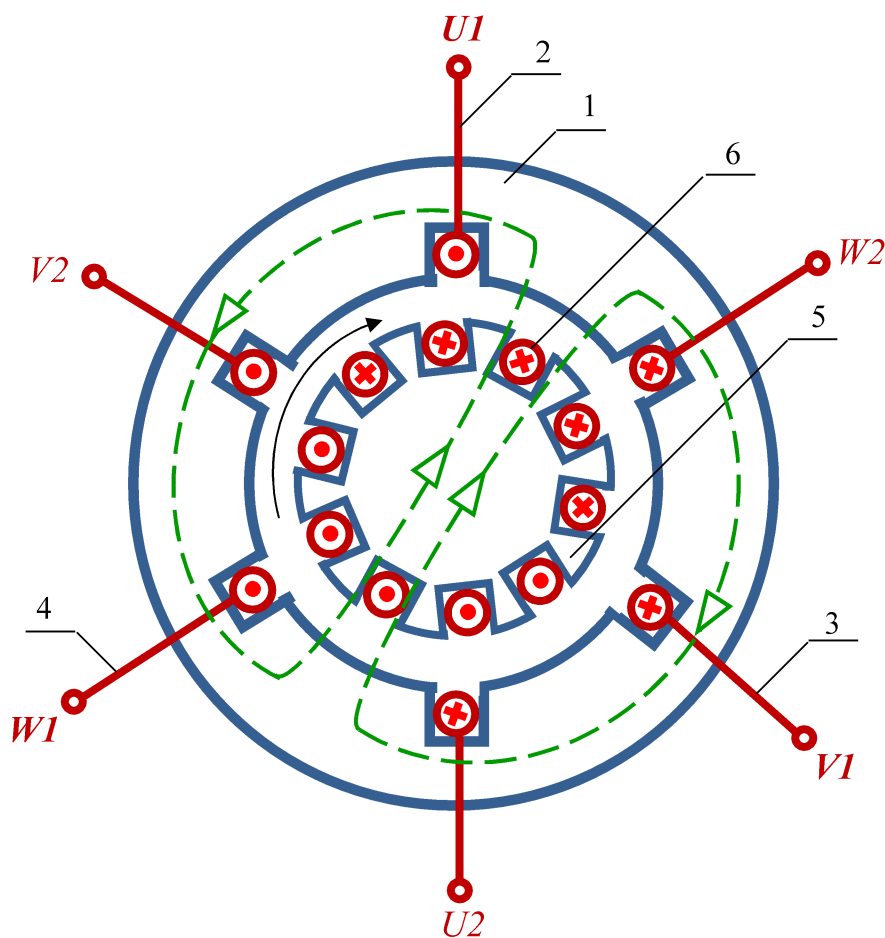


Рисунок 7.2 – Конструктивна схема трифазного асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором

Статор (нерухома частина) електродвигуна складається з магнітопроводу 1, який являє собою порожній коаксіальний циліндр, набраний з листів електротехнічної сталі. В його пази укладені три обмотки 2, 3, 4, виконані з проводу одного перерізу й однакового матеріалу (як правило, міді) та зміщені у просторі на кут 120° (тобто є симетричними). Вони називаються **фазними обмотками** або **фазами електродвигуна**, їх початки (U1, V1, W1) та кінці (U2, V2, W2) виводять на клемну коробку. Призначення статора – створення магнітного поля в асинхронному електродвигуні.

Ротор (обертова частина) складається з магнітопроводу 5, який являє собою циліндр, набраний з листів електротехнічної сталі, у пази якого залита обмотка 6. Провідники (стрижні) обмотки ротора мають однаковий переріз, виконані з однакового матеріалу (як правило, алюмінію) та замкнені накоротко з торців за допомогою кілець. Магнітопровід ротора кріпиться на валу з вентилятором (для охолодження) та підшипниками, які запресовують у підшипникові щити, що кріпляться до корпусу електродвигуна. Призначення ротора – надавання руху робочій машині.

Будова статора показана на рис.7.3. На ньому позначено: 1 – магнітопровід статора, 2 – обмотки статора, 3 – станина (корпус), 4 – клемна коробка (виводи затискачів обмоток статора).

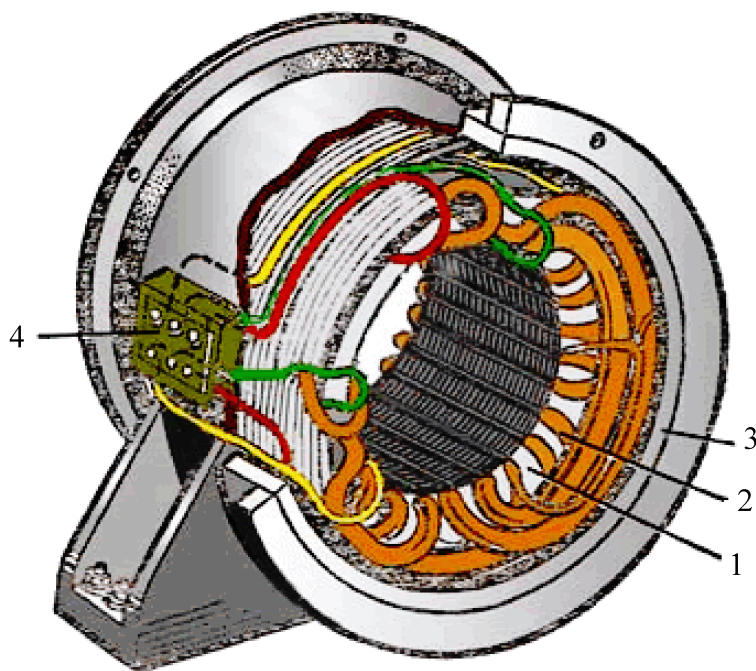


Рисунок 7.3 – Будова статора трифазного асинхронного електродвигуна

Будова короткозамкненого ротора показана на рис.7.4. На ньому позначено: 1 – магнітопровід ротора, 2 – стрижні обмотки ротора, 3 – короткозамикаючі кільця, 4 – вал, 5 – вентиляційні лопатки, 6 – балансир.

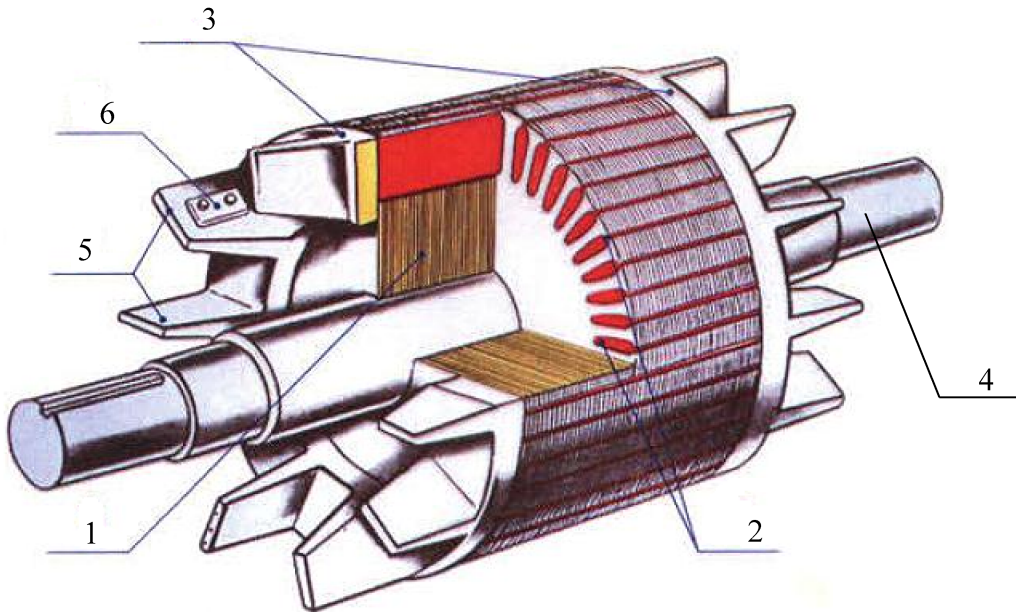


Рисунок 7.4 – Будова короткозамкненого ротора асинхронного електродвигуна

В асинхронному електродвигуні з короткозамкненим ротором три обмотки статора створюють магнітне поле, у якого полюси рівномірно переміщуються по колу статора із плином часу. Таке магнітне поле називають *обертовим*. Для його одержання необхідно, щоб ці обмотки на колі статора були розташовані під кутом 120° по відношенню одна до одної та одержували живлення від симетричного трифазного джерела. Тобто обертове магнітне поле створюють симетричні струми в обмотках статора (рис.7.5).

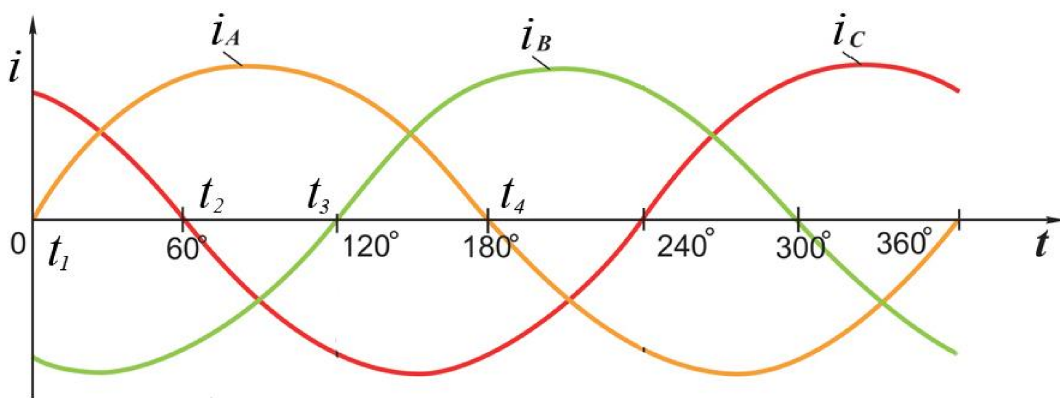


Рисунок 7.5 – Струми, що протікають в обмотках статора трифазного асинхронного електродвигуна

В двигуні дана умова виконується, в результаті чого при підключенні його до джерела виникає обертове магнітне поле. На рис.7.6 показано утворення магнітного поля в трифазному асинхронному електродвигуні

для різних моментів часу, позначених на рис.7.5. Рис.7.6а відповідає моменту часу t_1 , рис.7.6б – моменту часу t_2 , рис.7.6в – моменту часу t_3 , рис.7.6г – моменту часу t_4 .

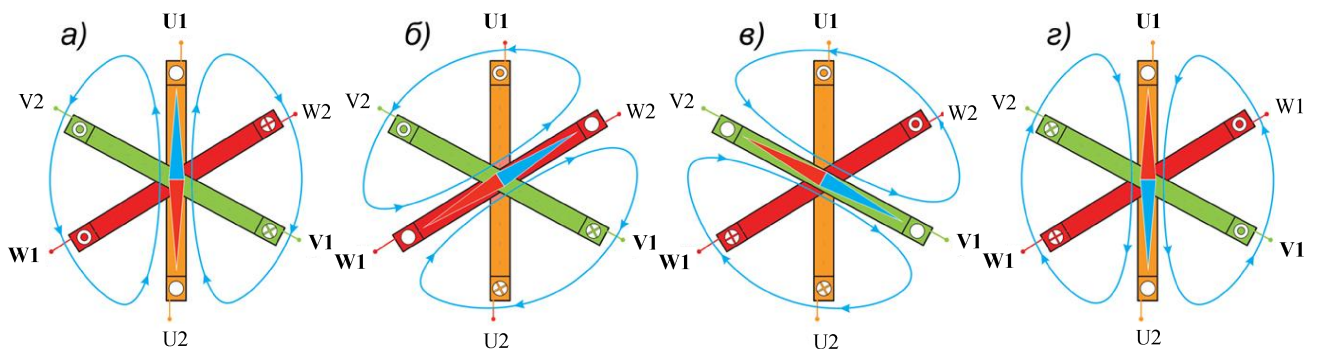


Рисунок 7.6 – Обертове магнітне поле

Швидкість обертання магнітного поля називається *синхронною* і залежить від частоти струму в обмотці статора та кількості пар магнітних полюсів статора за законом:

$$n_0 = \frac{60f}{p}, \quad (7.1)$$

де n_0 – швидкість обертання магнітного поля, об./хв.;
 f – частота струму в обмотці статора електродвигуна, Гц;
 p – кількість пар полюсів асинхронного електродвигуна (залежить від конструкції обмоток статора).

При частоті струму 50 Гц можливі наступні синхронні швидкості обертання: 3000 об./хв.; 1500 об./хв.; 1000 об./хв.; 750 об./хв.; 600 об./хв.; 500 об./хв.; 375 об./хв.

Приклад 7.1

Два асинхронних електродвигуни одержують живлення від мережі з частотою 50 Гц і напругою 220 В. Синхронні швидкості обертання електродвигунів складають відповідно 3000 об./хв. і 1500 об./хв.

Визначити кількість пар полюсів кожного електродвигуна.

Розв'язок.

1. Визначаємо кількість пар полюсів першого електродвигуна з (7.1):

$$p = \frac{60f}{n_0} = \frac{60 \cdot 50}{3000} = \frac{3000}{3000} = 1.$$

2. Визначаємо кількість пар полюсів другого електродвигуна з (7.1):

$$p = \frac{60f}{n_0} = \frac{60 \cdot 50}{1500} = \frac{3000}{1500} = 2.$$

Обертове магнітне поле наводить в обмотках ротора е.р.с., під дією яких у них протікають струми. На провідники обмотки ротора зі струмом, які знаходяться в магнітному полі, діє сила, в результаті чого виникає обертаючий момент і ротор починає обертатись в напрямку обертання магнітного поля. Всі процеси надалі протікають аналогічно прикладу на рис.7.1.

Ротор електродвигуна завжди обертається повільніше магнітного поля, тобто магнітне поле ніби «ковзає» відносно ротора (у тому випадку, якщо магнітне поле і ротор обертаються одночасно, то зміни магнітного поля відносно обмотки ротора не відбувається й у цій обмотці не наводиться е.р.с. і не протікає електричний струм). Різницю між швидкостями магнітного поля і ротора називають **абсолютним ковзанням**:

$$\Delta n = n_0 - n, \quad (7.2)$$

де Δn – абсолютне ковзання, *об./хв.*;
 n – швидкість обертання ротора, *об./хв.*

Якщо розділити абсолютне ковзання магнітного поля асинхронного електродвигуна на швидкість обертання магнітного поля, то одержимо **відносне ковзання**:

$$s = \frac{\Delta n}{n_0}; \quad s = \frac{n_0 - n}{n_0}, \quad (7.3)$$

де s – відносне ковзання.
 Відносне ковзання можна виразити через кутові швидкості:

$$s = \frac{\Delta \omega}{\omega_0} = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}, \quad (7.4)$$

де $\Delta \omega$ – абсолютне ковзання, *рад/с*;
 ω_0 – кутова швидкість обертання магнітного поля, *рад/с*;
 ω – кутова швидкість обертання ротора, *рад/с*.

Приклад 7.2

Асинхронний електродвигун із двома парами полюсів працює в номінальному режимі зі швидкістю обертання **1450 об./хв.**, одержуючи живлення від мережі з частотою **50 Гц**.

Визначити абсолютне та відносне ковзання електродвигуна.

Розв'язок.

1. Визначаємо синхронну швидкість обертання електродвигуна за (7.1):

$$n_0 = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1500 \frac{\text{об.}}{\text{хв.}}$$

2. Визначаємо абсолютне ковзання електродвигуна за (7.2):

$$\Delta n = 1500 - 1450 = 50 \text{ об./хв.}$$

3. Визначаємо відносне ковзання електродвигуна за (7.3):

$$s = \frac{50}{1500} = 0,033.$$

Запитання для самоконтролю

1. Для чого призначений трифазний асинхронний електродвигун?
2. На якому явищі ґрунтується принцип дії трифазного асинхронного електродвигуна? У чому його суть?
3. Опишіть будову та принцип дії фізичної моделі трифазного асинхронного електродвигуна.
4. Опишіть будову трифазного асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором.
5. Опишіть принцип дії трифазного асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором.
6. Чому асинхронний електродвигун отримав таку назву?
7. Що розуміється під обертовим магнітним полем?
8. За яких умов утворюється обертове магнітне поле?
9. Що розуміється під синхронною швидкістю обертання асинхронного електродвигуна?
10. Як визначити синхронну швидкість обертання асинхронного електродвигуна?
11. Які значення може мати синхронна швидкість обертання асинхронного електродвигуна при частоті 50 Гц?
12. Що розуміється під абсолютним ковзанням трифазного асинхронного електродвигуна?
13. Як визначити відносне ковзання трифазного асинхронного електродвигуна?

Завдання для самоконтролю

1. Два асинхронних електродвигуни одержують живлення від мережі з частотою **50 Гц** і напругою **380 В**. Синхронні швидкості обертання електродвигунів складають відповідно **1000 об./хв.** і **750 об./хв.** Визначити кількість пар полюсів кожного електродвигуна.
2. Асинхронний електродвигун із двома парами полюсів працює в номінальному режимі зі швидкістю обертання **950 об./хв.**, одержуючи живлення від мережі з частотою **50 Гц**. Визначити абсолютне та відносне ковзання електродвигуна.

Фізичні явища і процеси в елементах конструкції

При роботі асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором в елементах його конструкції спостерігаються наступні фізичні явища і процеси.

В обмотці статора:

- явище електричного струму;
- явище електромагнетизму;
- явище електромагнітної індукції;
- явище теплової дії струму;
- процес нагрівання обмотки.

В обмотці ротора:

- явище електромагнітної індукції;
- явище електричного струму;
- явище електромагнітної сили;
- явище електромагнетизму;
- явище теплової дії струму;
- процес нагрівання обмотки.

В магнітопроводі:

- явище електромагнітної індукції;
- явище вихрових струмів;
- явище електромагнітної сили від дії вихрових струмів;
- явище теплової дії вихрових струмів;
- явище гістerezису;
- явище теплової дії гістerezису;
- процес нагрівання магнітопроводу.

В механічній системі:

- явище тертя в підшипниках;
- явище тертя ротора об повітря.
- процес нагрівання підшипників і ротора.

Крім цього відбувається обмін тепловою енергією між елементами конструкції електродвигуна і навколишнім середовищем.

Запитання для самоконтролю

1. Перелічіть фізичні явища, які спостерігаються в обмотці статора трифазного асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором.
2. Перелічіть фізичні явища, які спостерігаються в обмотці ротора трифазного асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором.
3. Перелічіть фізичні явища, які спостерігаються в магнітопроводі трифазного асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором.
4. Перелічіть фізичні явища, які спостерігаються в механічній системі трифазного асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором.

Енергетична діаграма

При роботі асинхронний електродвигун споживає з мережі електричну енергію, а віддає робочій машині механічну енергію. При протіканні цього процесу (перетворення електричної енергії в механічну) відбуваються втрати енергії у вигляді тепла в елементах конструкції електродвигуна (як показано вище): втрати в обмотках, втрати в магнітопроводі, втрати в механічній системі, додаткові втрати. Розглянемо даний процес перетворення енергії на енергетичній діаграмі асинхронного електродвигуна (рис.7.7).

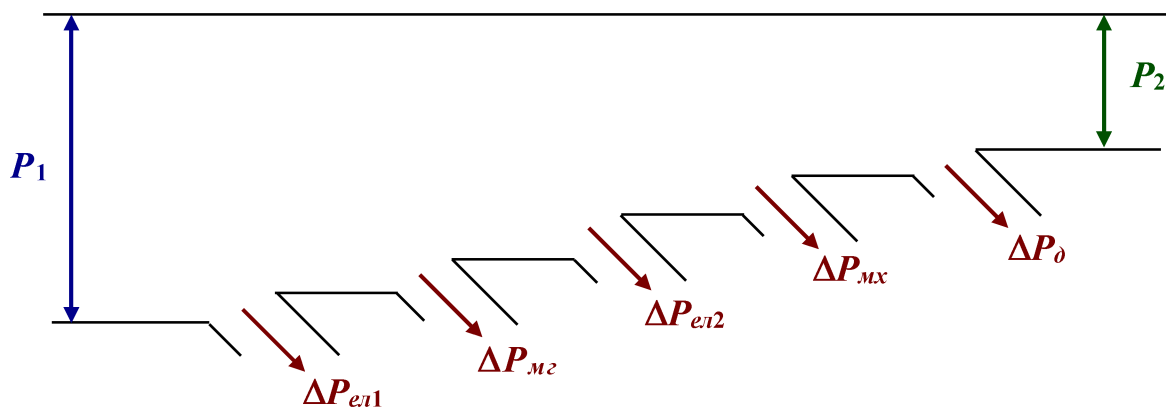


Рисунок 7.7 – Енергетична діаграма асинхронного електродвигуна

На енергетичній діаграмі (рис.7.7) позначено:

P_1 – електрична потужність, яку споживає електродвигун, Вт;

$\Delta P_{ел1}$ – електричні втрати в обмотці статора
(в результаті теплової дії струму, який в ній протікає), Вт;

$\Delta P_{ме}$ – втрати в магнітопроводі електродвигуна
(в результаті теплової дії вихрових струмів та гістерезису), Вт;

для зниження цих втрат магнітопровід виконують з листів електротехнічної сталі з вмістом кремнію 4 – 5 %, товщина листів становить 0,35 – 0,5 мм при частоті струму 50 Гц, листи ізолюють один від одного;

$\Delta P_{ел2}$ – електричні втрати в обмотці ротора
(в результаті теплової дії струму, який в ній протікає), Вт;

$\Delta P_{мх}$ – механічні втрати
(в результаті тертя в підшипниках і ротора об повітря), Вт;

$\Delta P_{д}$ – додаткові втрати
(в результаті інших не врахованих явищ), Вт;

P_2 – механічна потужність, яка віддається електродвигуном робочій машині (потужність на валу), Вт.

