

В.В. Овчаров, О.Ю. Вовк

ЗАГАЛЬНА ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

В.В. Овчаров, О.Ю. Вовк

ЗАГАЛЬНА ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

Рекомендовано Міністерством освіти, науки,
молоді і спорту України
як навчальний посібник
для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються
за напрямом підготовки «Процеси, машини та обладнання
агропромислового виробництва»

2018

УДК 621.3(075)

О-35

Гриф надано Міністерством освіти, науки,
молоді і спорту України
лист № 1/11 від 18.06.2012 р.

Рецензенти: **О.Д.Черенков**, доктор технічних наук, професор кафедри теоретичних основ електротехніки Харківського державного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка.

Г.Б.Іноземцев, доктор технічних наук, професор кафедри електропостачання інституту енергетики та автоматики Національного університету біоресурсів і природокористування.

Л.Є.Никифорова, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри електротехнологій агропромислового комплексу Таврійського державного агротехнологічного університету.

Овчаров В.В.

О-32 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.

ISBN

У посібнику на базі основних фізичних понять і положень розглядаються електричні та магнітні кола, а також електротехнічні та електронні пристрої. Посібник містить теоретичний матеріал та завдання на інформаційно-репродуктивному, практично-стереотипному і логічно-понятійному рівнях.

Для студентів вищих навчальних закладів II – IV рівнів акредитації.

© Овчаров В.В.

© Вовк О.Ю.

ЗМІСТ

Вступ	6
Тема 1	
ЛІНІЙНІ НЕРОЗГАЛУЖЕНІ ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	7
1.1 Явище електризації тіл і закон збереження заряду	7
1.2 Явище взаємодії заряджених тіл і закон Кулона	8
1.3 Явище електричного струму і закон Ома	12
1.4 Явище теплової дії електричного струму і закон Ленца – Джоуля	15
1.5 Електричне коло і його елементи	17
1.6 Принципова електрична схема кола	18
1.7 Розрахункова схема електричного кола	19
1.8 Розрахунок нерозгалуженого електричного кола	19
1.9 Закон Ома для замкненого електричного кола з декількома електрорушійними силами	23
1.10 Узагальнений закон Ома	25
1.11 Баланс потужностей	26
1.12 Лінія електропередачі	27
Тематичне комплексне кваліфікаційне завдання	29
Експериментальне дослідження	34
Тема 2	
ЛІНІЙНІ РОЗГАЛУЖЕНІ ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	40
2.1 Закони Кірхгофа	40
2.2 Застосування законів Кірхгофа для розрахунку розгалужених кіл	41
2.3 Еквівалентні перетворення схем з'єднань опорів	43
Тематичне комплексне кваліфікаційне завдання	47
Експериментальне дослідження	50
Тема 3	
НЕРОЗГАЛУЖЕНІ ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ЗМІННОГО СИНУСОЇДНОГО СТРУМУ	55
3.1 Основні фізичні поняття	55
3.2 Коло змінного синусоїдного струму з резистором	62
3.3 Коло змінного синусоїдного струму з ідеальною котушкою	66
3.4 Коло змінного синусоїдного струму з ідеальним конденсатором	71
3.5 Реальна котушка в колі змінного синусоїдного струму	75
3.6 Коло змінного синусоїдного струму з резистором і конденсатором	80
3.7 Коло змінного синусоїдного струму з послідовно з'єднаними катушкою і конденсатором	85
3.8 Резонанс напруг	91

3.9 Загальний випадок кола змінного синусоїдного струму	94
3.10 Лінія електропередачі	96
Тематичне комплексне кваліфікаційне завдання	100
Експериментальні дослідження	111
Тема 4	
СИМЕТРИЧНІ НЕРОЗГАЛУЖЕНІ ТРИФАЗНІ КОЛА СИНУСОЇДНОГО СТРУМУ	134
4.1 Трифазний генератор	134
4.2 Трифазні системи	136
4.3 З'єднання фаз генератора зіркою	139
4.4 З'єднання фаз навантаження трикутником	142
4.5 Потужності трифазного кола	144
4.6 Розрахунок нерозгалужених трифазних кіл синусоїдного струму	145
4.7 Переключення навантаження із зірки на трикутник	150
Тематичне комплексне кваліфікаційне завдання	152
Експериментальні дослідження	154
ТЕМА 5	
МАГНІТНІ КОЛА ПРИ ПОСТІЙНИХ НАМАГНІЧУЮЧИХ СИЛАХ	165
5.1 Явище і закон електромагнетизму	165
5.2 Магнітне коло та його конструктивна схема	169
5.3 Крива намагнічування	169
5.4 Петля гістерезису	171
5.5 Електромагніти та їх розрахунок	172
Тематичне комплексне кваліфікаційне завдання	173
Експериментальне дослідження	175
Тема 6	
ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	178
6.1 Будова та принцип дії машинного генератора	178
6.2 Фізичні явища і процеси в елементах конструкції генератора	181
6.3 Енергетична діаграма генератора	182
6.4 Розрахункова схема генератора	185
6.5 Зовнішня характеристика генератора	185
6.6 Регулювання напруги генератора	187
6.7 Принципова електрична схема керування генератором	187
6.8 Явище електромагнітної сили та закон Ампера	191
6.9 Будова та принцип дії електродвигуна	192
6.10 Фізичні явища і процеси в елементах конструкції двигуна	192
6.11 Енергетична діаграма двигуна	193
6.12 Розрахункова схема двигуна	195
6.13 Швидкісна характеристика двигуна	195
6.14 Регулювання швидкості двигуна	197
6.15 Принципова електрична схема керування двигуном	197

Тематичне комплексне кваліфікаційне завдання	202
Експериментальні дослідження	209
Тема 7	
ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ ЗМІННОГО СТРУМУ	220
7.1 Трифазний асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором	220
7.2 Однофазні двигуни змінного струму	238
7.3 Трифазний асинхронний електродвигун з фазним ротором	240
7.4 Трифазний синхронний двигун	242
Тематичне комплексне кваліфікаційне завдання	244
Експериментальне дослідження	246
Тема 8	
ТРАНСФОРМАТОРИ. ОСНОВИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ	249
8.1 Однофазний трансформатор	249
8.2 Трифазний силовий трансформатор	256
8.3 Вимірювальний трансформатор напруги	257
8.4 Вимірювальний трансформатор струму	259
8.5 Автотрансформатор	261
8.6 Зварювальний трансформатор	263
8.7 Основи електропостачання	265
Тематичне комплексне кваліфікаційне завдання	270
Експериментальне дослідження	272
Тема 9	
ЕЛЕКТРОВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ. ТЕХНІКА ЕЛЕКТРИЧНИХ ВИМІРЮВАНЬ	275
9.1 Загальні відомості про електровимірювальні прилади	275
9.2 Класифікація електровимірювальних приладів	277
9.3 Будови та принципи дії електровимірювальних приладів різних систем	278
9.4 Вимірювання сили струму, напруги, активної потужності, коефіцієнта потужності	281
9.5 Вимірювання електричної енергії	285
9.6 Вимірювання опорів	287
Тематичне комплексне кваліфікаційне завдання	290
Експериментальне дослідження	292
Тема 10	
ОСНОВИ ЕЛЕКТРОНІКИ	297
10.1 Електронно-дірковий перехід	297
10.2 Напівпровідниковий діод	300
10.3 Випрямлення змінного струму	302
10.4 Тиристор	304
10.5 Транзистор, підсилення електричного сигналу	305
Експериментальне дослідження	308
Список літератури	310

ВСТУП

Загальна електротехніка є фундаментальною дисципліною, на базі якої вивчаються всі інші електротехнічні дисципліни навчального плану спеціальності.

У свою чергу, загальна електротехніка базується на фізиці та вищій математиці.

Особливе значення 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 підручнику наведені основні знання цих явищ та законів.

Підручник написаний таким чином, щоб студенти мали можливість самостійно вивчати курс загальної 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. З кожної теми наведено тематичне комплексне кваліфікаційне завдання та завдання для експериментального дослідження.

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

Тема 1

ЛІНІЙНІ НЕРОЗГАЛУЖЕНІ ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

1.1 Явище електризації тіл і закон збереження заряду

Явище електризації тіл. 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 заряджено позитивно, воно складається з протонів (мають позитивний заряд) і нейтронів (не мають заряду). Електрони заряджені негативно 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 щільному зіткненні двох тіл (відстань між тілами приблизно дорівнює відстані між атомами або молекулами тіла) електрони, що входять до складу атомів одного тіла, можуть переходити до атомів іншого тіла внаслідок того, що енергія зв'язку їх з ядром в атомах різних хімічних елементів може бути неоднаковою. У результаті одне тіло втрачає деяку кількість електронів і заряджається позитивно, а інше тіло одержує ці електрони і заряджається негативно. 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.