Сума втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні дорівнює:

$$\Delta P_{\Sigma} = P_1 - P_2, \quad \text{або} \quad \Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{ел1} + \Delta P_{ме} + \Delta P_{ел2} + \Delta P_{мх} + \Delta P_{д}. \quad (7.5)$$

Усі втрати потужності, що виникають в елементах конструкції асинхронного електродвигуна, розділяють на постійні (ΔP_{const}) та змінні (ΔP_{var}) втрати. До постійних втрат відносять такі, що прямо пропорційні квадрату напруги на затискачах електродвигуна:

$$\Delta P_{const} = \Delta P_{mg} + \Delta P_{mx}, \quad (7.6)$$

а до змінних – такі, що прямо пропорційні квадрату сили струму в обмотках:

$$\Delta P_{var} = \Delta P_{el1} + \Delta P_{el2} + \Delta P_{\delta}. \quad (7.7)$$

Коефіцієнт корисної дії асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором дорівнює:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Delta P_{\Sigma}}{P_1} = 1 - \frac{\Delta P_{\Sigma}}{P_1}. \quad (7.8)$$

Коефіцієнт корисної дії електродвигуна змінюється в залежності від навантаження. Максимальне значення він має, коли постійні втрати дорівнюють змінним. Це відбувається, коли електродвигун завантажений на 60 – 70 %.

Коефіцієнт потужності асинхронного електродвигуна дорівнює:

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{S_1}, \quad (7.9)$$

де P_1 – активна потужність, яку споживає асинхронний електродвигун з мережі, *Вт*;

S_1 – повна потужність, яку споживає асинхронний електродвигун з мережі, *ВА*.

Потужності, що споживає асинхронний електродвигун з мережі, визначаються як і для будь-якого трифазного навантаження, тобто за (5.35) або (5.38). Потужність на валу електродвигуна визначається так само, як і у двигуна постійного струму, тобто за (6.21).

Якщо з (7.8) виразити активну потужність, яку споживає асинхронний електродвигун з мережі, і підставити її у (5.38), то отримаємо вираз для розрахунку сили струму, споживаного електродвигуном:

$$I = \frac{P_2}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos \varphi \cdot \eta}. \quad (7.10)$$

Приклад 7.3

Асинхронний електродвигун, номінальна потужність якого дорівнює **3 кВт**, має номінальний к.к.д., який дорівнює **91 %**, номінальний коефіцієнт потужності, який дорівнює **0,88**, номінальну лінійну напругу, яка дорівнює **380 В**.

Визначити потужності, які споживає електродвигун з мережі; сумарні втрати потужності в електродвигуні; силу струму в обмотках статора електродвигуна.

Розв'язок.

1. Визначаємо активну потужність, яку споживає електродвигун, із (7.8):

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta} = \frac{3000}{0,91} = 3296,7 \text{ Вт}.$$

2. Визначаємо повну потужність, яку споживає електродвигун, із (7.9):

$$S_1 = \frac{P_1}{\cos \varphi} = \frac{3296,7}{0,88} = 3746,3 \text{ ВА}.$$

3. Визначаємо реактивну потужність, якою електродвигун обмінюється з мережею, із (4.60):

$$Q_1 = \sqrt{S_1^2 - P_1^2} = \sqrt{3746,3^2 - 3296,7^2} = 1779,5 \text{ вар}.$$

4. Визначаємо сумарні втрати потужності в електродвигуні за (7.5):

$$\Delta P_\Sigma = 3296,7 - 3000 = 296,7 \text{ Вт}.$$

5. Визначаємо силу струму в обмотках статора електродвигуна за (7.10):

$$I = \frac{3000}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,88 \cdot 0,91} = 5,7 \text{ А}.$$

Запитання для самоконтролю

1. Складіть енергетичну діаграму трифазного асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором, розшифруйте літерні позначення.
2. Перелічте втрати потужності в елементах конструкції трифазного асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором, назвіть причини їх виникнення.
3. Що таке постійні втрати потужності в трифазному асинхронному електродвигуні?
4. Що таке змінні втрати потужності в трифазному асинхронному електродвигуні?
5. Запишіть і розшифруйте вирази втрат потужності в обмотках трифазного асинхронного електродвигуна.
6. Як визначити сумарні втрати потужності в трифазному асинхронному електродвигуні?
7. Як впливають втрати потужності в елементах конструкції трифазного асинхронного електродвигуна на його роботу?
8. Як визначити коефіцієнт корисної дії трифазного асинхронного електродвигуна? Коли він має максимальне значення?
9. Як визначити коефіцієнт потужності трифазного асинхронного електродвигуна?
10. Як розрахувати силу струму в обмотках статора асинхронного електродвигуна?

Завдання для самоконтролю

1. Асинхронний електродвигун, номінальна потужність якого дорівнює **5,5 кВт**, має номінальний к.к.д., який дорівнює **89 %**, номінальний коефіцієнт потужності, який дорівнює **0,87**, номінальну лінійну напругу, яка дорівнює **380 В**. Визначити потужності, які споживає електродвигун з мережі; сумарні втрати потужності в електродвигуні; силу струму в обмотках статора електродвигуна.

Технічні параметри

Трифазні асинхронні електродвигуни з короткозамкненим ротором, що випускаються для виробничих цілей, призначені для роботи в певних умовах з визначеними параметрами, які називають **номінальними**. Їх вказують на заводській табличці, укріпленій на корпусі електродвигуна. До таких параметрів відносяться:

- механічна потужність електродвигуна, *кВт*;
- частота живильної мережі, *Гц*;
- діюче значення лінійної напруги обмоток статора, *В*;
- схеми з'єднань обмоток статора;
- діюче значення лінійного струму обмоток статора, *А*;
- швидкість обертання валу електродвигуна, *об./хв.*;
- коефіцієнт потужності електродвигуна;
- коефіцієнт корисної дії електродвигуна, *%*.

Крім цього вказуються тип електродвигуна, його маса, клас ізоляції обмоток статора (ізоляція класу *B* характеризується тим, що може довготривале працювати за температури 130°C , ізоляція класу *F* – за температури 155°C).

На сьогодні випускаються асинхронні електродвигуни від $0,06\text{ кВт}$ до 400 кВт при частотах обертання $500 - 3000\text{ об./хв.}$ у вигляді єдиних серій *4А, 4АМ, АИ, 5А, 6А* та інших. Крім основного виконання у кожній серії є ряд електричних модифікацій, які мають особливості конструкції (наприклад, подвійну обмотку на роторі, глибокі пази в магнітопроводі ротора і так далі), а саме:

- з підвищеним пусковим моментом (для приводу робочих машин, які мають велике навантаження у момент пуску: компресорів, дробарок та інших);
- з підвищеним ковзанням (для приводу робочих машин з великим моментом інерції, з великою частотою пусків та реверсів);
- з підвищеними енергетичними показниками (для приводу робочих машин з цілодобовою роботою);
- багатошвидкісні;
- малошумні;
- такі, що вмонтовуються.

Запитання для самоконтролю

1. Перелічіть номінальні параметри трифазного асинхронного електродвигуна.

Механічна характеристика

Механічна характеристика електродвигуна з короткозамкненим ротором являє собою залежність кутової швидкості обертання ротора електродвигуна від моменту на його валу $\omega = f(M)$ (рис.7.8).

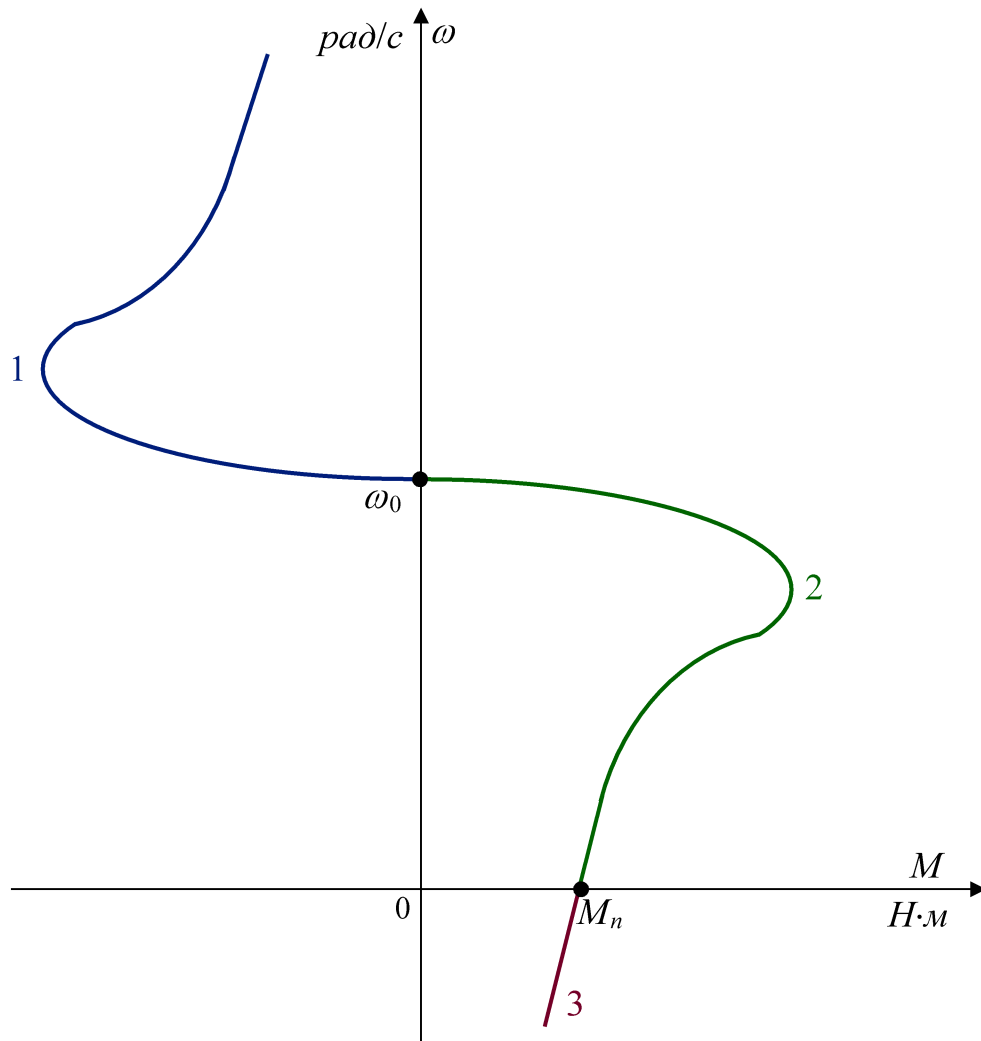


Рисунок 7.8 – Механічна характеристика трифазної асинхронної машини з короткозамкненим ротором

На рис.7.8 позначено:

1 – режим генератора (ротор обертається швидше за магнітне поле ($\omega > \omega_0$), момент має від'ємне значення, тобто електрична енергія віддається у мережу);

2 – режим двигуна (ротор обертається повільніше магнітного поля зі швидкістю від $\omega = \omega_0$ до $\omega = 0$, момент має додатне значення, тобто електрична енергія споживається з мережі);

3 – режим електромагнітного гальма (ротор обертається у протилежний бік по відношенню до напрямку обертання магнітного поля ($\omega < 0$), момент має додатне значення, тобто електрична енергія споживається з мережі; застосовується у піднімальних механізмах при опусканні вантажу або при гальмуванні противключенням).

Точка перетину механічної характеристики із віссю швидкостей є точкою *ідеального холостого ходу* електродвигуна (ротор обертається із синхронною швидкістю ($\omega = \omega_0$), момент дорівнює нулю).

Точка перетину механічної характеристики із віссю моментів є точкою *пуску* електродвигуна (ротор нерухомий ($\omega = 0$), момент дорівнює певному додатному значенню).

Механічна характеристика робочої машини являє собою залежність моменту опору робочої машини від кутової швидкості обертання валу $M_{on} = f(\omega)$:

$$M_{on} = M_0 + (M_{on.n} - M_0) \left(\frac{\omega_{on}}{\omega_{on.n}} \right)^x, \quad (7.11)$$

- де M_{on} – момент опору робочої машини, $H \cdot m$;
 M_0 – момент зрушення робочої машини,
(момент опору робочої машини, не завантаженої продуктом), $H \cdot m$;
 $M_{on.n}$ – номінальний момент опору робочої машини, $H \cdot m$;
 ω_{on} – кутова швидкість робочої машини, rad/c ;
 $\omega_{on.n}$ – номінальна кутова швидкість робочої машини, rad/c ;
 x – показник, що характеризує робочу машину.

Графічно механічні характеристики робочих машин показані на рис.7.9 – 7.12. На рис 7.9 показана *не залежна від швидкості* механічна характеристика робочої машини, у якої момент опору не змінюється при зміні швидкості ($x = 0$). До таких робочих машин відносяться транспортери, піднімальні крани, конвеєри та інші.

На рис 7.10 показана *лінійно-зростаюча* механічна характеристика робочої машини, у якої момент опору прямо пропорційний швидкості ($x = 1$). До таких робочих машин відносяться корнеклубнейки, преси, зерноочисні машини та інші.

На рис 7.11 показана *параболічна (нелінійно-зростаюча)* механічна характеристика робочої машини, у якої момент опору прямо пропорційний квадрату швидкості ($x = 2$). До таких робочих машин відносяться відцентрові насоси, вентилятори, сепаратори та інші.

На рис 7.12 показана *гіперболічна (нелінійно-спадаюча)* механічна характеристика робочої машини, у якої момент опору обернено пропорційний швидкості ($x = -1$). До таких робочих машин відносяться металообробні станки, зернові норії, шнекові транспортери та інші.

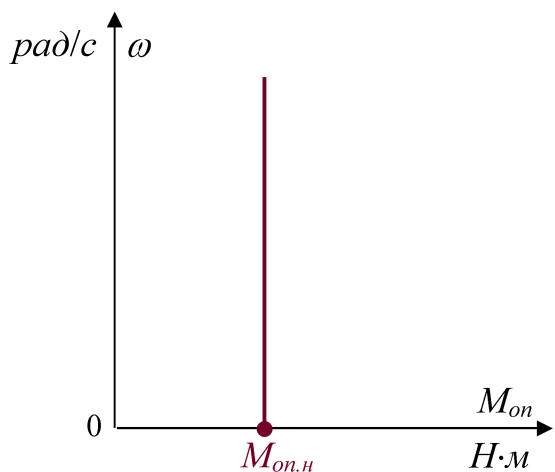


Рис.7.9

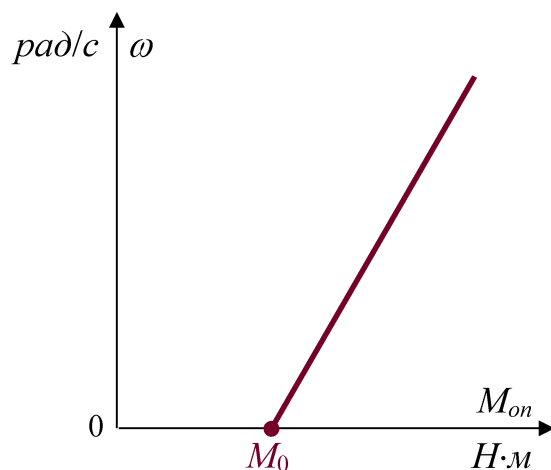


Рис.7.10

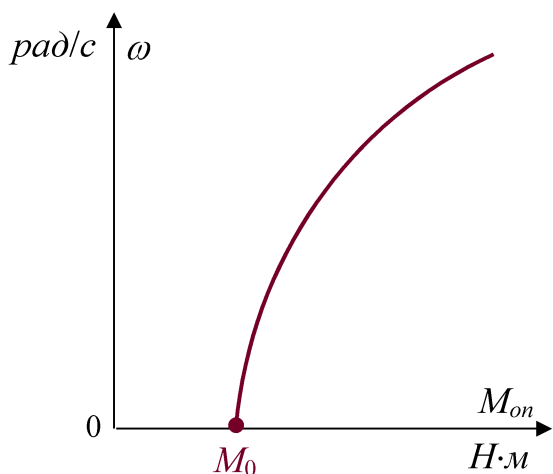


Рис.7.11

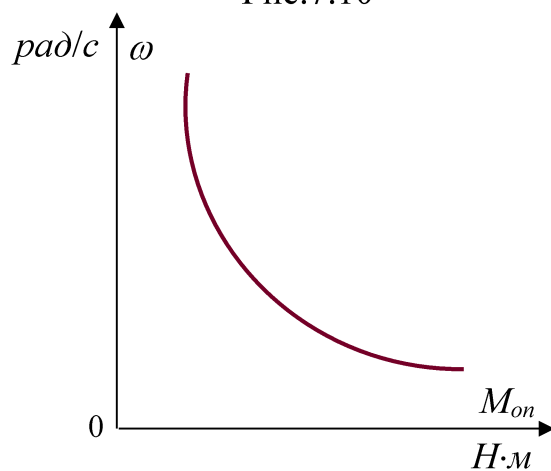


Рис.7.12

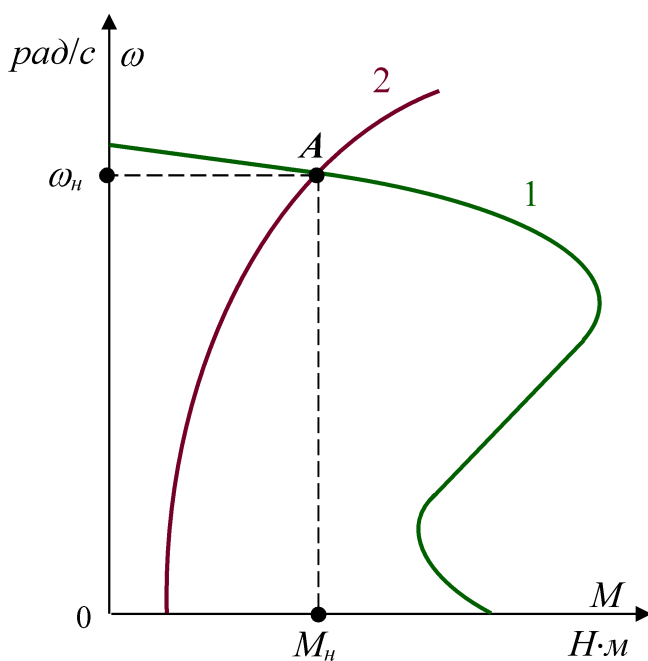


Рис.7.13

Якщо на одній площині нанести механічну характеристику асинхронного електродвигуна (ділянку режиму двигуна) і механічну характеристику робочої машини, то точка перетину цих характеристик буде **робочою точкою** (точкою, у якій буде працювати система «електродвигун – робоча машина»).

На рис.7.13 як приклад показані механічна характеристика асинхронного електродвигуна (1) і параболічна механічна характеристика робочої машини (2). Точка А – робоча точка.

Приклад 7.4

Асинхронний електродвигун приводить в обертання робочу машину з параболічною механічною характеристикою. Момент зрушення робочої машини дорівнює **10 Н·м**, номінальний момент опору робочої машини дорівнює **50 Н·м**,

Визначити момент опору робочої машини при зниженні її кутової швидкості на **10 %** відносно номінального значення.

Розв'язок.

1. Визначаємо момент опору робочої машини за (7.11):

$$\begin{aligned} M_{оп} &= M_0 + (M_{оп.н} - M_0) \left(\frac{\omega_{оп}}{\omega_{оп.н}} \right)^x = \\ &= 10 + (50 - 10) (0,9)^2 = 10 + 40 \cdot 0,81 = 10 + 32,4 = 42,4 \text{ Н} \cdot \text{м}. \end{aligned}$$

Момент, який розвивається на валу електродвигуна, залежить від магнітного потоку, сили струму в обмотці ротора та коефіцієнта потужності обмотки ротора:

$$M = k\Phi \cdot I_2 \cdot \cos\psi_2, \quad (7.12)$$

де M – обертаючий момент, $\text{Н} \cdot \text{м}$;
 Φ – діюче значення магнітного потоку, Вб ;
 I_2 – діюче значення сили струму в обмотці ротора, А ;
 ψ_2 – кут зсуву фаз е.р.с. і струму ротора, рад .

В результаті того, що магнітний потік пропорційний прикладеній до обмоток статора напрузі ($\Phi \sim U$), то можна довести, що момент, який розвивається двигуном, пропорційний квадрату прикладеної напруги, тобто $M \sim U^2$. Тому при зниженій напрузі на затискачах обмоток статора електродвигуна момент на валу буде дорівнювати:

$$M' = M \cdot \left(\frac{U'}{U_n} \right)^2, \quad (7.13)$$

де M' – момент на валу електродвигуна при зниженій напрузі, $\text{Н} \cdot \text{м}$;
 M – момент на валу електродвигуна при номінальній напрузі, $\text{Н} \cdot \text{м}$;
 U' – знижена напруга на затискачах обмоток статора, В ;
 U_n – номінальна напруга на затискачах обмоток статора, В .