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

Математичний запис закону виглядає так:

$$q_1 + q_2 + \dots + q_n = \text{const}, \quad (1.1)$$

де q_1, q_2, \dots, q_n – заряди, 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.

Рішення.

До взаємодії закон збереження 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 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 з зарядом (рис.1.2), що дорівнює сумі елементарних зарядів цього тіла (за аналогією з матеріальною точкою в механіці).

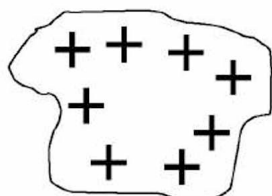


Рис.1.1

$$+ \bullet q = \sum_1^n q_i$$

Рис.1.2

Запитання для самоконтролю

1. У чому суть явища електризації тіл?
2. Сформулюйте закон збереження заряду.
3. Виконайте математичний запис закону збереження заряду.
4. 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).

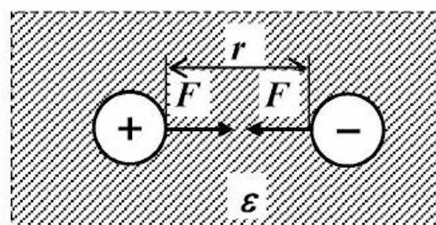
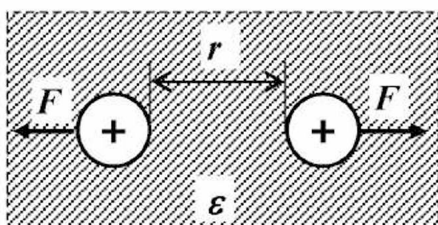


Рис.1.3

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, і він має його ім'я. Формулюється він так: **два нерухомих точкових електричних заряди взаємодіють із силою прямо пропорційною добутку цих зарядів і обернено пропорційною квадрату відстані між ними і діелектричній проникності середовища.**

Математичний запис закону Кулона:

$$F = \frac{q_1 \cdot q_2}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot r^2}, \quad (1.2)$$

де F – сила взаємодії між точковими зарядами, H ;
 q_1, q_2 – точкові заряди, $Кл$;
 r – відстань між точковими зарядами, $м$;
 ϵ_0 – електрична постійна, $Ф/м$;
 ϵ – відносна діелектрична проникність середовища, у якому знаходяться заряди.

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

Електрична постійна $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$.

Приклад 1.2

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

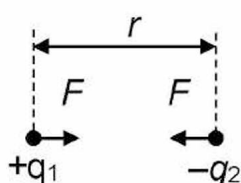


Рис.1.3а

Рішення.

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

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

Електричне поле зарядженого тіла діє на електричні заряди, поміщені в будь-яку його точку, з визначеною силою. Уведемо поняття **пробного заряду**, під яким будемо розуміти **позитивний заряд малої величини $q_{пр}$** . Помістимо його в поле позитивного заряду q (рис.1.4). На пробний заряд буде діяти сила F .



Рис.1.4

Для силової характеристики електричного поля введено поняття **напруженості** 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**

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

де E – напруженість, В/м ;
 F – сила, Н ;
 $q_{\text{пр}}$ – пробний заряд, Кл .

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

Приклад 1.3

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

Рішення.

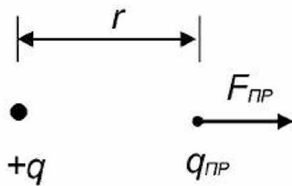


Рис.1.4а

Підставивши в (1.3) значення сили за виразом (1.2), знаходимо розрахункову формулу напруженості:

$$E = \frac{q}{4\pi \cdot \epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot r^2}. \quad (1.3a)$$

Підставивши значення фізичних величин, одержуємо:

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

Пробний заряд, поміщений у дану точку поля, має потенціальну енергію (за аналогією з матеріальним тілом, піднятим над землею, на яке діє сила тяжіння). Для енергетичної характеристики електричного поля введено поняття **потенціалу** електричного поля в даній його точці, під яким розуміється **фізична величина, яка чисельно дорівнює відношенню потенціальної енергії, якою володіє пробний заряд, поміщений у дану точку поля, до значення цього заряду, тобто**

$$\varphi = \frac{\Pi}{q_{\text{пр}}}, \quad (1.4)$$

де φ – потенціал, В ;
 Π – потенціальна енергія, Дж ;
 $q_{\text{пр}}$ – 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 $q = +4\pi \cdot 8,85 \cdot 10^{-11}$ Кл знаходиться в середовищі, відносна діелектрична проникність якого дорівнює $\epsilon = 10$. Визначити потенціал точки електричного поля, яка знаходиться на відстані **0,01 м** від заряду.

Рішення.

Потенціал точки електричного поля визначається за виразом (1.4). Потенціальну енергію пробного заряду, внесеного в дану точку поля, знаходимо за виразом:

$$P_{пр} = F_{пр} r, \quad (1.4a)$$

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

Силу, що діє на пробний заряд, знаходимо за виразом (1.2).

Підставивши в (1.4) вирази (1.4a) і (1.2), знаходимо розрахункову формулу потенціалу в даній точці:

$$\varphi = \frac{q}{4\pi \cdot \epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot r}. \quad (1.4б)$$

Підставляємо чисельні значення фізичних величин у (1.4б) і знаходимо потенціал:

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

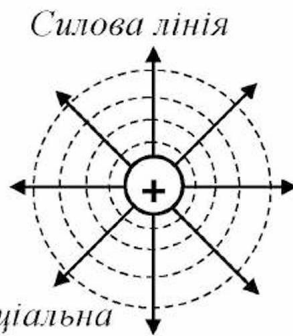


Рис.1.5

Електричне поле заряду можна зобразити графічно за допомогою силових і еквіпотенціальних ліній. **Силові лінії електричного поля** – це траєкторія руху вільного пробного заряду у цьому полі. **Еквіпотенціальна лінія** – це лінія, що з'єднує точки електричного поля з однаковими потенціалами. Представимо на площині електричне поле позитивного точкового заряду (рис.1.5).

Для енергетичної характеристики електричного поля введено також поняття **напруги** електричного поля, під якою розуміється **різниця потенціалів**, тобто

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2, \quad (1.5)$$

де φ_1, φ_2 – потенціали точок 1 і 2 електричного поля, В;
 U_{12} – напруга між точками електричного поля, В.

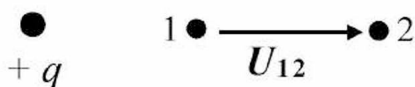


Рис.1.6

Графічно напруга електричного поля зображується стрілкою, спрямованою від більшого потенціалу до меншого потенціалу (рис.1.6).

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. Дайте визначення пробного заряду.
8. Дайте визначення напруженості електричного поля.
9. Дайте визначення потенціалу електричного поля.
10. Що таке силова лінія електричного поля?
11. Що таке еквіпотенціальна лінія електричного поля?
12. Як графічно зображується електричне поле?
13. Дайте визначення напруги електричного поля.

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 $0,1 \text{ м}$. 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 відотною діелектричною проникністю $\epsilon = 10$. Визначити напруженість електричного поля на відстані $0,01 \text{ м}$ від заряду.
3. Визначити потенціал у точці поля, зазначеної в завданні 2.
4. Зобразити силові лінії негативного заряду.
5. Зобразити еквіпотенціальні лінії негативного заряду.
6. Потенціали точок 1 і 2 електричні поля відповідно дорівнюють 20 В та 10 В . Визначити напругу електричного поля між зазначеними точками.

1.3 Явище електричного струму і закон Ома

Явище електричного струму. У природі є тіла, які мають вільні заряди (у металах – електрони, в електролітах – іони, у газах – електрони й іони); такі тіла називаються **провідниками**.

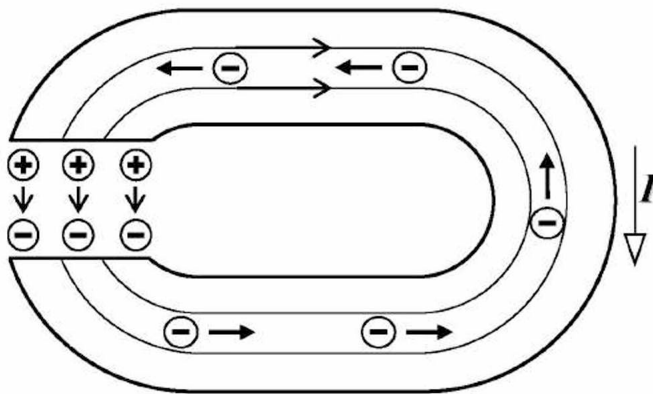


Рис.1.7

Якщо до кінців провідника (рис.1.7) підвести заряди різного знаку, то в провіднику виникне електричне поле, створене цими зарядами.

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

Негативні заряди, що прийшли до позитивно зарядженого полюсу провідника, згодом нейтралізують позитивні заряди й електричний струм припиниться. Щоб цього не відбулося, сторонні сили джерела електричної енергії постійно переносять негативні заряди, які прийшли до позитивно зарядженого полюсу, на негативно заряджений полюс, виконуючи роботу.

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

$$E = \frac{A}{q}, \quad (1.6)$$

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** заряду негативного знаку на негативний полюс, виконуючи при цьому роботу, величина якої дорівнює **2 000 Дж**. Визначити значення електрорушійної сили, яку розвиває джерело електричної енергії.

Рішення.

Підставляємо значення зазначених фізичних величин у вираз (1.6) і знаходимо значення е.р.с.:

$$E = \frac{2\,000}{10} = 200\, В.$$

Заряд, що проходить через поперечний переріз провідника за одиницю часу, назвали силою електричного струму, тобто

$$I = \frac{q}{t}, \quad (1.7)$$

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

$$[I] = \frac{Кл}{с} = \frac{А \cdot с}{с} = А.$$

Графічно електричний струм зображується стрілкою, спрямованою протилежно руху електронів: \overrightarrow{I} .

Приклад 1.6

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

Рішення.

Підставляємо значення зазначених фізичних величин у вираз (1.7) і знаходимо силу електричного струму:

$$I = \frac{100}{5} = 20 \text{ А.}$$

При русі вільних зарядів по провіднику вони зіштовхуються з молекулами (атомами) і одержують опір своєму руху. Для характеристики цього факту введено поняття **опору провідника електричному струму**; він залежить від матеріалу провідника, довжини провідника і площі поперечного перерізу провідника, тобто

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (1.8)$$

- де R – опір провідника, Ом;
 ρ – питомий опір провідника, Ом · мм² / м (Ом · м);
 l – довжина провідника, м;
 S – площа поперечного перерізу провідника, мм².

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

Приклад 1.7

Алюмінієвий провідник з питомим опором $\rho = 0,023 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{м}$ має довжину $l = 1 \text{ 000 м}$, площа поперечного перерізу $S = 2,3 \text{ мм}^2$. Визначити опір провідника.

Рішення.

Підставляємо значення зазначених величин у вираз (1.8) і знаходимо опір провідника:

$$R = 0,023 \cdot \frac{1 \text{ 000}}{2,3} = 10 \text{ Ом}.$$

Закон електричного струму. Німецький фізик *Георг Ом* відкрив закон електричного струму. Відповідно до цього закону **сила струму в провіднику прямо пропорційна напрузі (різниці потенціалів) на затискачах провідника і обернено пропорційна опору провідника.**

Математичний запис закону Ома:

$$I = \frac{U}{R}, \quad (1.9)$$

- де I – сила струму в провіднику, А;
 U – напруга на затискачах провідника, В;
 R – опір провідника, Ом.

$$[I] = \frac{B}{\text{Ом}} = A.$$

Приклад 1.8

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

Рішення.

Підставляємо вказані значення фізичних величин у вираз (1.9) і знаходимо силу струму в провіднику:

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

Запитання для самоконтролю

1. У чому суть явища електричного струму?
2. Дайте визначення електрорушійної сили.
3. Дайте визначення сили електричного струму.
4. Як розрахувати опір провідника електричному струму?
5. Сформулюйте закон Ома для ділянки кола.
6. Виконайте математичний запис закону Ома для ділянки кола.

Завдання для самоконтролю

1. Сторонні сили джерела переносять заряд величиною **200 Кл** проти сил електричного поля. При цьому виконується робота, яка дорівнює **44 000 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 **1 000 м** і площу поперечного перерізу **1,7 мм²**. Визначити опір провідника.