Рівняння (7.13) можна записати так:

$$M' = M \cdot k_U^2, \quad (7.14)$$

де k_U – кратність поточного значення напруги на затискачах обмоток статора по відношенню до номінального;

$$k_U = \frac{U'}{U_n}. \quad (7.15)$$

На підставі (7.4) запишемо *рівняння кутової швидкості ротора* електродвигуна при номінальній напрузі:

$$\omega = \omega_0 \cdot (1 - s). \quad (7.16)$$

Можна довести, що відносно ковзання електродвигуна обернено пропорційне квадрату прикладеної напруги, тоді рівняння кутової швидкості ротора електродвигуна при зниженій напрузі на робочій ділянці механічної характеристики буде таким:

$$\omega' = \omega_0 \cdot \left(1 - \frac{s}{k_U^2}\right). \quad (7.17)$$

Внаслідок цього механічні характеристики асинхронного електродвигуна і робочої машини (рис.7.13) при номінальній і зниженій напрузі будуть виглядати так, як показано на рис.7.14.

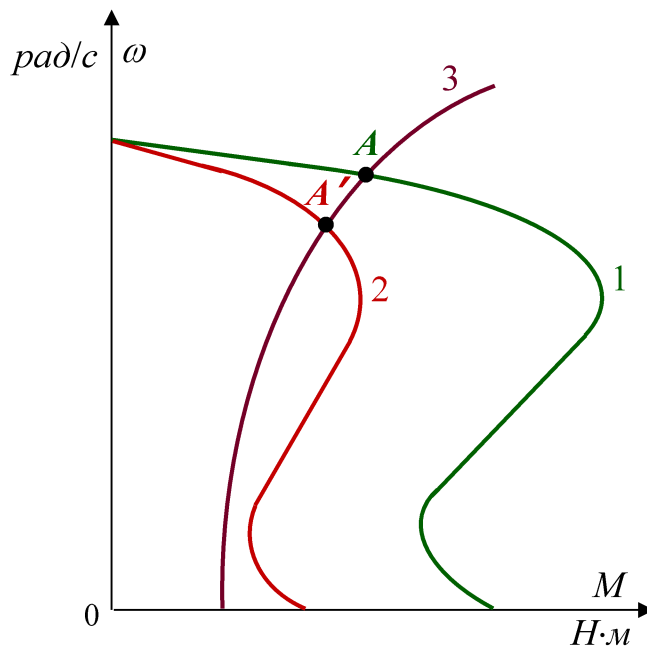


Рисунок 7.14 – Механічні характеристики асинхронного електродвигуна при номінальній (1) і зниженій (2) напругах та механічна характеристика робочої машини (3)

Точка А є робочою точкою системи «електродвигун – робоча машина» при номінальній напрузі на затискачах обмоток статора асинхронного електродвигуна; точка А' є робочою точкою цієї системи при зниженій напрузі на затискачах обмоток статора асинхронного електродвигуна.

Приклад 7.5

Трифазний асинхронний електродвигун приводить в обертання роботу машину при номінальній напрузі на його затискачах. При цьому електродвигун розвиває момент на валу, який дорівнює **8 Н·м**, і обертається з кутовою швидкістю, яка дорівнює **290 рад/с**. Синхронна кутова швидкість електродвигуна дорівнює **314 рад/с**.

Визначити момент на валу трифазного асинхронного електродвигуна і його кутову швидкість при зниженні напруги на затискачах обмоток статора на **10 %** відносно номінального значення.

Розв'язок.

1. Визначаємо кратність напруги на затискачах електродвигуна за (7.16):

$$k_U = \frac{U'}{U_H} = \frac{U_H - 0,1 \cdot U_H}{U_H} = \frac{0,9 \cdot U_H}{U_H} = 0,9.$$

2. Визначаємо момент на валу електродвигуна за (7.14):

$$M' = M \cdot k_U^2 = 8 \cdot 0,9^2 = 8 \cdot 0,81 = 6,48 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

3. Визначаємо відносне ковзання електродвигуна за (7.4):

$$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} = \frac{314 - 290}{314} = 0,076.$$

4. Визначаємо кутову швидкість електродвигуна за (7.17):

$$\omega = \omega_0 \cdot \left(1 - \frac{s}{k_U^2}\right) = 314 \cdot \left(1 - \frac{0,0764}{0,09^2}\right) = 284,4 \frac{\text{рад.}}{\text{с}}.$$

Запитання для самоконтролю

1. Що розуміється під механічною характеристикою трифазного асинхронного електродвигуна?
2. Зобразіть якісно механічну характеристику трифазного асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором і покажіть на ній ділянки, які відповідають режимам генератора, двигуна, і електромагнітного гальма. Поясніть суть цих режимів роботи.
3. Запишіть і розшифруйте рівняння механічної характеристики робочої машини.
4. Зобразіть якісно механічні характеристики робочих машин.
5. Зобразіть якісно на одній площині механічну характеристику трифазного асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором і механічну характеристику робочої машини. Покажіть робочу точку.
6. Що таке робоча точка механічної характеристики?
7. Як залежить момент на валу трифазного асинхронного електродвигуна від напруги, прикладеної до затискачів обмоток статора?
8. Запишіть та розшифруйте рівняння кутової швидкості ротора трифазного асинхронного електродвигуна.
9. Як залежить кутова швидкість ротора трифазного асинхронного електродвигуна від напруги, прикладеної до затискачів обмоток статора?
10. Зобразіть якісно на одній площині механічну характеристику трифазного асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором при номінальній і зниженій напругах і механічну характеристику робочої машини. Покажіть робочі точки.

Завдання для самоконтролю

1. Трифазний асинхронний електродвигун приводить в обертання робочу машину при номінальній напрузі на його затискачах. При цьому електродвигун розвиває момент на валу, який дорівнює **12 Н·м**, і обертається з кутовою швидкістю, яка дорівнює **145 рад/с**. Синхронна кутова швидкість електродвигуна дорівнює **157 рад/с**. Визначити момент на валу трифазного асинхронного електродвигуна і його кутову швидкість при зниженні напруги на затискачах обмоток статора на **15 %** відносно номінального значення.

Розрахунок механічної характеристики

Розглянемо основні точки механічної характеристики трифазного асинхронного електродвигуна (рис.7.15).

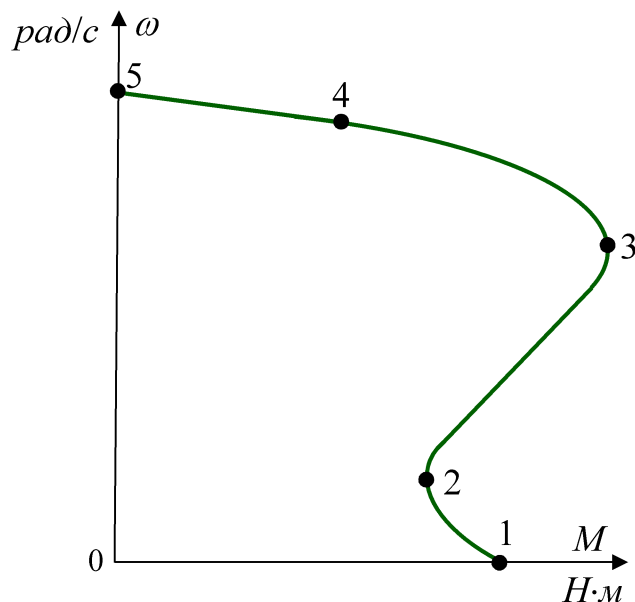


Рисунок 7.15 – Механічна характеристики асинхронного електродвигуна з позначенням основних точок

На рис.7.15 позначено:

1 – *точка пуску* електродвигуна (електродвигун починає працювати з цієї точки), характеризується тим, що ротор нерухомий, а момент, який електродвигун розвиває на валу, називається пусковим:

$$\omega = 0 ; \quad M = M_n ;$$

2 – *точка зниження моменту при пуску* електродвигуна (що обумовлено дією струмів підвищеної частоти, які протікають в електричній мережі), характеризується тим, що швидкість електродвигуна називається мінімальною, а момент, який електродвигун розвиває на валу, називається мінімальним моментом при пуску:

$$\omega = \omega_{min}; \quad M = M_{min};$$

3 – *точка критичної роботи* електродвигуна (момент, який на валу розвиває електродвигун, є найбільшим), характеризується тим, що швидкість електродвигуна називається критичною, а момент, який електродвигун розвиває на валу, називається критичним:

$$\omega = \omega_{кр}; \quad M = M_{кр};$$

4 – *точка номінальної роботи* електродвигуна (електродвигун розрахований заводом-виготівником для роботи в цій точці), характеризується тим, що швидкість електродвигуна називається номінальною, а момент, який електродвигун розвиває на валу, називається номінальним:

$$\omega = \omega_n; \quad M = M_n;$$

5 – *точка ідеального холостого ходу* електродвигуна (така робота електродвигуна можлива тільки за умови обертання його валу додатковим агрегатом із синхронною швидкістю), характеризується тим, що швидкість електродвигуна дорівнює синхронній, а момент, який електродвигун розвиває на валу, дорівнює нулю:

$$\omega = \omega_0; \quad M = 0.$$

Координати цих точок механічної характеристики (кутові швидкості та моменти на валу) можна розрахувати за паспортними та каталожними даними електродвигуна, для чого необхідні:

- номінальна потужність (P_n);
- кількість пар полюсів (p);
- частота струму в живильній мережі (f);
- номінальна швидкість обертання (n_n);
- критичне ковзання ($s_{кр}$);
- мінімальне ковзання (s_{min});
- кратність критичного моменту ($m_{кр}$);
- кратність мінімального моменту (m_{min});
- кратність пускового моменту (m_n).

Кратності критичного, мінімального і пускового моментів – це відношення зазначених моментів до номінального моменту.

Алгоритм розрахунку наступний:

1. Визначається синхронна швидкість обертання за (7.1).
2. Визначається синхронна кутова швидкість:

$$\omega_0 = \frac{2\pi \cdot n_0}{60}. \quad (7.18)$$

3. Визначається номінальне відносне ковзання за (7.3).

4. Визначається номінальна кутова швидкість:

$$\omega_n = \omega_0(1 - s_n). \quad (7.19)$$

5. Визначається номінальний момент:

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n}. \quad (7.20)$$

6. Визначається критична кутова швидкість:

$$\omega_{кр} = \omega_0(1 - s_{кр}). \quad (7.21)$$

7. Визначається критичний момент:

$$M_{кр} = m_{кр} \cdot M_n. \quad (7.22)$$

8. Визначається мінімальна кутова швидкість при пуску:

$$\omega_{min} = \omega_0(1 - s_{min}). \quad (7.23)$$

9. Визначається мінімальний момент при пуску:

$$M_{min} = m_{min} \cdot M_n. \quad (7.24)$$

10. Визначається пусковий момент:

$$M_n = m_n \cdot M_n. \quad (7.25)$$

Приклад 7.6

Асинхронний електродвигун з номінальною потужністю **3 кВт** і двома парами полюсів одержує живлення від мережі з частотою **50 Гц** і приводить в обертання робочу машину з номінальною швидкістю **1450 об./хв.** Електродвигун має критичне ковзання **0,33**, мінімальне ковзання **0,85**, кратність критичного моменту **2,3**, кратність мінімального моменту **1,1**, кратність пускового моменту **2,1**.

Розрахувати координати п'яти основних точок механічної характеристики електродвигуна.

Розв'язок.

1. Визначаємо синхронну швидкість обертання за (7.1):

$$n_0 = \frac{60 \cdot 50}{2} = \frac{3000}{2} = 1500 \frac{\text{об.}}{\text{хв.}}$$

2. Визначаємо синхронну кутову швидкість обертання за (7.17):

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1500}{60} = 157 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

3. Визначаємо номінальне відносне ковзання за (7.3):

$$s_H = \frac{1500 - 1450}{1500} = \frac{50}{1500} = 0,033.$$

4. Визначаємо номінальну кутову швидкість за (7.19):

$$\omega_H = 157 \cdot (1 - 0,033) = 151,8 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

5. Визначаємо номінальний момент за (7.20):

$$M_H = \frac{3000}{151,8} = 19,8 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

6. Визначаємо критичну кутову швидкість за (7.21):

$$\omega_{кр} = 157 \cdot (1 - 0,33) = 105,2 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

7. Визначаємо критичний момент за (7.22):

$$M_{кр} = 2,3 \cdot 19,8 = 45,5 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

8. Визначаємо мінімальну кутову швидкість за (7.23):

$$\omega_{min} = 157 \cdot (1 - 0,85) = 23,6 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

9. Визначаємо мінімальний момент за (7.24):

$$M_{min} = 1,1 \cdot 19,8 = 21,8 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

10. Визначаємо пусковий момент за (7.25):

$$M_n = 2,1 \cdot 19,8 = 41,6 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

При зниженні напруги на затискачах обмоток статора асинхронного електродвигуна координати основних точок механічної характеристики повинні бути перераховані з урахуванням (7.17) та (7.14) так, як показано у прикладі нижче.

Приклад 7.7

Розрахувати координати основних точок механічної характеристики електродвигуна для прикладу 7.6 при зниженні напруги на його затискачах на **10 %**.

Розв'язок.

1. Визначаємо номінальну кутову швидкість за (7.19) і (7.17):

$$\omega_H = \omega_0 \cdot \left(1 - \frac{s_H}{k_U^2}\right); \quad \omega_H = 157 \cdot \left(1 - \frac{0,033}{0,9^2}\right) = 150,6 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

2. Визначаємо номінальний момент за (7.14):

$$M'_H = M_H \cdot k_U^2; \quad M'_H = 19,8 \cdot 0,9^2 = 19,8 \cdot 0,81 = 16,03 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

3. Визначаємо критичну кутову швидкість за (7.21) і (7.17):

$$\omega_{кр} = \omega_0 \cdot \left(1 - \frac{s_{кр}}{k_U^2}\right); \quad \omega_{кр} = 157 \cdot \left(1 - \frac{0,33}{0,9^2}\right) = 93,04 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

4. Визначаємо критичний момент за (7.14):

$$M'_{кр} = M_{кр} \cdot k_U^2; \quad M'_{кр} = 45,5 \cdot 0,9^2 = 45,5 \cdot 0,81 = 36,86 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

5. Через те, що *робочою ділянкою механічної характеристики* асинхронного електродвигуна вважається та, що включає в себе точки критичної та номінальної роботи, а також ідеального холостого ходу, то мінімальна кутова швидкість при зниженні напруги не розраховується, а приймається такою, якою була до зниження напруги.

6. Визначаємо мінімальний момент за (7.14):

$$M'_{min} = M_{min} \cdot k_U^2; \quad M'_{min} = 21,8 \cdot 0,9^2 = 21,8 \cdot 0,81 = 17,67 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

7. Визначаємо пусковий момент за (7.14):

$$M'_n = M_n \cdot k_U^2; \quad M'_n = 41,6 \cdot 0,9^2 = 41,6 \cdot 0,81 = 33,7 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Запитання для самоконтролю

1. Зобразіть якісно механічну характеристику трифазного асинхронного електродвигуна, покажіть на ній п'ять основних точок.
2. Охарактеризуйте координати п'яти основних точок механічної характеристики трифазного асинхронного електродвигуна.
3. Перелічіть паспортні та каталожні дані, які необхідні для розрахунку координат п'яти основних точок механічної характеристики.
4. Що розуміється під кратностями моментів трифазного асинхронного електродвигуна?
5. Наведіть алгоритм розрахунку координат п'яти основних точок механічної характеристики трифазного асинхронного електродвигуна за паспортними і каталожними даними.
6. Як визначають координати п'яти основних точок механічної характеристики трифазного асинхронного електродвигуна за паспортними і каталожними даними у разі зниження напруги на затискачах електродвигуна?

Завдання для самоконтролю

1. Асинхронний електродвигун з номінальною потужністю **5,5 кВт** і трьома парами полюсів одержує живлення від мережі з частотою **50 Гц** і приводить в обертання робочу машину з номінальною швидкістю **945 об./хв**. Електродвигун має критичне ковзання **0,36**, мінімальне ковзання **0,82**, кратність критичного моменту **2,5**, кратність мінімального моменту **1,2**, кратність пускового моменту **2,2**. Розрахувати координати п'яти основних точок механічної характеристики електродвигуна та побудувати цю механічну характеристику.
2. Розрахувати координати основних точок механічної характеристики електродвигуна для попереднього пункту при зниженні напруги на його затискачах на **15 %** та побудувати цю механічну характеристику на тій же площині, що і у завданні 1.

Основи керування

Підключення трифазного асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором до живильної мережі здійснюється трьома проводами, які підключають до початків обмоток статора. Обмотки статора асинхронного електродвигуна з'єднують за схемою зірки (U2, V2, W2 поєднують у загальний вузол, як показано на рис.7.16а) або за схемою трикутника (U2 із V1, V2 із W1, W2 із U1, як показано на рис.7.16б).

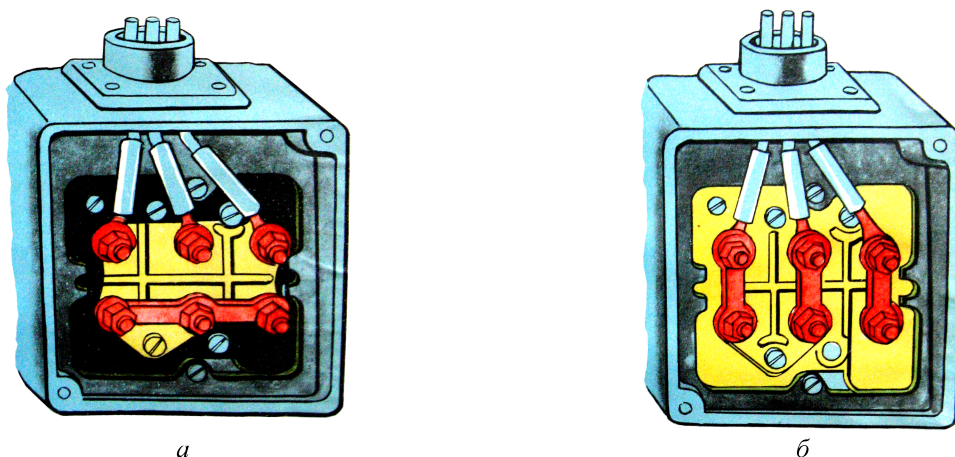


Рисунок 7.16 – З'єднання обмоток статора трифазного асинхронного електродвигуна (а – за схемою зірки, б – за схемою трикутника)

Якщо номінальна лінійна напруга мережі дорівнює 380 В, то обмотки статора трифазного асинхронного електродвигуна вмикають за схемою зірки, а якщо 220 В, то за схемою трикутника.

У початковий момент пуску ротор електродвигуна нерухомий і магнітне поле по відношенню до ротора обертається з максимальною швидкістю (при обертанні ротора магнітне поле по відношенню до нього обертається з меншою, ніж при пуску швидкістю). Внаслідок цього е.р.с., яка наводиться у провідниках обмотки ротора, буде мати найбільше значення при пуску, що обумовить значний струм у обмотці ротора при пуску, і як наслідок, значний струм у обмотці статора при пуску, сила якого у 5 – 7 разів перевищить номінальне значення. Внаслідок цього **пуск** асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором здійснюють при номінальній напрузі (прямий пуск) та при зниженій напрузі.

Прямий пуск електродвигуна здійснюється безпосереднім його включенням у мережу без будь-яких пристроїв зниження напруги. Застосовується в тих випадках, коли номінальна потужність двигуна набагато менше електричної потужності джерела (силового трансформатора). При такому способі пуску струм, споживаний електродвигуном при пуску, не спричиняє значного перегріву двигуна і значного спадання напруги мережі (тобто не порушує роботу інших пристроїв, включених в мережу).

Пуск при зниженій напрузі здійснюється за допомогою пристроїв, які знижують напругу на затискачах електродвигуна (автотрансформатора, індукційного регулятора та інших), а також за допомогою переключення обмоток статора електродвигуна із зірки на трикутник (тобто в початковий момент пуску обмотки статора з'єднані за схемою зірки, а після короткотермінового процесу пуску переключаються на схему трикутника). Застосовується для електродвигунів значної потужності (понад 30 кВт).

Регулювання швидкості обертання асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором, як впливає з (7.17) і (7.1), можна здійснювати такими способами:

1. *Зміною частоти струму в обмотці статора електродвигуна (f)*. Для цього використовують регулятор частоти, який дозволяє виконувати плавне регулювання швидкості в широких межах.
2. *Зміною кількості пар полюсів електродвигуна (p)*. Для цього використовують двигуни зі спеціальною обмоткою статора, яка дозволяє робити східчасте регулювання швидкості (1:2:3:4). Електродвигун у цьому випадку має великі габарити і вартість, а також спеціальний перемикаючий пристрій. Найбільш простим з таких електродвигунів є той, який дозволяє регулювати швидкість у співвідношенні 1:2.
3. *Зміною напруги (U)*. Для цього змінюють напругу, яка підводиться до обмоток статора, за допомогою регулятора напруги.

Для зміни напрямку обертання ротора (**реверсування**) асинхронного електродвигуна необхідно поміняти місцями кінці (або початки) двох будь-яких проводів з тих, якими до обмоток статора підводиться напруга.

Існують наступні основні способи **гальмування** асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором:

1. *Самогальмування* полягає у відключенні електродвигуна від живильної мережі, в результаті чого відбувається його невимушене гальмування в міру припинення дії інерційних сил.
2. *Гальмування противключенням* полягає в реверсуванні працюючого електродвигуна та його відключенні від живильної мережі при зупинці ротора (перед тим, як він почне обертатись в інший бік).
3. *Динамічне гальмування* полягає у відключенні електродвигуна від живильної мережі та наступній подачі на обмотки статора постійної напруги.