1.4 Явище теплової дії електричного струму і закон Ленца – Джоуля

Явище теплової дії електричного струму. При зіткненні зарядів з молекулами (атомами) вони 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 російський фізик *Емілій Ленц* та англійський фізик *Джеймс Джоуль*. Відповідно до цього закону **кількість тепла, яка виділяється в провіднику, прямо пропорційна опору провідника, квадрату сили електричного струму і часу його дії.**

Математичний запис закону теплової дії струму:

$$W = RI^2t, \quad (1.10)$$

де W – енергія, 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 тепла, яка виділиться в провіднику за цей час.

Рішення.

Підставляємо значення фізичних величин у вираз (1.10) і знаходимо кількість тепла:

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

Для зручності енергетичної характеристики джерел і приймачів електричної енергії ввели поняття **потужності електричного струму**, під якою розуміється **кількість електричної енергії, яка виділяється в провіднику за одиницю часу**, тобто

$$P = \frac{W}{t}, \quad (1.11)$$

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

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

Підставивши (1.10) у (1.11), знаходимо вираз для розрахунку потужності:

$$P = RI^2. \quad (1.12)$$

У технічній системі одиниць електрична енергія вимірюється в $\text{кВт} \cdot \text{год}$, знайдемо співвідношення енергій $1 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ та 1 Дж :

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

Приклад 1.10

У провіднику, по якому проходить електричний струм, за **100 секунд** виділяється **220 000 Дж** теплової енергії. Визначити потужність електричного струму.

Рішення.

Підставляємо значення зазначених фізичних величин у вираз (1.11) і знаходимо потужність електричного струму:

$$P = \frac{220\,000}{100} = 2\,200 \text{ Вт} = 2,2 \text{ кВт}.$$

Запитання для самоконтролю

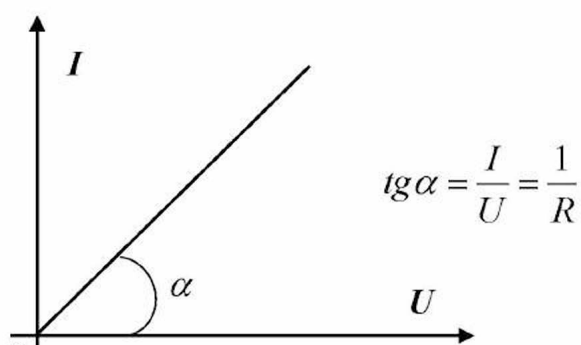
1. У чому суть явища теплової дії струму?
2. Сформулюйте закон теплової дії струму.
3. Виконайте математичний запис закону Ленца – Джоуля.
4. Дайте визначення потужності електричного струму.
5. Вкажіть одиниці фізичних величин, що характеризують явище теплової дії струму.

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.

1.5 Електричне коло і його елементи

Електричне коло – це сукупність пристроїв, що забезпечують можливість створення електричного струму. **Основні елементи електричного кола** – джерело, приймач і проводи, що їх з'єднують. **Джерело електричної енергії** – це пристрій, у якому енергія хімічна, тепла, промениста або механічна перетворюється в електричну енергію. У залежності від виду перетворюваної енергії розрізняють наступні типи джерел: механічні генератори, акумулятори, гальванічні елементи, термоелементи, фотоелементи. **Допоміжні елементи кола** – вимикачі, рубильники, амперметри, вольтметри і так далі.



Залежність між силою струму і напругою на елементі кола називається **вольт-амперною характеристикою**: $I = f(U)$. Математично вона записується, виходячи з закону Ома (1.9): $I = U / R$. Представимо цю залежність графічно (рис.1.8).

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

Приклад 1.11

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

Рішення.

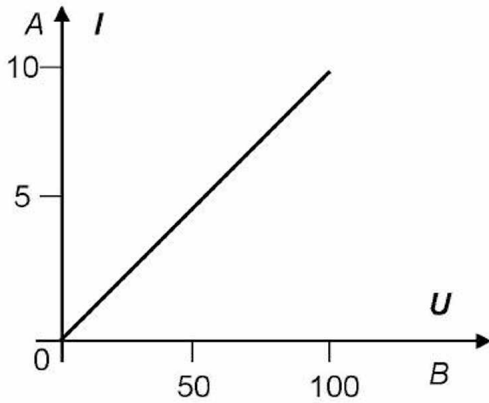


Рис.1.8а

Розрахунок вольт-амперної характеристики ведемо за виразом (1.9) для двох точок: $U = 0, I = 0$ і $U = 100 \text{ В}, I = 10 \text{ А}$.

За розрахунковими даними двох точок будуюмо вольт-амперну характеристику у вигляді прямої лінії, що проходить через ці точки (рис.1.8а).

Запитання для самоконтролю

1. Дайте визначення електричного кола.
2. Які елементи електричного кола є основними?
3. Які елементи електричного кола є допоміжними?
4. Що таке вольт-амперна характеристика елемента електричного кола?
5. Які елементи електричного кола називаються лінійними?
6. Що таке лінійне електричне коло?

1.6 Принципова електрична схема кола

Принципова електрична схема кола – це графічне і літерне позначення окремих елементів кола, з'єднаних між собою. Приклад такої схеми приведений на рис.1.9.

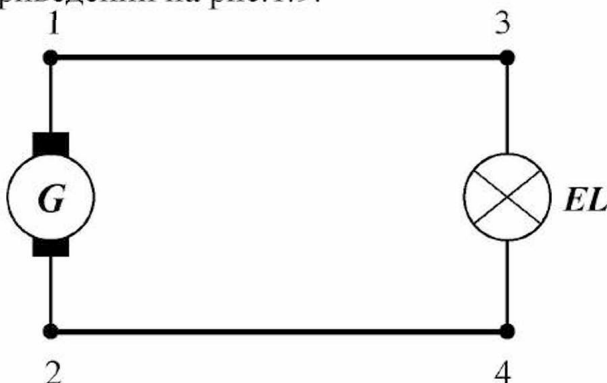


Рис.1.9:

G – генератор;
EL – лампа освітлювальна.

Запитання для самоконтролю

1. Дайте визначення принципової електричної схеми кола.

Закон Ома для замкненого кола з однією е.р.с.: сила струму в колі прямо пропорційна значенню е.р.с. і обернено пропорційна сумарному опору кола, тобто

$$I = \frac{E}{\sum R}, \quad (1.13)$$

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

При аналізі електричних кіл, як правило, цікавлять не потенціали точок схеми, а напруги на визначених ділянках. Тому можна прийняти, що потенціал однієї з точок схеми умовно дорівнює нулю, а потім розрахувати відносні значення потенціалів інших точок. Наприклад, можна прийняти, що потенціал точки 2 дорівнює нулю, тобто $\varphi_2 = 0$.

При записуванні потенціалів інших точок необхідно враховувати наступне:

- якщо е.р.с. спрямована у бік точки, то потенціал цієї точки збільшується на величину цієї е.р.с. відносно точки, від якої спрямована е.р.с. (у даному прикладі $\varphi_5 = \varphi_2 + E$);
- при переході через опір потенціал чергової точки зменшується на величину спадання напруги, тому що заряди в результаті зіткнення з атомами (молекулами) на цій ділянці віддають їм частину своєї потенціальної енергії, яка виділяється у вигляді тепла (наприклад, $\varphi_1 = \varphi_5 - R_B I$);
- електричний струм спрямований від точки з більшим потенціалом до точки з меншим потенціалом.

Приклад 1.12

Для розрахункової схеми, приведеної на рис.1.10, відомо:

$$E = 250 \text{ В}, \quad \varphi_2 = 0, \quad t = 1\,000 \text{ год.}, \quad c_E = 0,2 \text{ грн./}(кВт \cdot \text{год.});$$

$$R_B = 2 \text{ Ом}, \quad R_{\Pi} = 3 \text{ Ом}, \quad R_H = 17 \text{ Ом}, \quad R_3 = 3 \text{ Ом}.$$

Визначити: I ,

$\varphi_5, \varphi_1, \varphi_3, \varphi_4, U_{51}, U_{13}, U_{34}, U_{42}, U_{12},$

$P, P_{12}, P_B, P_{\Pi}, P_H, P_3, \eta_{\Pi}, \eta_{\Gamma}, \eta_{\gamma}, W_H, C_H.$

Рішення.