Останні два способи гальмування застосовують у випадках, коли необхідна миттєва зупинка електродвигуна.

Запитання для самоконтролю

1. Зобразіть схематично клемну коробку електродвигуна і покажіть на ній як з'єднати обмотки статора трифазного асинхронного електродвигуна за схемою зірки та за схемою трикутника, а також підключення електродвигуна до мережі.

2. У якому випадку обмотки статора трифазного асинхронного електродвигуна з'єднують за схемою зірки, а у якому випадку за схемою трикутника?
3. Поясніть, чому при пуску трифазний асинхронний електродвигун споживає з мережі значний струм.
4. Перелічіть і поясніть способи пуску трифазного асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором.
5. Перелічіть і поясніть способи регулювання швидкості обертання трифазного асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором.
6. Як здійснити реверс трифазного асинхронного електродвигуна?
7. Перелічіть і поясніть способи гальмування трифазного асинхронного електродвигуна.

Апаратура керування та захисту

Автоматичний вимикач призначений для захисту електродвигуна від коротких замикань та інших аварійних режимів роботи. Основні елементи: головні контакти з ручним механічним приводом, електромагнітний розчіплювач, тепловий розчіплювач. Літерне позначення на принципових електричних схемах – ***QF***.

Теплове реле призначено для захисту електродвигуна від перевантаження. Основним елементом є нагрівальний елемент, механічна система розчіплювання з біметалічною пластиною. Крім цього має розмикаючі контакти, які відключають електродвигун при перегріві біметалічної пластини струмом, що споживає електродвигун. Літерне позначення на принципових електричних схемах – ***KK***.

Магнітний пускач призначений для включення, відключення, реверсування, переключення схеми з'єднання обмоток статора електродвигуна. Основні елементи: магнітопровід з нерухою і рухою частинами, катушка, силові контакти, блокуючі контакти. Літерне позначення на принципових електричних схемах – ***KM***.

Кнопкова станція керування призначена для дистанційного керування електродвигуном і має у своєму складі кнопки «Пуск», «Стоп», «Реверс» та інші. Літерне позначення на принципових електричних схемах – ***SB***.

Запитання для самоконтролю

1. Перелічіть апаратуру керування та захисту трифазного асинхронного електродвигуна, указавши її елементи та призначення.

Принципова електрична схема керування двигуном

Розділяють *силове електричне коло* (для підключення електродвигуна до трьох фаз живильної мережі) та *електричне коло керування двигуном* (яке включають, як правило, на фазну напругу). Принципова електрична

схема управління асинхронним електродвигуном з короткозамкненим ротором показана на рис.7.17.

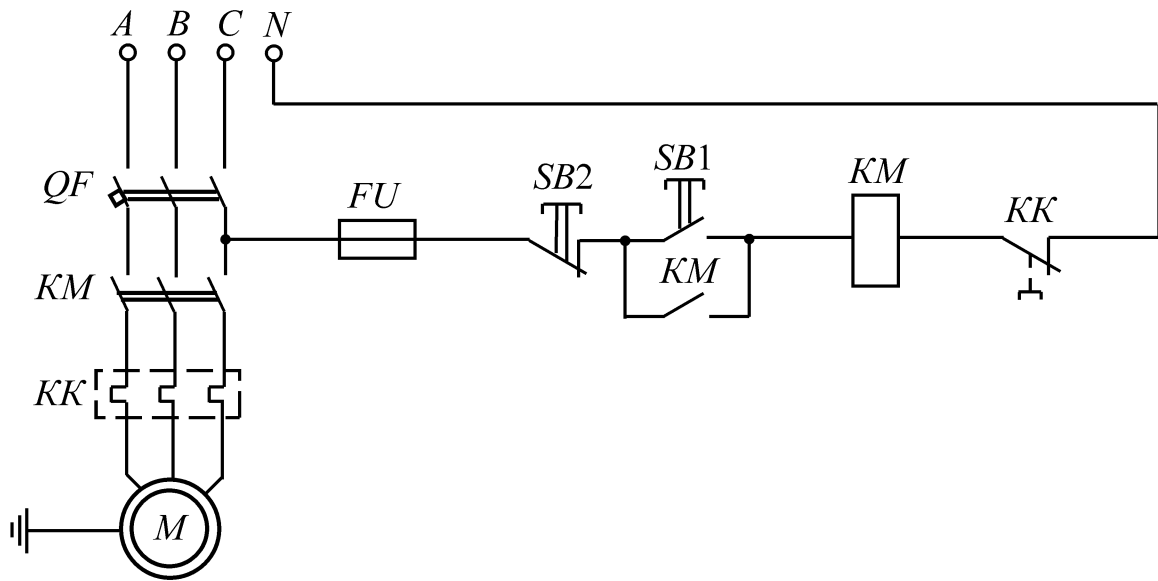


Рисунок 7.17 – Принципова електрична схема керування асинхронним електродвигуном з короткозамкненим ротором

Пуск електродвигуна (при замкненому автоматичному вимикачеві *QF*) відбувається натисканням на кнопковій станції керування кнопки «Пуск» (*SB1*). В результаті подається напруга на котушку магнітного пускача *KM*, магнітопровід пускача притягується і замикаючі контакти *KM* у силовому колі та у колі керування замикаються (відбувається подача напруги на затискачі обмоток статора електродвигуна і двигун починає працювати).

Відключення електродвигуна здійснюється натисканням на кнопковій станції керування кнопки «Стоп» (*SB2*). В результаті припиняється подача напруги на котушку магнітного пускача *KM* і замикаючі контакти *KM* у силовому колі та у колі керування розмикаються (припиняється подача напруги на затискачі обмоток статора електродвигуна і двигун зупиняється в результаті самогальмування).

Захист електродвигуна від *перевантажень* здійснюється за допомогою теплового реле *KK*, нагрівальний елемент якого включений у його силове коло. При перевантаженні електродвигуна нагрівальний елемент (біметалічна пластина) з часом перегрівається, внаслідок чого вигинається та діє на механічну систему теплового реле. Механічна система розмикає контакт теплового реле *KK* у колі керування, що призводить до знеструмлення котушки магнітного пускача *KM*. Внаслідок цього його контакти *KM* у силовому колі та у колі керування розмикаються (припиняється подача напруги на затискачі обмоток статора електродвигуна і двигун зупиняється в результаті самогальмування).

Захист електродвигуна від коротких замикань здійснюється за допомогою автоматичного вимикача QF . У разі виникання короткого замикання реагує його електромагнітний розчіплювач, який діє на головні контакти автоматичного вимикача QF в силовому колі, що призводить до їх розмикання. Внаслідок цього припиняється подача напруги на затискачі обмоток статора електродвигуна і двигун зупиняється в результаті самогальмування.

Запитання для самоконтролю

1. Що розуміється під силовим колом і колом керування трифазного асинхронного електродвигуна?
2. Складіть принципову електричну схему керування трифазним асинхронним електродвигуном з короткозамкненим ротором, розшифруйте літерні позначення.
3. Поясніть призначення елементів принципової електричної схеми керування.
4. Опишіть пуск трифазного асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором, використовуючи складену принципову електричну схему керування.
5. Опишіть відключення трифазного асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором, використовуючи складену принципову електричну схему керування.
6. Опишіть захист трифазного асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором від аварійних режимів роботи, використовуючи складену принципову електричну схему керування.

7.2 Трифазний асинхронний електродвигун з фазним ротором

Будова статора асинхронного електродвигуна з фазним ротором така ж, як у асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором. Різниця між цими електродвигунами полягає в конструкції ротора. Фазний ротор (рис.7.18) має три фазні обмотки 1, з'єднані між собою за схемою зірки. Обмотки ротора укладені у пази магнітопроводу 2, який розташований на валу 4. Кінці фазних обмоток ротора приєднують до трьох мідних кілець 3, які укріплені на валу електродвигуна та ізольовані одне від одного та від валу двигуна. На кільця накладаються щітки, які розміщені в щіткотримачах, укріплених на одній з підшипникових кришок. Отже, між щітками й обмотками ротора (через кільця) існує ковзний електричний контакт.

Таким чином, основна відмінність полягає в тому, що в двигуна з короткозамкненим ротором обмотка ротора виконується у вигляді замкненого контуру при виготовленні, а в двигуна з фазним ротором обмотка ротора замикається через щітки на додаткові резистори.

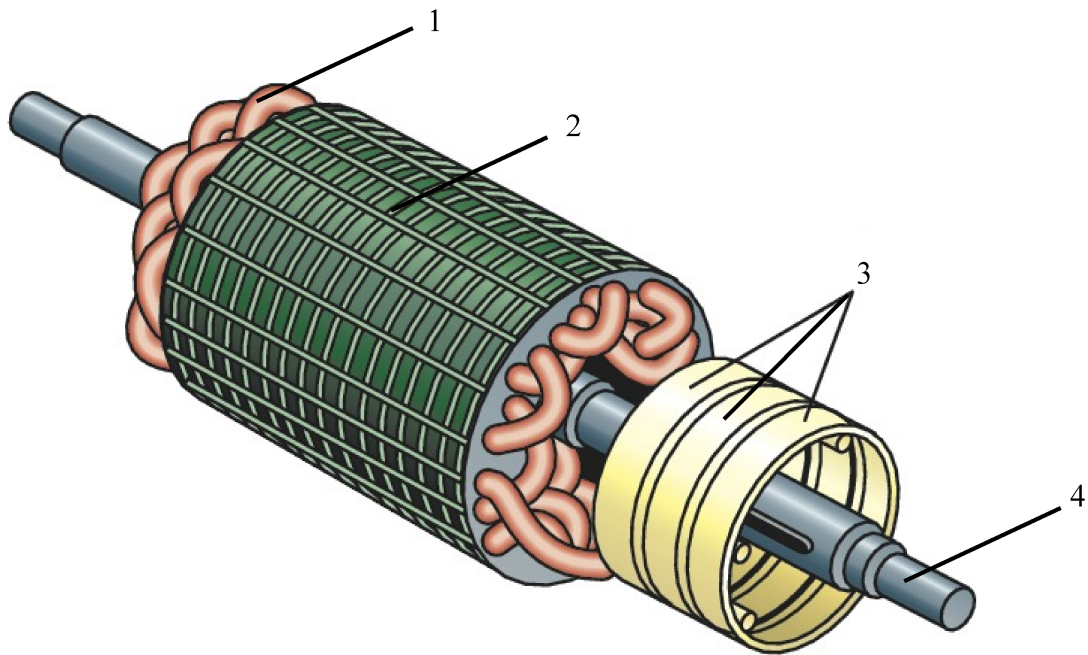


Рисунок 7.18 – Будова фазного ротора асинхронного електродвигуна

Принцип дії асинхронного електродвигуна з фазним ротором аналогічний асинхронному електродвигуну з короткозамкненим ротором.

Фізичні явища і процеси, які спостерігаються в асинхронному електродвигуні з фазним ротором при його роботі, такі ж, як і в асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором. Відмінністю є додаткова наявність тертя між щітками і кільцями, а також наявність теплової дії електричного струму, який протікає через кільця, щітки та додаткові резистори.

При роботі асинхронного електродвигуна з фазним ротором в елементах його конструкції спостерігаються такі ж втрати енергії, що й в асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором. Коефіцієнт корисної дії та коефіцієнт потужності визначаються аналогічно двигуну з короткозамкненим ротором.

Підключення трифазного асинхронного електродвигуна з фазним ротором до живильної мережі здійснюється так само, як і двигуна з короткозамкненим ротором.

Пуск асинхронного електродвигуна з фазним ротором здійснюють, як правило, при номінальній напрузі за допомогою пускових резисторів, включених в обмотки ротора через щітки і кільця. За такого способу пуску додаткові резистори повністю задіяють на початку пуску, збільшуючи активний опір обмоток ротора. В результаті відбувається зниження пусково-

го струму і збільшення пускового моменту. *Механічні характеристики електродвигуна при зміні опору кола обмоток ротора* показані на рис.7.19.

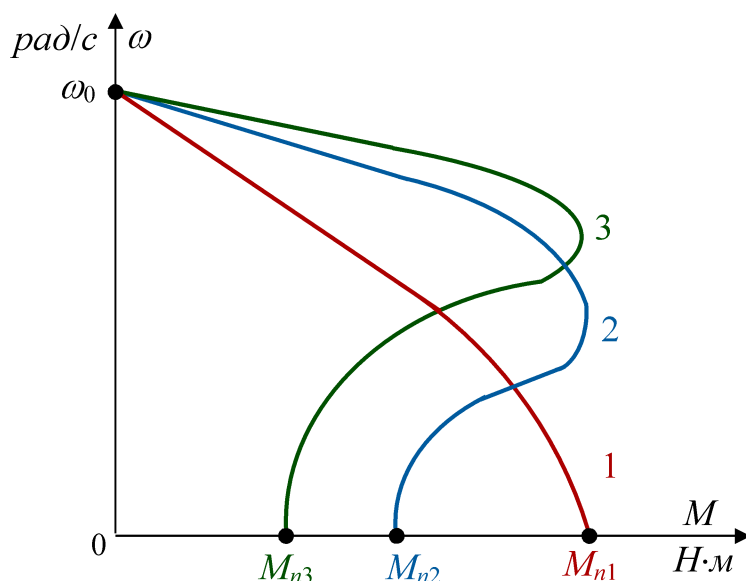


Рисунок 7.19 – Механічні характеристики трифазного асинхронного електродвигуна з фазним ротором при зміні опору обмоток ротора

На рис.7.19 позначено: 1 – механічна характеристика при повному введенні додаткових резисторів в колі обмотки ротора; 2 – механічна характеристика при частковому введенні додаткових резисторів в колі обмотки ротора; 3 – механічна характеристика при повному введенні додаткових резисторів в колі обмотки ротора. Критичний момент електродвигуна при введенні додаткових резисторів в колі обмотки ротора не змінюється.

Регулювати частоту обертання асинхронного електродвигуна з фазним ротором можна за допомогою додаткових резисторів, включених в коло обмотки ротора, у бік зниження щодо номінального значення. Регулювання здійснюється в широких межах аж до повної зупинки двигуна. Однак к.к.д. електродвигуна знижується через втрати активної потужності в додаткових резисторах.

Реверсування асинхронного електродвигуна з фазним ротором виконують так само, як і двигуна з короткозамкненим ротором.

Гальмування асинхронного електродвигуна з фазним ротором виконують так само, як і двигуна з короткозамкненим ротором.

Використовують електродвигуни з фазним ротором в установках, де необхідне плавне регулювання швидкості, наприклад, у стендах обкатування двигунів внутрішнього згорання.

Принципова електрична схема керування асинхронним електродвигуном з фазним ротором показана на рис.7.20.

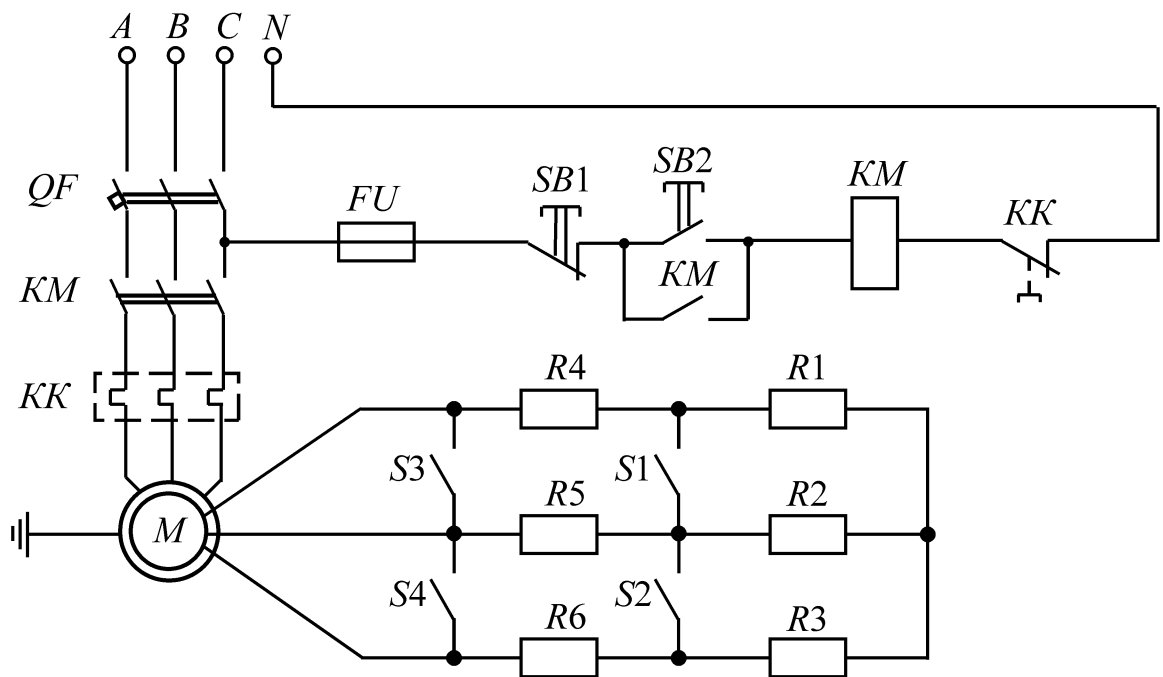


Рисунок 7.20 – Принципова електрична схема керування асинхронним електродвигуном з фазним ротором

Перед пуском електродвигуна вимикачі $S1 - S4$ розімкнені й у коло обмотки ротора включені додаткові резистори $R1 - R6$, електродвигун починає працювати на штучній механічній характеристиці 1 (рис.7.19), що дозволяє збільшити його пусковий момент. Пуск електродвигуна (при замкненому автоматичному вимикачеві QF) відбувається при натисканні на кнопковій станції керування кнопки «Пуск» ($SB1$). В результаті подається напруга на котушку магнітного пускача KM , магнітопровід пускача притягується і замикаючі контакти KM у силовому колі та у колі керування замикаються (відбувається подача напруги на затискачі обмоток статора електродвигуна і двигун починає працювати). Із розгоном електродвигуна поступово і попарно замикають вимикачі $S1 - S4$, виводячи з кола обмотки ротора додаткові резистори, збільшуючи швидкість обертання електродвигуна. При замиканні вимикачів $S1$ і $S2$ у колі обмотки ротора залишаються включеними додаткові резистори $R4 - R6$ і електродвигун працює на штучній механічній характеристиці 2 (рис.7.19). При замиканні вимикачів $S3$ і $S4$ усі додаткові резистори з кола обмотки ротора виключаються і електродвигун працює на природній механічній характеристиці 3 (рис.7.19). У процесі роботи швидкість електродвигуна можна регулювати шляхом попарного замикання або розмикання вимикачів $S1 - S4$. Відключення та захист від аварійних режимів роботи електродвигуна здійснюється так само, як і у асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором.

Запитання для самоконтролю

1. Опишіть будову трифазного асинхронного електродвигуна з фазним ротором.
2. Чим будова трифазного асинхронного електродвигуна з фазним ротором відрізняється від будови трифазного асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором?
3. Опишіть принцип дії трифазного асинхронного електродвигуна з фазним ротором.
4. Перелічіть фізичні явища, які спостерігаються в обмотці статора трифазного асинхронного електродвигуна з фазним ротором.
5. Перелічіть фізичні явища, які спостерігаються в обмотці ротора трифазного асинхронного електродвигуна з фазним ротором.
6. Перелічіть фізичні явища, які спостерігаються в магнітопроводі трифазного асинхронного електродвигуна з фазним ротором.
7. Перелічіть фізичні явища, які спостерігаються в механічній системі трифазного асинхронного електродвигуна з фазним ротором.
8. Складіть енергетичну діаграму трифазного асинхронного електродвигуна з фазним ротором, розшифруйте літерні позначення.
9. Зобразіть якісно сімейство механічних характеристик трифазного асинхронного електродвигуна з фазним ротором та поясніть їх.
10. Перелічіть і поясніть способи регулювання швидкості обертання трифазного асинхронного електродвигуна з фазним ротором.
11. Складіть принципову електричну схему керування трифазним асинхронним електродвигуном з фазним ротором, розшифруйте літерні позначення та поясніть її роботу.

Тема 8 ТРАНСФОРМАТОРИ. ОСНОВИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

8.1 Однофазний трансформатор

Будова та принцип дії

Трансформатор – це пристрій, призначений для перетворення електроенергії змінного електричного струму однієї напруги в електроенергію змінного струму іншої напруги при збереженні частоти струму.

Будова однофазного трансформатора наступна (рис.8.1). Він складається з магнітопроводу 1, виготовленого з електротехнічної сталі, на якому розташовані дві обмотки з мідного проводу, ізольовані від магнітопроводу та одна від одної (первинна обмотка 2 і вторинна обмотка 3). *Первинна обмотка* підключається до джерела електроенергії (тобто до мережі), а до *вторинної обмотки* підключаються споживачі електроенергії або лінії електропередачі, які ведуть до споживачів. Частина магнітопроводу, на яких розташовані обмотки, називаються *стрижнями*, а частини, що замикають стрижні, називаються *ярмами*.

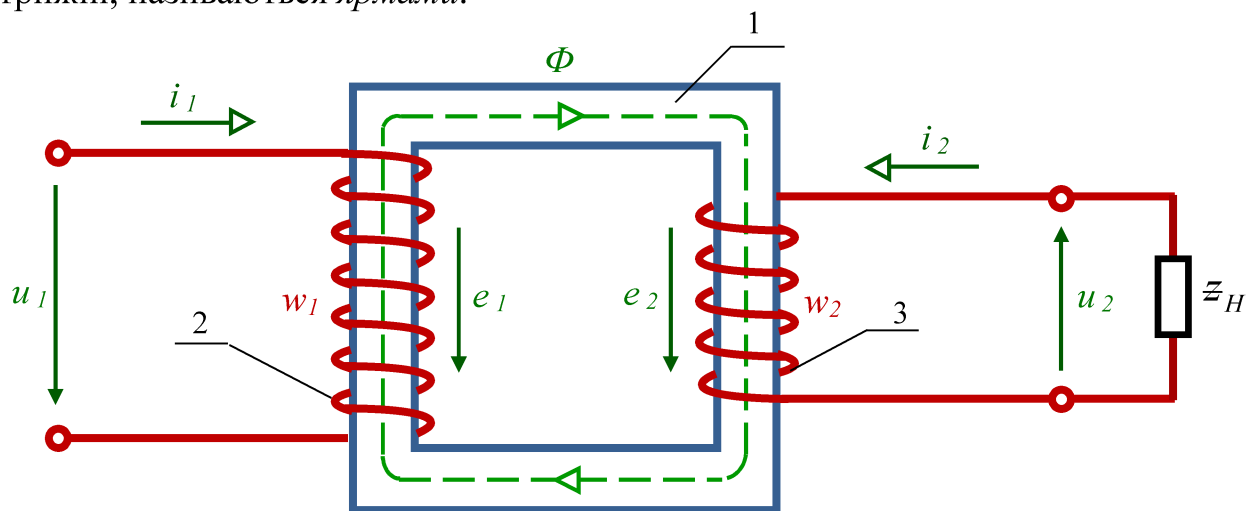


Рисунок 8.1 – Конструктивна схема однофазного трансформатора

Магнітопроводи трансформаторів виконуються трьох видів: *стрижньові*, *броньові* та *тороїдальні*. В однофазному стрижньовому трансформаторі (рис.8.1) первинна і вторинна обмотки розміщуються на двох стрижнях, зв'язаних ярмами. В однофазному броньовому трансформаторі (рис.8.2) первинна і вторинна обмотки розміщуються на одному стрижні, а ярма охоплюють обмотки з двох боків (ніби «бронюючи» їх). У тороїдальному трансформаторі (рис.8.3) магнітопровід має вигляд кільця, на якому розміщуються обмотки.

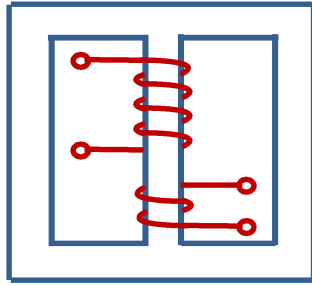


Рис.8.2

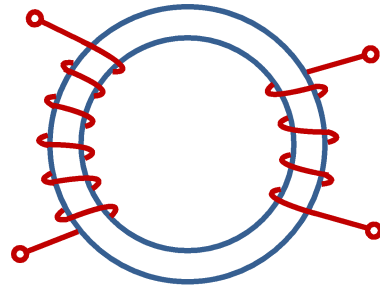


Рис.8.3

Трансформатор, який має одну первинну та одну вторинну обмотки називається *двохобмотковим*, одну первинну та дві вторинні обмотки – *трьохобмотковим*, є також *багатообмоткові* трансформатори.

Крім активних частин (магнітопроводу та обмоток) конструкція трансформатора містить у собі ряд частин, призначених для ізоляції, охолодження, кріплення активних частин та інших цілей: корпус або бак із трансформаторною олією, вводи, ізоляцію обмоток і магнітопроводу та інше.

Принцип дії трансформатора наступний (рис.8.1): до первинної обмотки підводиться змінна напруга u_1 , під дією якої в обмотці протікає змінний струм i_1 . Цей струм створює змінний магнітний потік Φ , який замикається по магнітопроводу та пронизує витки первинної і вторинної обмоток. В результаті в цих обмотках наводяться змінні е.р.с. e_1 і e_2 :

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt}; \quad e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt}, \quad (8.1)$$

де w_1 – кількість витків первинної обмотки;
 w_2 – кількість витків вторинної обмотки.

При підключенні навантаження у вторинній обмотці протікає змінний струм i_2 , а на її затискачах встановлюється змінна напруга u_2 .

З виразів (8.1) випливає, що в будь-який момент часу відношення е.р.с., які наводяться в обмотках, дорівнює відношенню кількостей витків цих обмоток:

$$k_T = \frac{e_1}{e_2} = \frac{w_1}{w_2}, \quad (8.2)$$

де k_T – **коефіцієнт трансформації трансформатора**.

Вираз (8.2) справедливий не тільки для миттєвих значень, але і для амплітудних та діючих значень. Тому коефіцієнт трансформації трансформатора можна приблизно визначити дослідним шляхом: підключити до затискачів обмоток трансформатора вольтметри та розділити показання вольтметра в первинній обмотці на показання вольтметра у вторинній обмотці.

Приклад 8.1

Однофазний трансформатор, первинна обмотка якого включена в мережу, працює на холостому ході. Вольтметр, включений на затискачі первинної обмотки, показав **660 В**, вольтметр, включений на затискачі вторинної обмотки, показав **220 В**. Кількість витків первинної обмотки дорівнює **330**.

Визначити коефіцієнт трансформації трансформатора та кількість витків вторинної обмотки.

Розв'язок.

1. Визначаємо коефіцієнт трансформації трансформатора за (8.2):

$$k_T = \frac{w_1}{w_2} = \frac{660}{220} = 3.$$

2. Визначаємо кількість витків вторинної обмотки з (8.2):

$$w_2 = \frac{w_1}{k_T} = \frac{330}{3} = 110 \text{ витків.}$$

Якщо на затискачах первинної обмотки напруга більша за напругу на затискачах вторинної обмотки, то трансформатор є *понижувальним*, а якщо навпаки, то *підвищувальним*. У понижувальному трансформаторі $w_1 > w_2$ і $k_T > 1$, у підвищувальному трансформаторі $w_1 < w_2$ і $k_T < 1$.

Приклад 8.2

Підвищувальний однофазний трансформатор, первинна обмотка якого включена в мережу, працює на холостому ході. Вольтметр, включений на затискачі первинної обмотки, показав **220 В**. Коефіцієнт трансформації трансформатора дорівнює **0,1**. Кількість витків первинної обмотки дорівнює **330**.

Визначити напругу на затискачах вторинної обмотки трансформатора та кількість витків вторинної обмотки.

Розв'язок.

1. Визначаємо напругу на затискачах вторинної обмотки трансформатора на підставі (8.2):

$$U_2 = \frac{U_1}{k_T} = \frac{220}{0,1} = 2200 \text{ В.}$$

2. Визначаємо кількість витків вторинної обмотки з (8.2):

$$w_2 = \frac{w_1}{k_T} = \frac{330}{0,1} = 3300 \text{ витків.}$$

Режим роботи трансформатора, при якому на затискачі первинної обмотки подана номінальна напруга, а його вторинна обмотка розімкнена, називається *холостим ходом* трансформатора. Струм, який протікає в первинній обмотці трансформатора в цьому режимі, називається струмом холостого ходу. Якщо до затискачів вторинної обмотки підключити споживачів електроенергії, то трансформатор буде працювати в *режимі навантаження*.

Запитання для самоконтролю

1. Для чого призначений трансформатор?
2. У чому суть явища електромагнітної індукції?
3. Сформулюйте і математично запишіть закон електромагнітної індукції.
4. Складіть і опишіть конструктивну схему однофазного трансформатора.
5. Перелічте та опишіть види магнітопроводів трансформатора.
6. Як розподіляються трансформатори за кількістю обмоток?
7. Опишіть принцип дії однофазного трансформатора.
8. Що таке коефіцієнт трансформації однофазного трансформатора?
9. Як визначити коефіцієнт трансформації однофазного трансформатора дослідним шляхом?
10. Який однофазний трансформатор називають понижувальним?
11. Який однофазний трансформатор називають підвищувальним?
12. Перелічіть режими роботи однофазного трансформатора.

Завдання для самоконтролю

Однофазний трансформатор у первинній обмотці має **2200 витків**. Ця обмотка призначена для роботи з напругою **220 В**. Необхідно, щоб напруга на затискачах вторинної обмотки була **22 В**.

1. Визначити кількість витків вторинної обмотки.

Підвищувальний однофазний трансформатор, первинна обмотка якого включена в мережу, працює на холостому ході. Вольтметр, включений на затиски первинної обмотки, показав **400 В**. Коефіцієнт трансформації трансформатора дорівнює **0,2**. Кількість витків первинної обмотки дорівнює **250**.

2. Визначити напругу на затискачах вторинної обмотки трансформатора.
3. Визначити кількість витків вторинної обмотки.

Фізичні явища і процеси в елементах конструкції

При роботі однофазного трансформатора в елементах його конструкції спостерігаються наступні фізичні явища і процеси.

В первинній обмотці:

- явище електричного струму;
- явище електромагнетизму;
- явище електромагнітної індукції (самоіндукції);
- явище теплової дії струму;
- процес нагрівання обмотки.

У вторинній обмотці:

- явище електромагнітної індукції (взаємної індукції);
- явище електричного струму;
- явище електромагнетизму;
- явище теплової дії струму;
- процес нагрівання обмотки.

В магнітопроводі:

- явище електромагнітної індукції;
- явище вихрових струмів;
- явище електромагнітної сили від дії вихрових струмів;
- явище теплової дії вихрових струмів;
- явище гістерезису;
- явище теплової дії гістерезису;
- процес нагрівання магнітопроводу.

Крім цього відбувається обмін тепловою енергією між елементами конструкції трансформатора і навколишнім середовищем.

Запитання для самоконтролю

1. Перелічіть фізичні явища, які спостерігаються у первинній обмотці однофазного трансформатора.
2. Перелічіть фізичні явища, які спостерігаються у вторинній обмотці однофазного трансформатора.
3. Перелічіть фізичні явища, які спостерігаються у магнітопроводі однофазного трансформатора.

Енергетична діаграма

При роботі трансформатор споживає з мережі електричну енергію однієї напруги, а віддає споживачу електричну енергію іншої напруги. При протіканні цього процесу відбуваються втрати енергії у вигляді теплоти в елементах конструкції трансформатора (як показано вище): втрати в обмотках, втрати в магнітопроводі. Розглянемо даний процес перетворення енергії на енергетичній діаграмі трансформатора (рис.8.4).

На енергетичній діаграмі позначено:

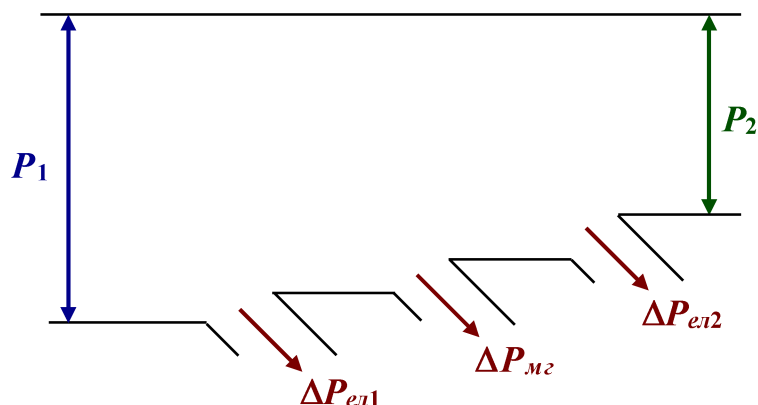


Рисунок 8.4 – Енергетична діаграма трансформатора

P_1 – активна потужність, яку споживає трансформатор, Вт;
 $\Delta P_{ел1}$ – втрати активної потужності в первинній обмотці (в результаті теплової дії струму, який протікає в ній), Вт;

$\Delta P_{\text{мг}}$ – втрати активної потужності в магнітопроводі трансформатора (в результаті теплової дії вихрових струмів і гістерезису), Вт;

для зниження цих втрат магнітопровід виконують з листів електротехнічної сталі з вмістом кремнію 4 – 5 %, товщина листів становить 0,35 – 0,5 мм при частоті струму 50 Гц, листи ізолюють один від одного;

$\Delta P_{\text{ел2}}$ – втрати активної потужності у вторинній обмотці (в результаті теплової дії струму, який протікає в ній), Вт;

P_2 – активна потужність, яка віддається трансформатором, Вт.

Сума втрат активної потужності в трансформаторі дорівнює:

$$\Delta P_{\Sigma} = P_1 - P_2, \quad \text{або} \quad \Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{\text{ел1}} + \Delta P_{\text{мг}} + \Delta P_{\text{ел2}}. \quad (8.3)$$

Усі втрати потужності, що виникають в елементах конструкції трансформатора, розділяють на постійні (ΔP_{const}) та змінні (ΔP_{var}) втрати. До постійних втрат відносять ті, що прямо пропорційні квадрату напруги на зажимах трансформатора:

$$\Delta P_{\text{const}} = \Delta P_{\text{мг}}, \quad (8.4)$$

а до змінних – ті, що прямо пропорційні квадрату сили струму в обмотках:

$$\Delta P_{\text{var}} = \Delta P_{\text{ел1}} + \Delta P_{\text{ел2}}. \quad (8.5)$$

Втрати в обмотках трансформатора:

$$\Delta P_{\text{ел.1}} = r_1 \cdot I_1^2; \quad (8.6)$$

$$\Delta P_{\text{ел.2}} = r_2 \cdot I_2^2, \quad (8.7)$$

де r_1, r_2 – активні опори обмоток трансформатора, Ом;

I_1, I_2 – діючі значення сил струмів в обмотках трансформатора, А.

Коефіцієнт корисної дії трансформатора дорівнює:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Delta P_{\Sigma}}{P_1} = 1 - \frac{\Delta P_{\Sigma}}{P_1}. \quad (8.8)$$

Коефіцієнт корисної дії трансформатора змінюється в залежності від навантаження. Максимальне значення він має у випадку, коли постійні втрати дорівнюють змінним. Це відбувається, коли трансформатор завантажений на 60 – 70 %.

Приклад 8.3

Первинна обмотка однофазного трансформатора включена в мережу, а до вторинної обмотки підключені лампи розжарювання, у яких коефіцієнт потужності дорівнює одиниці. Ватметр, включений у первинне коло, показав **4600 Вт**. Вольтметр, включений на затискачі вторинної обмотки, показав **220 В**, амперметр, включений у вторинне коло, показав **20 А**.

Визначити коефіцієнт корисної дії трансформатора.

Розв'язок.

1. Визначаємо коефіцієнт корисної дії трансформатора за (8.6):

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2 \cdot I_2}{P_1} = \frac{220 \cdot 20}{4600} = 0,95.$$

Коефіцієнт потужності трансформатора дорівнює:

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{S_1}, \quad (8.9)$$

де P_1 – активна потужність, яку споживає трансформатор з мережі, *Вт*;

S_1 – повна потужність, яку споживає трансформатор з мережі, *ВА*.

Потужності, які споживає однофазний трансформатор з мережі, та потужності, які він віддає навантаженню, визначаються за (5.34).

Сила струму, який трансформатор споживає з мережі, на підставі (5.34) визначається так:

$$I_1 = \frac{S_1}{U_1}, \quad (8.10)$$

де U_1 – напруга на затискачах первинної обмотки трансформатора, *В*.

Приклад 8.4

Однофазний трансформатор включений у мережу на напругу **400 В**. Первинна обмотка трансформатора має **1200 витків**, вторинна – **300 витків**. До трансформатора підключений однофазний асинхронний електродвигун, який споживає струм силою **19 А**, і має коефіцієнт потужності **0,8**. Трансформатор при цьому споживає з мережі реактивну потужність рівну **1300 вар** і має к.к.д. **95 %**.

Визначити коефіцієнт трансформації трансформатора; напругу на затискачах вторинної обмотки трансформатора; активну потужність, яку споживає навантаження; активну потужність, яку споживає трансформатор; сумарні втрати активної потужності в трансформаторі; повну потужність, яку споживає трансформатор; повну потужність, яку віддає трансформатор; коефіцієнт потужності трансформатора; силу струму (діюче значення), який споживає трансформатор з мережі.

Розв'язок.

1. Визначаємо коефіцієнт трансформації трансформатора за (8.2):

$$k_T = \frac{w_1}{w_2} = \frac{1200}{300} = 4.$$

2. Визначаємо напругу на затискачах вторинної обмотки трансформатора на підставі (8.2):

$$U_2 = \frac{U_1}{k_T} = \frac{400}{4} = 100 \text{ В}.$$

3. Визначаємо активну потужність, яку споживає навантаження за (5.34):

$$P_2 = U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 = 100 \cdot 19 \cdot 0,8 = 1520 \text{ Вт}.$$

4. Визначаємо активну потужність, яку споживає трансформатор з (8.8):

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta} = \frac{1520}{0,95} = 1600 \text{ Вт}.$$

5. Визначаємо сумарні втрати активної потужності в трансформаторі за (8.3):

$$\Delta P_\Sigma = 1600 - 1520 = 80 \text{ Вт}.$$

6. Визначаємо повну потужність, яку споживає трансформатор, за (4.60):

$$S_1 = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2} = \sqrt{1600^2 + 1300^2} = 2062 \text{ ВА}.$$

7. Визначаємо коефіцієнт потужності трансформатора за (8.9):

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{S_1} = \frac{1600}{2062} = 0,78.$$

8. Визначаємо діюче значення сили струму, який споживає трансформатор з мережі, за (8.10):

$$I_1 = \frac{S_1}{U_1} = \frac{2062}{400} = 5,2 \text{ А}.$$

Запитання для самоконтролю

1. Складіть енергетичну діаграму однофазного трансформатора з розшифрованою літерних позначень.
2. Перелічте втрати потужності в елементах конструкції трансформатора, назвіть причини їх виникнення.
3. Що таке постійні втрати потужності в трансформаторі?
4. Що таке змінні втрати потужності в трансформаторі?
5. Як визначити втрати потужності в обмотках однофазного трансформатора?
6. Як визначити сумарні втрати потужності в однофазному трансформаторі?
7. Як впливають втрати потужності в елементах конструкції однофазного трансформатора на його роботу?
8. Як визначити коефіцієнт корисної дії однофазного трансформатора? Коли він має максимальне значення?
9. Як визначити коефіцієнт потужності однофазного трансформатора?

10. Як розрахувати силу струму, який трансформатор споживає з мережі?

Завдання для самоконтролю

Первинна обмотка однофазного трансформатора включена в мережу, до вторинної обмотки підключені лампи розжарювання, у яких коефіцієнт потужності дорівнює одиниці. Ватметр, включений у первинне коло, показав потужність **6900 Вт**. Вольтметр, включений на затискачі вторинної обмотки, показав **300 В**, а амперметр, включений у вторинне коло, показав **25 А**.

1. Визначити коефіцієнт корисної дії трансформатора.

Однофазний трансформатор включений у мережу на напругу **220 В**. Первинна обмотка трансформатора має **880 витків**, вторинна – **40 витків**. До трансформатора підключені лампи розжарювання, які споживають струм силою **9 А**. Трансформатор при цьому споживає з мережі реактивну потужність **100 вар** і має к.к.д. **90 %**.

2. Визначити коефіцієнт трансформації трансформатора.

3. Визначити напругу на затискачах вторинної обмотки трансформатора.

4. Визначити активну потужність, яку споживає навантаження.

5. Визначити активну потужність, яку споживає трансформатор.

6. Визначити сумарні втрати потужності в трансформаторі.

7. Визначити повну потужність, яку споживає трансформатор.

8. Визначити коефіцієнт потужності трансформатора.

9. Визначити силу струму, який споживає трансформатор з мережі.

Зовнішня характеристика

Дана характеристика показує, як змінюється напруга на затискачах вторинної обмотки трансформатора при зміні сили струму навантаження, тобто **зовнішня характеристика трансформатора** – це залежність напруги на затискачах вторинної обмотки трансформатора від сили струму навантаження, приєднаного до трансформатора.

У відповідності до фізичних явищ, викладених вище, складемо розрахункову схему вторинного кола трансформатора (рис.8.5), прийнявши, що лінія електропередачі, за допомогою якої навантаження приєднується до трансформатора, ідеальна.

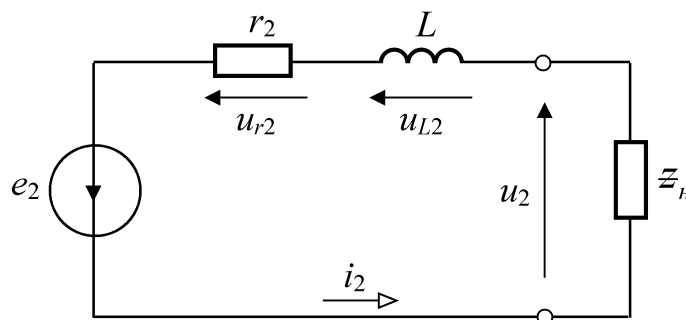


Рисунок 8.5 – Розрахункова схема вторинного кола трансформатора

На розрахунковій схемі показано:

e_2 – миттєве значення е.р.с., яка наводиться у вторинній обмотці трансформатора, B ;

r_2 – активний опір вторинної обмотки трансформатора, $Ом$;

L_2 – індуктивність вторинної обмотки трансформатора, $Гн$;

\bar{z}_H – повний опір навантаження, $Ом$;

i_2 – миттєве значення сили струму, який протікає у вторинному колі трансформатора, A ;

u_{r2} – миттєве значення спадання напруги на активному опорі вторинної обмотки трансформатора, B ;

u_{L2} – миттєве значення спадання напруги на індуктивному опорі вторинної обмотки трансформатора, B ;

u_2 – миттєве значення напруги на затискачах вторинної обмотки трансформатора, B .

Складемо рівняння вторинного кола трансформатора за другим законом Кірхгофа:

$$e_2 = u_{r2} + u_{L2} + u_2. \quad (8.11)$$

Перепишемо (8.11) з урахуванням (4.21) і (4.33) у такому вигляді:

$$u_2 = e_2 - r_2 \cdot i_2 - L_2 \frac{di_2}{dt}. \quad (8.12)$$

Отримане рівняння (8.12) являє собою **рівняння зовнішньої характеристики трансформатора**. Графічно її робоча ділянка показана на рис.8.6.

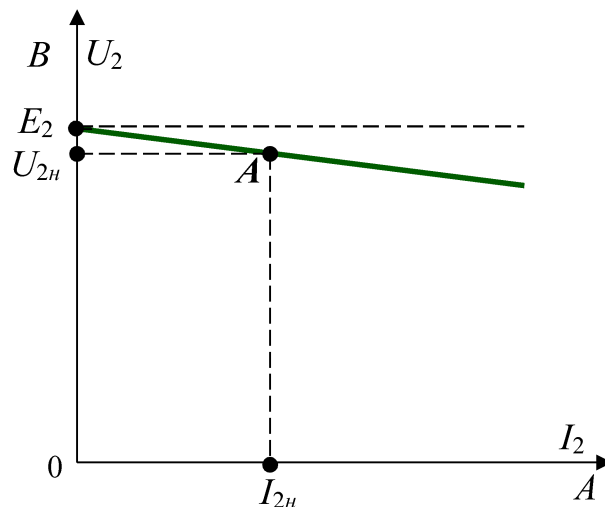


Рисунок 8.6 – Зовнішня характеристика трансформатора

На рис.8.6 позначено:

A – точка номінального режиму роботи трансформатора;

E_2 – е.р.с., що наводиться у вторинній обмотці трансформатора, B ;

$U_{2н}$ – номінальна напруга на затискачах вторинної обмотки трансформатора, B ;

$I_{2н}$ – номінальний струм у вторинній обмотці трансформатора, A ;

Зовнішня характеристика трансформатора являє собою похилу лінію через наявність спадання напруги у його вторинній обмотці при навантаженні. Різниця між діючими значеннями е.р.с. у вторинній обмотці трансформатора і поточним значенням напруги на затискачах цієї обмотки називається **втратою напруги трансформатора**:

$$\Delta U = E_2 - U_2. \quad (8.13)$$

Приклад 8.5

Вольтметр, включений на затискачах вторинної обмотки однофазного трансформатора, в режимі холостого ходу показав **220 В**, а режимі навантаження трансформатора показав **200 В**. До трансформатора за допомогою ідеальної лінії електропередачі підключено активно-індуктивне навантаження з активним опором **11 Ом** і індуктивним опором **14 Ом**. Активний опір вторинної обмотки трансформатора дорівнює **1 Ом**, а її індуктивний опір дорівнює **2 Ом**.

Визначити втрату напруги трансформатора; діюче значення сили струму у вторинному колі трансформатора в режимі навантаження.

Розв'язок.

1. В режимі холостого ходу трансформатора вольтметр, включений на затискачі вторинної обмотки, показує діюче значення е.р.с. у цій обмотці, тому втрату напруги трансформатора визначаємо за (8.13):

$$\Delta U = E_2 - U_2 = 220 - 200 = 20 \text{ В}.$$

2. Визначаємо діюче значення сили струму у вторинному колі трансформатора в режимі навантаження на підставі (4.54) і (4.55):

$$I_2 = \frac{U_2}{\sqrt{(r_2 + r_H)^2 + (x_2 + x_H)^2}} = \frac{200}{\sqrt{(1+11)^2 + (2+14)^2}} = \frac{200}{\sqrt{12^2 + 16^2}} = 10 \text{ А}.$$

Запитання для самоконтролю

1. Дайте визначення зовнішній характеристиці трансформатора.
2. Складіть та поясніть розрахункову схему вторинного кола однофазного трансформатора.
3. Запишіть і розшифруйте вираз зовнішньої характеристики трансформатора.
4. Зобразіть якісно зовнішню характеристику трансформатора.
5. Чому зовнішня характеристика трансформатора є похилою лінією?
6. Що відбувається з напругою на затискачах трансформатора при збільшенні навантаження? Чому?
7. Як експериментально визначити е.р.с. у вторинній обмотці трансформатора?
8. Дайте визначення втраті напруги трансформатора.

9. Запишіть вираз втрати напруги трансформатора.

Завдання для самоконтролю

Вольтметр, включений на затискачі вторинної обмотки однофазного трансформатора, в режимі холостого ходу показав **380 В**, а в режимі навантаження трансформатора показав **340 В**. До трансформатора за допомогою ідеальної лінії електропередачі підключено активно-індуктивне навантаження з активним опором **15 Ом** і індуктивним опором **10 Ом**. Активний опір вторинної обмотки трансформатора дорівнює **1 Ом**, а її індуктивний опір дорівнює **2 Ом**.

1. Визначити втрату напруги трансформатора.
2. Визначити діюче значення сили струму у вторинному колі трансформатора в режимі навантаження.

Принципова електрична схема

На принциповій електричній схемі однофазний силовий трансформатор позначається так, як показано на рис.8.7.



Рисунок 8.7 – Позначення однофазного силового трансформатора на принциповій електричній схемі

Принципова електрична схема підключення навантаження (електроосвітлювального пристрою *EL*) і електровимірювальних приладів (вольтметрів *PV₁*, *PV₂* і амперметрів *PA₁*, *PA₂*) до затискачів однофазного силового трансформатора *T* показана на рис.8.8.

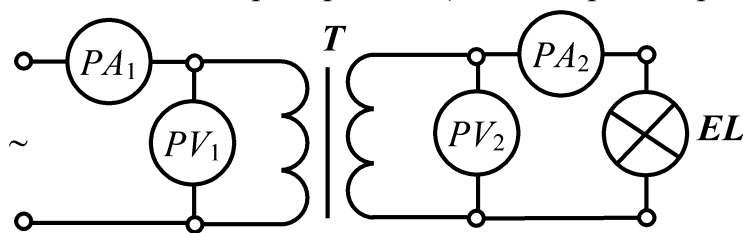


Рис.8.8

Запитання для самоконтролю

1. Наведіть умовне графічне та літерне позначення однофазного силового трансформатора на принциповій електричній схемі кола.
2. Наведіть та поясніть принципову електричну схему кола з однофазним силовим трансформатором і приєднаним до нього навантаженням.

Технічні параметри

Однофазні трансформатори, що випускаються для промислових цілей, призначені для роботи в заданих умовах з визначеними параметрами, які називають **номінальними**. До номінальних параметрів цих трансформаторів, що вказуються на заводській табличці, укріпленій на корпусі трансформатора, відносяться:

- номінальна повна потужність трансформатора, $kB \cdot A$;
- номінальна частота живильної мережі, $Гц$;
- діючі значення номінальних напруг обмоток, B ;
- діючі значення номінальних струмів в обмотках, A ;
- коефіцієнт корисної дії трансформатора, %.

Основним технічним параметром трансформатора є його номінальна повна потужність:

$$S_n = U_{1n} \cdot I_{1n}, \quad (8.14)$$

де U_{1n} – номінальна напруга первинної обмотки, B ;
 I_{1n} – номінальний струм первинної обмотки, A .

Запитання для самоконтролю

1. Перелічіть номінальні параметри однофазного трансформатора.

8.2 Трифазний силовий трансформатор

Трифазний силовий трансформатор (рис.8.9) має магнітопровід 1, який складається з трьох стрижнів, об'єднаних зверху та знизу ярмами. На кожному стрижні розміщені первинна обмотка 2 і вторинна обмотка 3 однієї фази. Одна обмотка розміщується поверх іншої, причому ближче до магнітопроводу знаходиться обмотка низької напруги через те, що її легше ізолювати від нього. Початки первинних обмоток позначаються A, B, C , кінці – X, Y, Z . Початки вторинних обмоток позначаються a, b, c , кінці – x, y, z .

Принцип дії трифазного трансформатора наступний: на затискачі первинних обмоток подаються змінні напруги u_A, u_B, u_C , зсунені за фазою на кут 120° . В результаті в первинних обмотках протікають змінні електричні струми i_A, i_B, i_C , зсунені за фазою на кут 120° . Ці струми призводять до виникнення магнітних потоків Φ_A, Φ_B, Φ_C , зсунених за фазою на кут 120° , які пронизують відповідні первинні та вторинні обмотки та наводять у них електрорушійні сили e_A, e_B, e_C , зсунені за фазою на кут 120° , та e_a, e_b, e_c , зсунені за фазою на кут 120° . При підключенні симетричного трифазного навантаження у вторинних обмотках протікають струми i_a, i_b, i_c , зсунені за фазою на кут 120° , а на їх затискачах встановлюються напруги u_a, u_b, u_c ,

зсунені за фазою на кут 120° . Аналогічний результат можна одержати при використанні трьох однофазних трансформаторів, але сумарні габарити і вага яких буде більше, ніж у трифазного трансформатора.

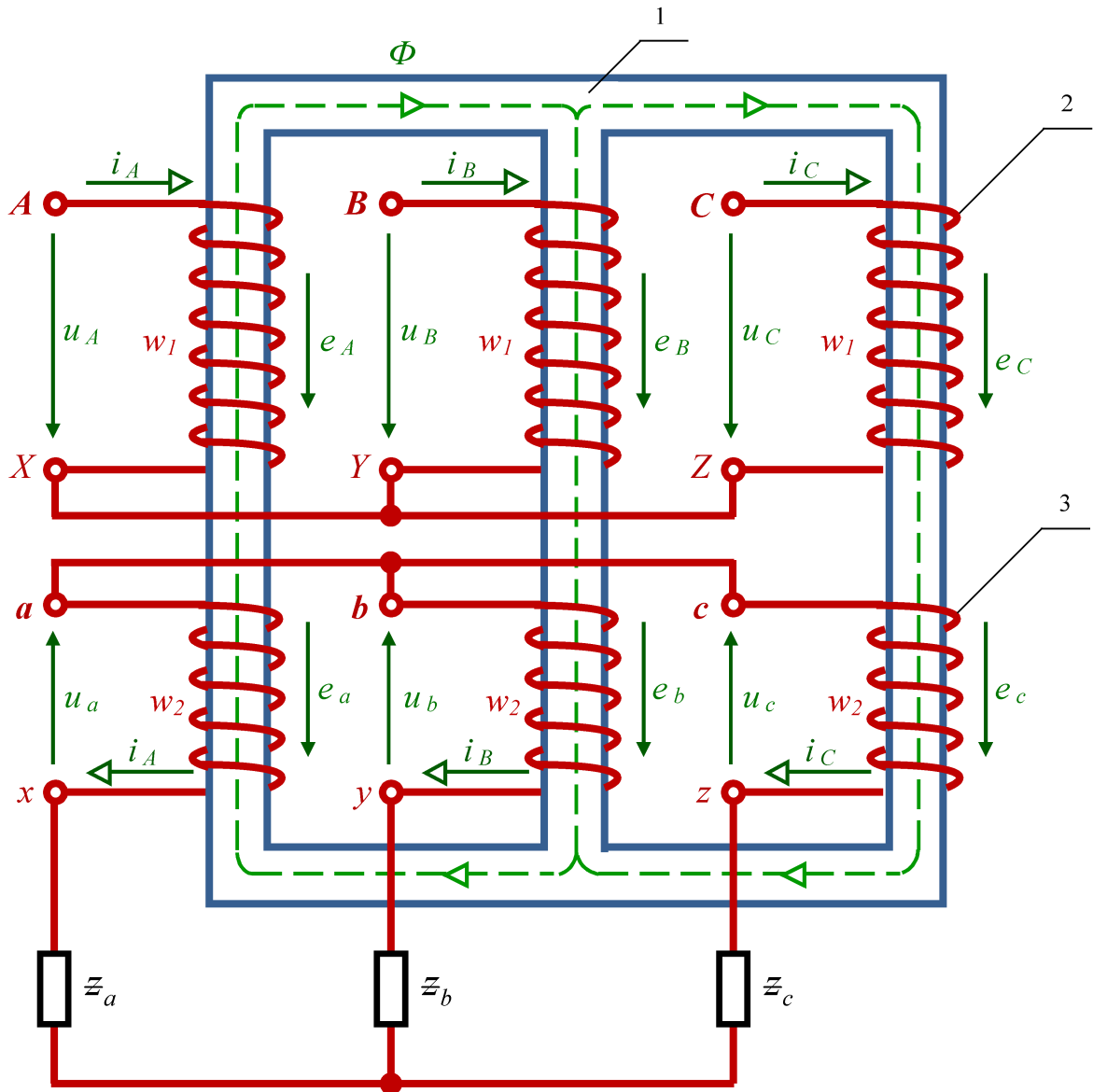


Рисунок 8.9 – Конструктивна схема трифазного силового трансформатора

Первинна і вторинна обмотки трифазного трансформатора можуть бути з'єднані за схемами зірки або трикутника. При цьому за номінальні напруги первинної і вторинної обмоток приймають лінійні напруги. Взаємозв'язок між номінальними напругами трифазного силового трансформатора при з'єднанні обмоток «зірка» – «зірка», або «трикутник» – «трикутник» наступна:

$$U_{1л} = k_T \cdot U_{2л}, \quad (8.15)$$

при з'єднанні обмоток «зірка» – «трикутник»:

$$U_{1н} = \sqrt{3} \cdot k_{\tau} \cdot U_{2н}, \quad (8.16)$$

при з'єднанні обмоток «трикутник» – «зірка»:

$$U_{1н} = \frac{k_{\tau} \cdot U_{2н}}{\sqrt{3}}. \quad (8.17)$$

При роботі трифазного трансформатора в елементах його конструкції протікають фізичні явища і процеси, аналогічні однофазному трансформатору і тому в елементах конструкції трифазного трансформатора спостерігаються ті ж втрати, що й у однофазного трансформатора.

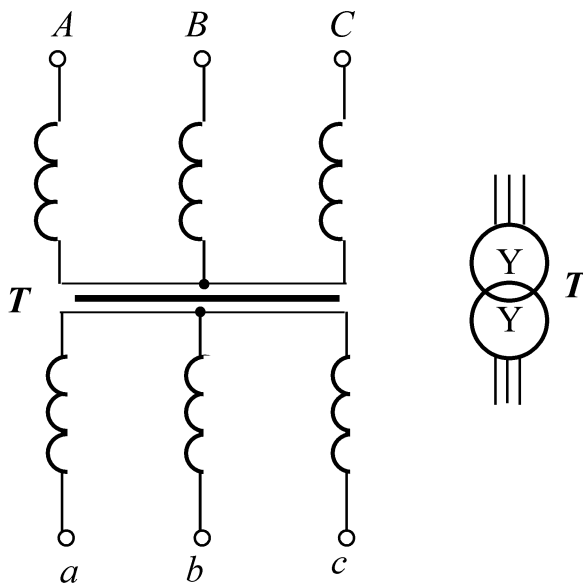


Рис.8.10

Зовнішня характеристика трифазного силового трансформатора та її рівняння такі ж, як і в однофазного трансформатора.

На принциповій електричній схемі трифазний силовий трансформатор позначається так, як показано на рис.8.10.

Технічні параметри трифазних трансформаторів аналогічні однофазним трансформаторам із доповненням схем з'єднань обмоток. Марка трансформатора, наприклад, *ТМ-100/10/0,4* розшифровується в такий спосіб: трансформатор трифазний масляний

потужністю 100 кВА з номінальною первинною напругою 10 кВ і номінальною вторинною напругою 0,4 кВ (напруги лінійні).

Приклад 8.6

У наявності є трансформатор марки **ТМ-100/10/0,4**, у якого обмотки з'єднані «зірка» – «зірка».

Визначити коефіцієнт трансформації і номінальний споживаний струм трансформатора.

Розв'язок.

1. Визначаємо коефіцієнт трансформації трансформатора з (8.15):

$$k_{\tau} = \frac{U_{1н}}{U_{2н}} = \frac{10}{0,4} = 25.$$

2. Визначаємо номінальний споживаний струм трансформатора на підставі (5.38):

$$I_{1н} = \frac{S_{1н}}{\sqrt{3} \cdot U_{1н}} = \frac{100000}{\sqrt{3} \cdot 10000} = \frac{100}{1,73 \cdot 10} = 5,8 \text{ А}.$$

Запитання для самоконтролю

1. Складіть і опишіть конструктивну схему трифазного силового трансформатора.
2. Перелічіть схеми з'єднань первинних і вторинних обмоток трифазного силового трансформатора.
3. Опишіть принцип дії трифазного силового трансформатора.
4. Як взаємозв'язані між собою номінальні напруги трифазного силового трансформатора?
5. Перелічіть фізичні явища, які спостерігаються в елементах конструкції трифазного силового трансформатора при його роботі.
6. Складіть енергетичну діаграму трифазного силового трансформатора з розшифровкою літерних позначень.
7. Перелічіть номінальні параметри трифазного силового трансформатора.
8. Приведіть зображення трифазного силового трансформатора на принциповій електричній схемі.

Завдання для самоконтролю

У наявності є трансформатор марки **ТМ-630/35/10**, у якого обмотки з'єднані «трикутник» – «трикутник».

1. Розшифрувати марку трансформатора.
2. Визначити коефіцієнт трансформації трансформатора.
3. Визначити номінальний споживаний струм трансформатора.

У наявності є трансформатор марки **ТМ-450/10/0,4**, у якого обмотки з'єднані «зірка» – «трикутник».

4. Розшифрувати марку трансформатора.
5. Визначити коефіцієнт трансформації трансформатора.
6. Визначити номінальний споживаний струм трансформатора.

8.3 Вимірювальні трансформатори

Вимірювальний трансформатор напруги

Вимірювальний трансформатор напруги призначений для розширення меж вимірювання вольтметрів, ватметрів та інших вимірювальних приладів, а також для включення у високовольтних мережах пристроїв захисту та автоматики. Крім того, він обумовлює безпечне обслуговування вказаних приладів, відокремлюючи їх від мережі високої напруги. Будова цього трансформатора не відрізняється від будови силового трансформатора. Вимірювальні трансформатори напруги виконуються як в однофазному, так і в трифазному виконанні. Принцип дії вимірювального трансформатора напруги аналогічний силовому трансформатору. Напруга на затискачах вторинної обмотки, як правило, становить 100 В.

Коефіцієнт трансформації вимірювального трансформатора напруги визначається так:

$$k_{\text{TV}} = \frac{U_{1H}}{U_{2H}}, \quad (8.18)$$

де $U_{1н}$ – номінальна напруга первинної обмотки, V ;

$U_{2н}$ – номінальна напруга вторинної обмотки, V .

Коефіцієнт трансформації вимірювального трансформатора напруги вказується на його заводському щитку у вигляді дробу. Наприклад, $10000/100 V$, що означає номінальна напруга первинної обмотки дорівнює $10000 V$, номінальна напруга вторинної обмотки дорівнює $100 V$. Звідси можна визначити коефіцієнт трансформації трансформатора, який згідно (8.18) дорівнює 100 . Показання вимірювальних приладів, включених у вторинне коло трансформатора, необхідно множити на коефіцієнт трансформації.

Через те, що опори приладів, які підключаються до вторинної обмотки вимірювального трансформатора напруги, дуже великі, трансформатор працює практично в режимі холостого ходу. При підключенні цих приладів треба враховувати, щоб їх сумарна потужність не перевищувала номінальної потужності трансформатора. У протилежному випадку виникають похибки вимірювань за рахунок збільшення спадання напруги у вторинній обмотці трансформатора і зміни фази напруги, тому вимірювальні трансформатори напруги мають похибку за напругою і кутову похибку. Номінальні потужності вимірювальних трансформаторів напруги – від $200 VA$ до $2000 VA$.

Приклад 8.7

У високовольтну мережу через вимірювальний трансформатор напруги **35000/100 V** включений вольтметр, у якого стрілка відхилилась на **45 поділок**. Межа вимірювання вольтметра становить **300 V**, на його шкалі – **150 поділок**.

Визначити діюче значення напруги у високовольтній мережі.

Розв'язок.

1. Визначаємо коефіцієнт трансформації вимірювального трансформатора напруги за (8.18):

$$k_{TV} = \frac{U_{1н}}{U_{2н}} = \frac{35000}{100} = 350.$$

2. Визначаємо ціну поділки вольтметра:

$$C_{PV} = \frac{U_{max}}{n_{max(PV)}} = \frac{300}{150} = 2 \frac{V}{под.}$$

3. Визначаємо діюче значення напруги у високовольтній мережі:

$$U = C_{PV} \cdot n_{PV} \cdot k_{TV} = 2 \cdot 45 \cdot 350 = 31500 V = 31,5 кВ.$$

Для безпечного обслуговування вторинна обмотка і корпус вимірювального трансформатора напруги заземлюються, щоб охоронити персонал при виникненні пробією ізоляції первинної обмотки (обмотки високої напруги).

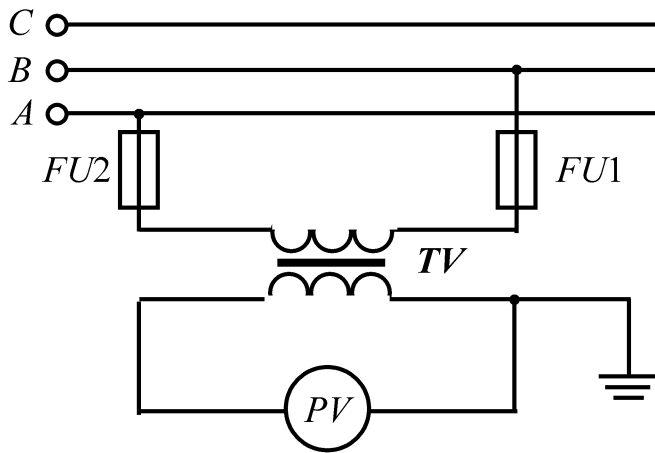


Рис.8.11

Вимірювальні трансформатори напруги підключаються до високовольтної мережі через запобіжники.

Принципова електрична схема включення вольтметра у високовольтну мережу за допомогою вимірювального трансформатора напруги показана на рис.8.11.

Вимірювальний трансформатор струму

Вимірювальний трансформатор струму призначений для розширення меж вимірювання амперметрів, ватметрів та інших вимірювальних приладів, а також для включення у високовольтних мережах пристроїв захисту та автоматики. Крім того, він обумовлює безпечне обслуговування вказаних приладів, відокремлюючи їх від мережі високої напруги. Трансформатор складається з магнітопроводу, первинної і вторинної обмоток. Кількість витків первинної обмотки набагато менше, ніж кількість витків вторинної обмотки. Первинна обмотка виконується на струми від 5 А до 15 кА, а вторинна обмотка – на струм 5 А. Первинна обмотка трансформатора включається послідовно в коло, у якому протікає вимірюваний струм, а вторинна обмотка замикається через вимірювальні прилади, які мають дуже малі опори. Тому трансформатор працює фактично в режимі короткого замикання.

Коефіцієнт трансформації вимірювального трансформатора струму дорівнює:

$$k_{\text{ТА}} = \frac{I_{1н}}{I_{2н}}, \quad (8.19)$$

де $I_{1н}$ – номінальний струм первинної обмотки, А;

$I_{2н}$ – номінальний струм вторинної обмотки, А.

Коефіцієнт трансформації вимірювального трансформатора струму вказується на його заводському щитку у вигляді дробу. Наприклад, 200/5 А, що означає номінальний струм первинної обмотки дорівнює 200 А, номінальний струм вторинної обмотки дорівнює 5 А. Звідси можна визначити коефіцієнт трансформації трансформатора, який згідно (8.19) дорівнює 40. Показання вимірювальних приладів, включених у вторинне коло трансформатора, необхідно множити на коефіцієнт трансформації.

Магнітопровід вимірювального трансформатора струму розрахований на незначний магнітний потік, тому велике збільшення потоку призведе до перегріву магнітопроводу і виходу його з ладу. При холостому ході трансформатора (тобто при розмиканні вторинної обмотки) магнітопровід буде неприпустимо перегріватися. Крім того, збільшений (у порівнянні з номінальним) магнітний потік буде наводити у вторинній обмотці трансформатора е.р.с., яка дорівнює $500\text{ В} - 1000\text{ В}$. Отже, режим холостого ходу є для вимірювального трансформатора струму аварійним. Тому вторинна обмотка повинна бути замкнена накоротко при протіканні електричного струму в первинній обмотці. Для захисту персоналу корпус і вторинна обмотка трансформатора заземлюються.

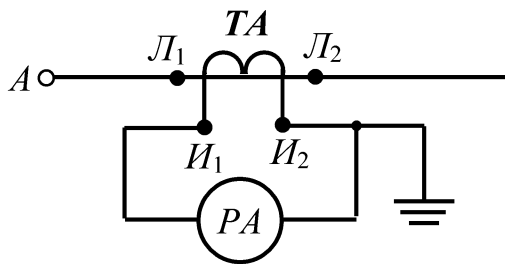


Рис.8.12

Принципова електрична схема включення амперметра у високовольтну мережу за допомогою вимірювального трансформатора струму показана на рис.8.12. На принциповій електричній схемі затискачі первинної обмотки позначені $L_1 - L_2$, затискачі вторинної обмотки позначені $I_1 - I_2$.

Приклад 8.8

У високовольтну мережу через вимірювальний трансформатор струму **400/5 А** включений амперметр, у якого стрілка відхилилась на **35 поділок**. Межа вимірювання амперметра становить **10 А**, на його шкалі – **100 поділок**.

Визначити діюче значення сили струму високовольтній мережі.

Розв'язок.

1. Визначаємо коефіцієнт трансформації вимірювального трансформатора струму за (8.19):

$$k_{\text{ТА}} = \frac{I_{1\text{н}}}{I_{2\text{н}}} = \frac{400}{5} = 80.$$

2. Визначаємо ціну поділки амперметра:

$$C_{\text{РА}} = \frac{I_{\text{max}}}{n_{\text{max(РА)}}} = \frac{10}{100} = 0,1 \frac{\text{А}}{\text{под.}}$$

3. Визначаємо діюче значення сили струму у високовольтній мережі:

$$I = C_{\text{РА}} \cdot n_{\text{РА}} \cdot k_{\text{ТА}} = 0,1 \cdot 35 \cdot 80 = 280 \text{ А}.$$

Широке розповсюдження отримав один з різновидів вимірювального трансформатора струму – *струмовимірювальні кліщі*, які призначені для вимірювання сили струму у проводах без їх розриву. На конструктивній схемі струмовимірювальних кліщів (рис.8.13) показано, що вони мають роз'ємний магнітопровід 1, на якому розташована вторинна (вимірювальна) обмотка 2. До неї підключається амперметр РА, у якого поділки на

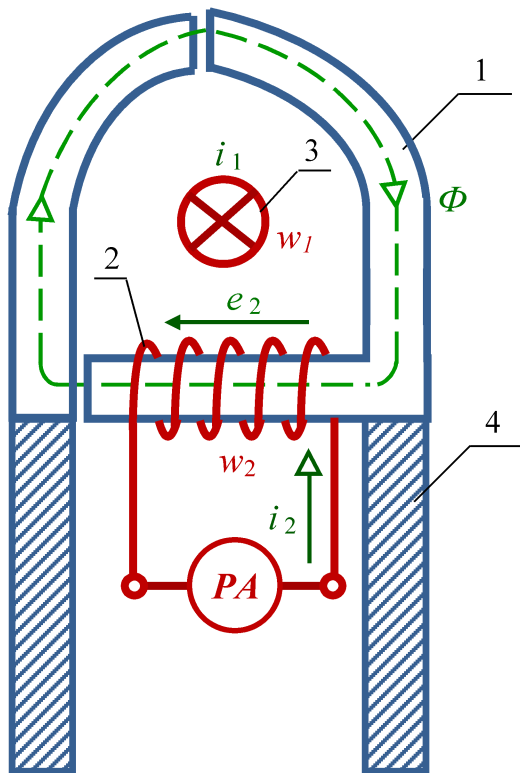


Рис.8.13

шкалі позначені з урахуванням коефіцієнта трансформації. Первинною обмоткою слугує провід 3, у якому вимірюється сила струму. Розмикання та замикання магнітопроводу здійснюється за допомогою ізолюваних ручок 4.

Принцип дії струмовимірювальних кліщів наступний. За допомогою ізолюваних ручок розмикають магнітопровід і охоплюють ним провід, по якому протікає електричний струм i_1 . Магнітний потік Φ цього струму замикається по магнітопроводу і пронизує вторинну обмотку, наводячи у ній е.р.с. e_2 . Під дією наведеної е.р.с. у вторинній обмотці, яка замкнена на амперметр, протікає струм i_2 , діюче значення якого вимірює амперметр. На шкалі амперметра відображається сила струму $I_1 = k_{\text{ТА}} \cdot I_2$.

Деякі електровимірювальні прилади (наприклад, ватметри або лічильники електроенергії) включаються одночасно через вимірювальні трансформатори напруги і струму, тому їх показання у такому випадку необхідно множити на коефіцієнти трансформації обох трансформаторів.

Приклад 8.9

Лічильник активної енергії враховує споживання електроенергії цехом переробки молока, він включений через вимірювальні трансформатори напруги **1000/100 В** і струму **200/5 А**. Показання лічильника за місяць склали **50 кВт·год**. Визначити кількість електроенергії, яку спожив цех за місяць.

Розв'язок.

1. Визначаємо коефіцієнт трансформації вимірювального трансформатора напруги за (8.18):

$$k_{\text{ТВ}} = \frac{U_{1\text{Н}}}{U_{2\text{Н}}} = \frac{10000}{100} = 100.$$

2. Визначаємо коефіцієнт трансформації вимірювального трансформатора струму за (8.19):

$$k_{\text{ТА}} = \frac{I_{1\text{Н}}}{I_{2\text{Н}}} = \frac{200}{5} = 40.$$

3. Визначаємо кількість електроенергії, яку спожив цех за місяць:

$$W = \Delta W \cdot k_{\text{ТВ}} \cdot k_{\text{ТА}} = 50 \cdot 40 \cdot 100 = 200000 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Запитання для самоконтролю

1. Для чого призначений вимірювальний трансформатор напруги?
2. Як визначити коефіцієнт трансформації вимірювального трансформатора напруги?
3. Складіть і опишіть принципову електричну схему включення вольтметра у високовольтну мережу за допомогою вимірювального трансформатора напруги.
4. Як враховується коефіцієнт трансформації вимірювального трансформатора напруги при вимірюваннях?
5. Для чого призначений вимірювальний трансформатор струму?
6. У якому режимі працює вимірювальний трансформатор струму?
7. Як визначити коефіцієнт трансформації вимірювального трансформатора струму?
8. Складіть і опишіть принципову електричну схему включення амперметра у високовольтну мережу за допомогою вимірювального трансформатора струму.
9. Як враховується коефіцієнт трансформації вимірювального трансформатора струму при вимірюваннях?
10. Опишіть будову та принцип дії струмовимірювальних кліщів.

Завдання для самоконтролю

У високовольтну мережу через вимірювальний трансформатор напруги **6000/100 В** включений вольтметр, у якого стрілка відхилилась на **20 поділок**. Межа вимірювання вольтметра становить **600 В**, на його шкалі – **150 поділок**.

1. Визначити коефіцієнт трансформації вимірювального трансформатора напруги.
2. Визначити ціну поділки вольтметра.
3. Визначити діюче значення напруги у високовольтній мережі.

У високовольтну мережу через вимірювальний трансформатор струму **300/5 А** включений амперметр, у якого стрілка відхилилась на **40 поділок**. Межа вимірювання амперметра становить **5 А**, на його шкалі – **100 поділок**.

4. Визначити коефіцієнт трансформації вимірювального трансформатора струму.
5. Визначити ціну поділки амперметра.
6. Визначити діюче значення сили струму у високовольтній мережі.

Лічильник активної енергії враховує споживання електроенергії цехом переробки м'яса, він включений через вимірювальні трансформатори напруги **400/100 В** і струму **100/5 А**. Показання лічильника за місяць склали **150 кВт·год**.

7. Визначити коефіцієнт трансформації вимірювального трансформатора напруги.
8. Визначити коефіцієнт трансформації вимірювального трансформатора струму.
9. Визначити кількість електроенергії, яку спожив цех за місяць.

На рисунку 8.14 зображена принципова електрична схема включення високовольтного навантаження в мережу. У коло навантаження через вимірювальні трансформатори струму **100/5 А** та напруги **1000/100 В** включені наступні прилади: амперметр (межа вимірювання – **5 А**, кількість поділок на шкалі – **100**), вольтметр (межа вимірювання – **150 В**, кількість поділок на шкалі – **100**), ватметр (межі вимірювань за струмом – **5 А**, за напругою – **150 В**, кількість поділок на шкалі – **150**). При вимірюваннях стрілка амперметра відхилилась на

80 поділок, стрілка вольтметра відхилилася на **90 поділок**, стрілка ватметра відхилилася на **40 поділок**.

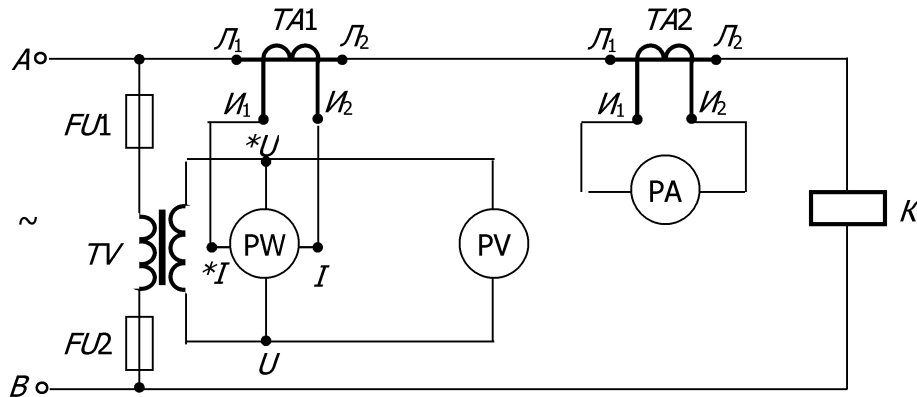


Рис.8.14

11. Визначити ціну поділки амперметра.
12. Визначити ціну поділки вольтметра.
13. Визначити ціну поділки ватметра.
14. Визначити коефіцієнти трансформації вимірювальних трансформаторів струму.
15. Визначити коефіцієнт трансформації вимірювального трансформатора напруги.
16. Визначити дійоче значення сили струму, який споживає навантаження.
17. Визначити дійоче значення напруги на затискачах навантаження.
18. Визначити повну потужність, яку споживає навантаження.
19. Визначити активну потужність, яку споживає навантаження.
20. Визначити реактивну потужність, яку споживає навантаження.
21. Визначити коефіцієнт потужності навантаження.

8.4 Автотрансформатор

Однофазний автотрансформатор (рис.8.15) складається з магнітопроводу 1, на якому розташована одна фазна обмотка 2, яка має w_1 витків. Первинне і вторинне кола трансформатора електрично зв'язані між собою (у трансформаторах, розглянутих раніше, такий зв'язок був відсутній). Первинне коло підключається до всієї обмотки, а вторинне коло – тільки до частини обмотки 3 (з кількістю витків w_2).

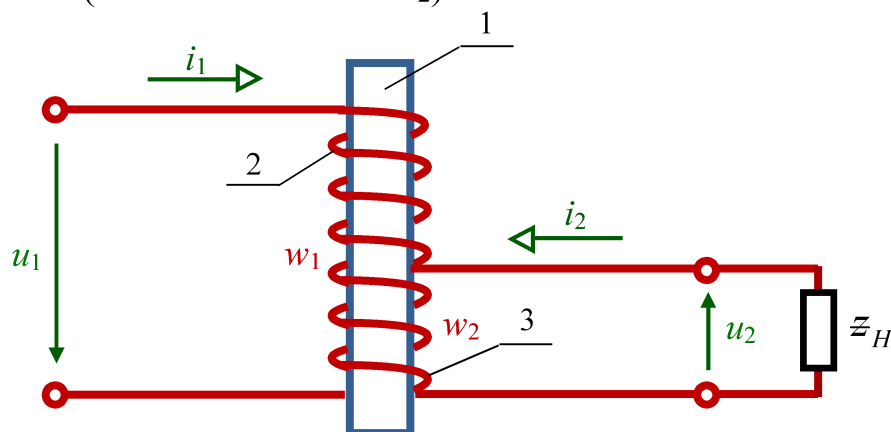


Рисунок 8.15 – Конструктивна схема однофазного автотрансформатора

Розглянемо принцип дії автотрансформатора на його конструктивній схемі. До первинного кола трансформатора підводиться змінна напруга u_1 , причому на один виток обмотки приходить напруга u_1/w_1 . Тоді напруга, яка знімається з затискачів вторинного кола трансформатора, буде дорівнювати:

$$U_2 = \frac{U_1}{w_1} w_2. \quad (8.20)$$

Перетворивши вираз (8.20), знаходимо *коефіцієнт трансформації автотрансформатора*:

$$k_{\text{ар}} = \frac{w_1}{w_2} = \frac{U_{1н}}{U_{2н}}, \quad (8.21)$$

де $U_{1н}$ – номінальна напруга первинного кола, В;
 $U_{2н}$ – номінальна напруга вторинного кола, В.

Автотрансформатори випускають однофазні та трифазні, підвищувальні та понижувальні. Коефіцієнт трансформації автотрансформаторів знаходиться в межах від 0,5 до 2, при іншому коефіцієнті трансформації

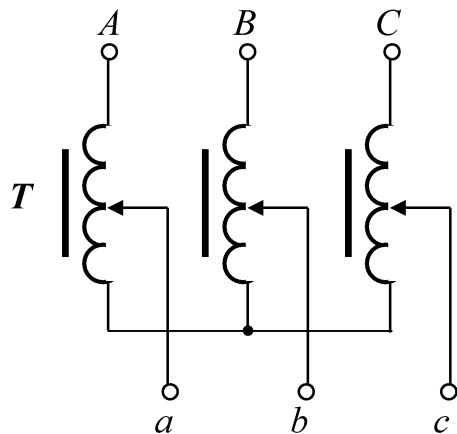


Рис.8.16

автотрансформатор не має переваги в порівнянні із силовим трансформатором. Широкі розповсюдження отримали автотрансформатори зі змінним коефіцієнтом трансформації, у яких один із затискачів вторинного кола підключається до частини обмотки через повзунок, який може переміщуватись уздовж обмотки, плавно змінюючи кількість витків w_2 . Автотрансформатори використовуються для зниження напруги на затискачах електродвигуна при пуску, для східчастого регулювання напруги електричних печей, у лабораторній практиці та для

інших цілей. Позначення трифазного автотрансформатора на принциповій електричній схемі показано на рис.8.15.

Приклад 8.7

Необхідно запустити асинхронний електродвигун за допомогою автотрансформатора, у якого коефіцієнт трансформації для даного випадку дорівнює **2**. У випадку прямого пуску електродвигуна його пусковий момент дорівнює **40 Н·м**.

Визначити пусковий момент електродвигуна при пуску за допомогою автотрансформатора.

Розв'язок.

1. Визначаємо пусковий момент електродвигуна при пуску за допомогою автотрансформатора у відповідності до (7.14) і (8.21):

$$M'_{II} = \frac{M_{II}}{k_{ат}^2} = \frac{40}{2^2} = \frac{40}{4} = 10 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Запитання для самоконтролю

1. Складіть і опишіть конструктивну схему автотрансформатора.
2. Опишіть принцип дії автотрансформатора.
3. Чому дорівнює коефіцієнт трансформації автотрансформатора?
4. Для чого використовуються автотрансформатори?
5. Приведіть зображення автотрансформатора на принциповій електричній схемі.

Завдання для самоконтролю

Необхідно запустити асинхронний електродвигун за допомогою автотрансформатора, у якого коефіцієнт трансформації для даного випадку дорівнює **1,5**. У випадку прямого пуску електродвигуна його пусковий момент дорівнює **30 Н·м**.

1. Визначити пусковий момент електродвигуна при пуску за допомогою автотрансформатора.

8.5 Зварювальний трансформатор

Зварювальний трансформатор (рис.8.17) призначений для електродугового зварювання і являє собою понижувальний трансформатор 1, який перетворює електроенергію змінного струму напругою 220 В або 380 В у електроенергію змінного струму напругою від 65 В до 70 В, яка необхідна для запалювання та стійкого горіння електричної дуги. Через те, що опір електричної дуги незначний, зварювальний трансформатор працює в режимі, близькому до короткого замикання. Тому для регулювання зварювального струму у вторинне коло трансформатора послідовно включають індукційний регулятор струму (дросель) 2, який має великий індуктивний опір. Він складається з розсувного магнітопроводу та обмотки, яка може розміщуватися на одному або на двох стрижнях (у цьому випадку частини обмотки з'єднують послідовно). Регулювання опору здійснюється зміною повітряного зазору між рухомою і нерухомою частинами магнітопроводу.

Якщо на затискачі первинного кола подана змінна напруга u_1 , а електрод 3 не торкається деталі 4, то трансформатор працює в режимі холостого ходу (тобто на затискачах вторинного кола напруга дорівнює 65...70 В). При замиканні вторинного кола (шляхом дотику електрода до деталі) відбувається запалювання електричної дуги і трансформатор починає працювати в режимі навантаження. Сутність зварювання полягає в тому, що металевий електрод під дією електричної дуги плавиться та утворює зварний шов. Для безпечного обслуговування трансформатора його вторинне коло заземлюється.

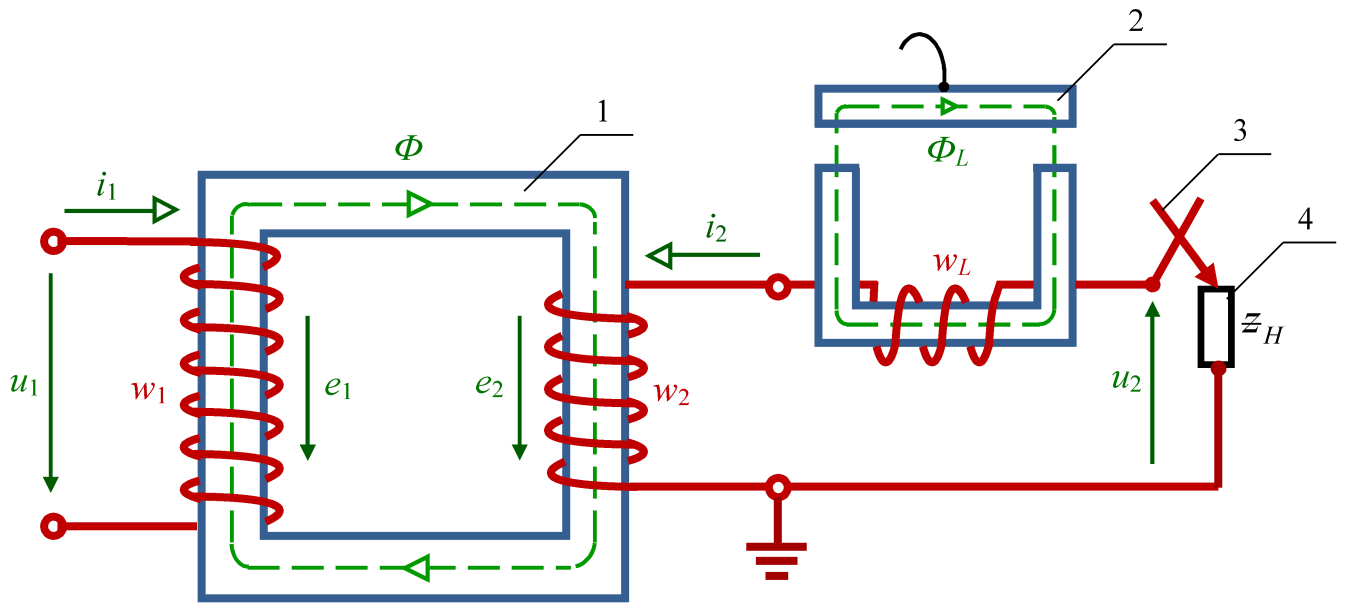


Рисунок 8.17 – Конструктивна схема однофазного зварювального трансформатора

Сімейство зовнішніх характеристик зварювального трансформатора при зміні індуктивного опору дроселя показані на рис.8.18. Якщо у силового трансформатора зміна напруги на затискачах вторинного кола незначна при зміні сили струму в колі (складає 5 – 10 %), то у зварювального трансформатора зовнішня характеристика носить крутопадаючий характер (тобто напруга на затискачах вторинного кола різко змінюється при зміні сили струму в колі).

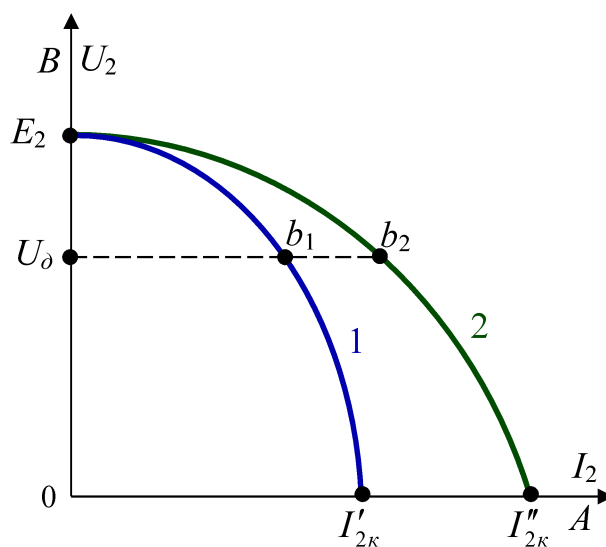


Рисунок 8.18 – Сімейство зовнішніх характеристик зварювального трансформатора

Кожному значенню повітряного зазору в магнітопроводі індукційного регулятора струму відповідає певна зовнішня характеристика. Мінімальному зазору відповідає найменший струм (крива 1), а максимальному зазору – найбільший струм (крива 2). На перетинанні зовнішніх характеристик зварювального трансформатора з напругою електричної дуги (U_d) знаходяться точки горіння дуги (b_1, b_2). Привод рухомої частини магнітопроводу дроселя має покажчик, який дозволяє встановлювати силу зварювального струму.

Запитання для самоконтролю

1. Складіть і опишіть конструктивну схему зварювального трансформатора.
2. Опишіть принцип дії зварювального трансформатора.
3. Опишіть, як регулюється сила зварювального струму.
4. Наведіть та поясніть сімейство зовнішніх характеристик зварювального трансформатора.

8.6 Основи електропостачання

Електроенергія виробляється на електростанціях, які розташовані біля джерел первинної енергії, та передається до споживачів, тобто виробництво, передача та споживання електричної енергії – єдиний у часі процес. Система виробництва, передачі та розподілу електроенергії, яка має загальне централізоване технічне керування, називається **трифазною енергетичною системою**. До її складу входять: електростанції, трансформаторні підстанції, лінії електропередачі та споживачі електроенергії.

Електростанція – це сукупність установок та обладнання, призначених для перетворення природної енергії (пального, потоку води або повітря, сонячного випромінювання, тощо) в електричну енергію. Основним елементом більшості електростанцій є *генератор*, який перетворює механічну енергію обертового валу в електричну енергію.

Відповідно до джерел первинної енергії електростанції класифікуються наступним чином:

1. *Теплові електростанції*, на яких енергія пального, що спалюється в котлі, (твердого, рідкого, газоподібного) перетворюється в пару, яка обертає турбіну генератора, механічна енергія якої перетворюється в генераторі в електричну енергію (к.к.д. становить близько 25 %). У *теплоелектроцентралі* поєднані процеси вироблення теплової та електричної енергії, вони використовуються для тепло та електропостачання (к.к.д. досягає 70 %).

2. *Атомні електростанції*, на яких енергія, що виділяється при ланцюговій реакції розпаду ядер урану в реакторі, перетворюється в пару і далі процес відбувається аналогічно тепловим електростанціям.

3. *Гідроелектростанції*, на яких енергія потоку води перетворюється в механічну енергію обертання турбіни генератора, яка у генераторі перет-

ворюється в електричну енергію (к.к.д. досягає 90 %). Для отримання напору води на рівнинних ріках створюють греблі, на гірських ріках використовують природний ухил, у прибережних до моря територіях використовують припливи та відливи.

4. *Дизельні електростанції*, на яких енергія дизельного пального, що згоряє в циліндрах двигуна, перетворюється в механічну енергію на його валу. У генераторі, який знаходиться на тому ж валу, механічна енергія перетворюється в електричну енергію (к.к.д. становить близько 35 %).

5. *Вітрові електростанції*, на яких енергія вітрового потоку перетворюється за допомогою вітроколеса в механічну енергію обертання валу генератора, яка у генераторі перетворюється в електричну енергію.

6. *Сонячні електростанції*, на яких енергія, випромінювана Сонцем, перетворюється у фотоелементах в електричну енергію. На 1 км² поверхні Землі припадає середня потужність випромінювання Сонця, яка дорівнює 170 МВт.

Також в електричну енергію перетворюють енергію термальних вод Землі, переробляють відходи життєдіяльності тварин у біогазових установках.

Трансформаторна підстанція – це електроустановка, призначена для прийому електричної енергії однієї напруги, перетворення її в електричну енергію іншої напруги та розподілення цієї електроенергії між споживачами. Основними елементами трансформаторної підстанції є *силовий трансформатор* (один або два) та *розподільчі пристрої*. Силовий трансформатор перетворює електроенергію однієї напруги в електроенергію іншої напруги, високовольтний розподільчий пристрій приймає електричну енергію з мережі і передає її силовому трансформатору на перетворення, низьковольтний розподільчий пристрій приймає перетворену трансформатором електроенергію та розподіляє її між споживачами. Розподільчі пристрої містять у своєму складі комутаційну та захисну апаратуру, електровимірювальні прилади та інше обладнання.

Трансформаторні підстанції поділяються на підвищувальні та понижувальні. Розподільчі пристрої поділяються на відкриті, які встановлюються на відкритому повітрі, та закриті, які встановлюються у будівлях. Розподільчі пристрої можуть використовуватись окремо від трансформаторних підстанцій, розподіляючи електроенергію без її трансформації між окремими споживачами, такі розподільчі пристрої називають лінійними.

Лінія електропередачі – це споруда, яка складається з проводів та допоміжних пристроїв, призначених для передачі електричної енергії від електростанцій до трансформаторних підстанцій та споживачів. Розподіляються на *повітряні*, у яких проводи укріплюються на спеціальних опорах за допомогою ізоляторів, та *кабельні*, які прокладаються у спеціальних закритих спорудах (тунелях, каналах, шахтах, тощо).

Передача електроенергії здійснюється на великі відстані (сотні кілометрів), тому в лініях електропередачі виникають значні втрати потужності в результаті теплової дії струму, який у них протікає. В одному проводі лінії електропередачі втрати потужності дорівнюють:

$$\Delta P_{\text{л}} = r_{\text{л}} \cdot I^2, \quad (8.22)$$

де $\Delta P_{\text{л}}$ – втрати потужності в одному проводі лінії електропередачі, *Вт*;
 $r_{\text{л}}$ – активний опір одного проводу лінії електропередачі, *Ом*;
 I – діюче значення сили струму, який протікає в одному проводі лінії електропередачі, *А*.
 Активний опір проводу лінії дорівнює:

$$r_{\text{л}} = \rho \frac{l}{S}, \quad (8.23)$$

де ρ – питомий опір матеріалу, з якого виготовлений провід лінії, *Ом·мм²/м (Ом·м)*;
 l – довжина проводу лінії, *м*;
 S – площа поперечного перерізу проводу лінії, *мм² (м²)*.
 Діюче значення сили струму, який протікає в одному проводі лінії електропередачі (при $\cos \varphi = 1$), дорівнює:

$$I = \frac{P}{U}, \quad (8.24)$$

де P – активна потужність однієї фази еквівалентного споживача, *Вт*;
 U – діюче значення фазної напруги еквівалентного споживача, *В*.
 Підставивши (8.23) і (8.24) у (8.22), одержимо:

$$\Delta P_{\text{л}} = \rho \frac{l}{S} \cdot \frac{P^2}{U^2}. \quad (8.25)$$

З виразу (8.25) випливає, що **знижити втрати потужності в про-
 водах лінії електропередачі можна трьома способами:**

- 1) використанням проводів, виготовлених з матеріалу з низьким питомим опором (алюміній, мідь);
- 2) використанням проводів більшого перерізу;
- 3) збільшенням напруги, на якій передається електрична енергія.

Найбільш енергоефективним є третій спосіб, який призводить до значного зниження втрат потужності, тому що вони обернено пропорційні квадрату напруги, на якій передається електрична енергія.

Приклад 8.8

Сільський населений пункт одержує живлення по лінії електропередачі напругою **220 В**. У результаті модернізації лінії електропередачі (при незмінності матеріалу і довжини лінії, а також потужності, що передається) вона стала передавати електроенергію на напрузі **380 В**.

Визначити у скільки разів знизилися втрати активної потужності в лінії.

Розв'язок.

1. Визначаємо у скільки разів знизилися втрати активної потужності в лінії на підставі (8.25):

$$\frac{\Delta P_{л2}}{\Delta P_{л1}} = \left(\frac{U_2}{U_1} \right)^2 = \left(\frac{380}{220} \right)^2 = 3 \text{ рази.}$$

Отже, чим більше відстань, на яку передається електроенергія, тим вище повинна бути напруга, на якій вона передається. Тому поблизу електростанцій розташовується підвищувальна високовольтна трансформаторна підстанція, на якій напруга може підніматися до 110 кВ, 220 кВ, 330 кВ, 500 кВ, 750 кВ, 1500 кВ. Після цього електроенергія передається високовольтною лінією електропередачі на зазначених напругах до трансформаторних підстанцій, на яких напруга знижується до 35 кВ, після чого електроенергія передається до районних трансформаторних підстанцій, де напруга знижується до 10 кВ. Від районних трансформаторних підстанцій електроенергія передається до споживчих трансформаторних підстанцій, на яких напруга знижується до 0,4 кВ, після чого електроенергія низьковольтною лінією електропередачі надходить до споживачів.

Однолінійна схема трифазної енергосистеми у складі: генератор G – підвищувальна трансформаторна підстанція ТП1 – лінія електропередачі 330 кВ – понижувальна трансформаторна підстанція ТП2 – лінія електропередачі 35 кВ – районна трансформаторна підстанція ТП3 – лінія електропередачі 10 кВ – споживча трансформаторна підстанція ТП4 – лінія електропередачі 0,4 кВ – споживачі електричної енергії (електродвигун М, електронагрівальна установка ЕК, електроосвітлювальна установка ЕЛ), представлена на рис.8.19.

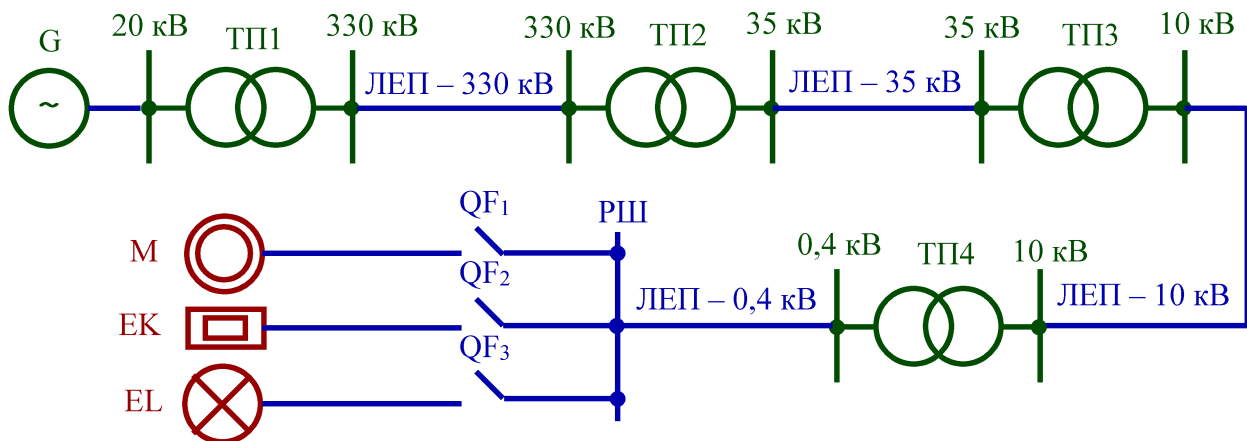


Рисунок 8.19 – Однолінійна схема трифазної енергосистеми

Для з'єднання внутрішньої проводки у будівлі з зовнішньою повітряною лінією електропередачі використовують повітряний ввід (рис.8.20), який являє собою відгалуження від лінії електропередачі низької напруги. Він виконується голим (неізолюваним) проводом і підходить до стіни, де закріплюється за допомогою ізоляторів. Від повітряного вводу крізь стіну усередину приміщення прокладається ввід з ізолюваного проводу. У середині приміщення в місці уведення встановлюють розподільчу шафу, до якої підключають внутрішню електропроводку. Ця шафа містить комутаційну та захисну апаратуру, лічильники електроенергії та інше.

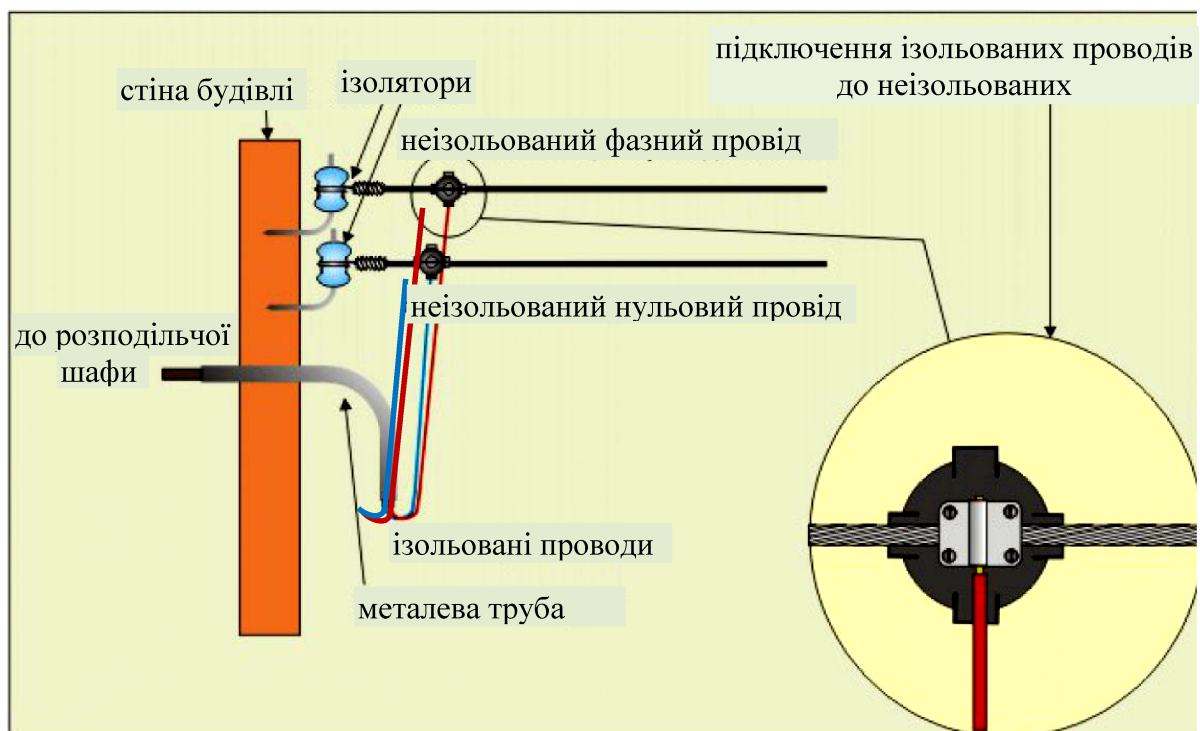


Рисунок 8.20 – Конструктивна схема повітряного вводу

Усередині приміщень електрична проводка виконується ізолюваними проводами в закритому вигляді (під штукатуркою, у спеціальних трубах та інше). Перерізи проводів вибираються з умови допустимого нагрівання робочим струмом.

Запитання для самоконтролю

1. Що розуміється під трифазною енергетичною системою?
2. Перелічіть складові частини трифазної енергетичної системи.
3. Що розуміється під електростанцією?
4. Що є основним елементом більшості електростанцій, яке його призначення?
5. Перелічіть типи електростанцій, указавши види енергії, які вони перетворюють.
6. Що розуміється під трансформаторною підстанцією?

7. Що є основними елементами трансформаторної підстанції, яке їх призначення?
8. Як поділяються трансформаторні підстанції?
9. Що розуміється під лінією електропередачі?
10. Як поділяються лінії електропередачі? Охарактеризуйте їх.
11. Чому в лініях електропередачі виникають втрати потужності? Як їх визначити?
12. Від чого залежать втрати потужності в лінії електропередачі?
13. Які існують способи зниження втрат потужності в лінії електропередачі? Який з них найбільш енергоефективний?
14. Яке призначення підвищувальних трансформаторних підстанцій?
15. Яке призначення понижувальних трансформаторних підстанцій?
16. Наведіть приклад однолінійної схеми трифазної енергосистеми в складі:
генератор – ТП 20/330 кВ – лінія електропередачі 330 кВ – ТП 330/35 кВ –
лінія електропередачі 35 кВ – ТП 35/10 кВ – лінія електропередачі 10 кВ –
ТП 10/0,4 кВ – лінія 0,4 кВ – споживач електричної енергії, опишіть її роботу.
17. Як виконати ввід електроенергії у будівлю?
18. Як виконують проводку усередині будівлі?

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Овчаров В. В. Загальна електротехніка: Навчальний посібник для студентів вищ.навч.закл., які навчаються за напрямом підготовки «Процеси, машини та обладнання агропромислового виробництва» / В. В. Овчаров, О. Ю. Вовк. – Мелітополь : Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2018. – 310 с.
2. Общая электротехника: Учебное пособие для вузов / Под общ. ред. д.т.н. А. Т. Блажкина. – Л. : Энергоатомиздат, 1986. – 592 с.
3. Общая электротехника: Учебное пособие для вузов / Под ред. В. С. Пантюшина. – М. : Высшая школа, 1970. – 568 с.
4. Паначевний Б. І. Загальна електротехніка: теорія і практикум: Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів / Б. І. Паначевний, Ю. Ф. Свергун. – Київ : Каравела, 2009. – 296 с.
5. Мілих В. І. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка: Підручник / В. І. Мілих, О. О. Шавьолкін. – К. : Каравела, 2008. – 688 с.
6. Малиновський С. М. Загальна електротехніка: Навчальний посібник / С. М. Малиновський. – Львів : Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2001. – 596 с.
7. Будіщев М. С. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка: Підручник для студентів вищих навчальних закладів / М. С. Будіщев. – Львів : Афіша, 2001. – 424 с.
8. Матвієнко М. П. Основи електротехніки: Підручник / М. П. Матвієнко. – К. : Видавництво Ліра-К, 2017. – 228 с.
9. Домініков М. М. Електротехніка: Навчальний посібник / М. М. Домініков. – Чернівці : Рута, 2008. – 168 с.
10. Кузнецов А. В. Элементарная электротехника / А. В. Кузнецов. – М. : ДМК Пресс, 2014. – 896 с.

Навчальне видання

Вовк Олександр Юрійович

Електротехніка

Навчальний посібник

Формат 60x84

Папір офсет. Друк офсет.

Ум. друк. арк. 12,7

Наклад 100 прим.

Видавництво та друк: видавничо-поліграфічний центр «Люкс»