1. Сила електричного струму в колі:

$$I = \frac{E}{R_B + R_{\Pi} + R_H + R_3} = \frac{250}{2 + 3 + 17 + 3} = 10 \text{ А}.$$

2. Потенціал точки 5:

$$\varphi_5 = \varphi_2 + E = 0 + 250 = 250 \text{ В.}$$

3. Потенціал точки 1:

$$\varphi_1 = \varphi_5 - R_B I = 250 - 2 \cdot 10 = 230 \text{ В.}$$

4. Потенціал точки 3:

$$\varphi_3 = \varphi_1 - R_{\Gamma} I = 230 - 3 \cdot 10 = 200 \text{ В.}$$

5. Потенціал точки 4:

$$\varphi_4 = \varphi_3 - R_H I = 200 - 17 \cdot 10 = 30 \text{ В.}$$

6. Потенціал точки 2:

$$\varphi_2 = \varphi_4 - R_3 I = 30 - 3 \cdot 10 = 0 \text{ В.}$$

7. Напряга на ділянці 5-1:

$$U_{51} = \varphi_5 - \varphi_1 = R_B I = 250 - 230 = 2 \cdot 10 = 20 \text{ В.}$$

8. Напряга на ділянці 1-3:

$$U_{13} = \varphi_1 - \varphi_3 = R_{\Gamma} I = 230 - 200 = 3 \cdot 10 = 30 \text{ В.}$$

9. Напряга на ділянці 3-4:

$$U_{34} = \varphi_3 - \varphi_4 = R_H I = 200 - 30 = 17 \cdot 10 = 170 \text{ В.}$$

10. Напряга на ділянці 4-2:

$$U_{42} = \varphi_4 - \varphi_2 = R_3 I = 30 - 0 = 3 \cdot 10 = 30 \text{ В.}$$

11. Напряга на ділянці 1-2:

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 = E - R_B I = 230 - 0 = 250 - 2 \cdot 10 = 230 \text{ В.}$$

12. Потужність, яку розвиває джерело:

$$P = E I = 250 \cdot 10 = 2\,500 \text{ Вт} = 2,5 \text{ кВт.}$$

13. Потужність, яка втрачається в джерелі:

$$P_B = R_B I^2 = U_{51} \cdot I = 2 \cdot 10^2 = 20 \cdot 10 = 200 \text{ Вт.}$$

14. Потужність, яка віддається джерелом:

$$P_{12} = U_{12} I = P - P_B = 230 \cdot 10 = 2\,500 - 200 = 2\,300 \text{ Вт} = 2,3 \text{ кВт.}$$

15. Потужність, яка втрачається в прямому проводі:

$$P_{\Gamma} = R_{\Gamma} I^2 = U_{13} I = 3 \cdot 10^2 = 30 \cdot 10 = 300 \text{ Вт.}$$

16. Потужність, яка споживається навантаженням:

$$P_H = R_H I^2 = U_H I = 17 \cdot 10^2 = 170 \cdot 10 = 1\,700 \text{ Вт} = 1,7 \text{ кВт.}$$

17. Потужність, яка втрачається в зворотньому проводі:

$$P_3 = R_3 I^2 = U_{42} I = 3 \cdot 10^2 = 30 \cdot 10 = 300 \text{ Вт.}$$

18. Складаємо баланс потужностей:

$$P = P_B + P_{\Pi} + P_H + P_3 ;$$

$$2\,500 = 200 + 300 + 1\,700 + 300.$$

19. К.к.д. лінії електропередачі:

$$\eta_{\Pi} = \frac{P_H}{P_{12}} = \frac{1\,700}{2\,300} \approx 0,74.$$

20. К.к.д. генератора (джерела):

$$\eta_r = \frac{P_{12}}{P} = \frac{2\,300}{2\,500} = 0,92.$$

21. К.к.д. всієї електроустановки:

$$\eta_y = \frac{P_H}{P} = \frac{1\,700}{2\,500} = 0,68.$$

$$\text{або } \eta_y = \eta_{\Pi} \cdot \eta_r = 0,74 \cdot 0,92 = 0,68.$$

22. Енергія, яку споживає навантаження за 1 000 год.:

$$W_H = P_H t = 1,7 \cdot 1\,000 = 1\,700 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

23. Вартість електричної енергії, яку споживає навантаження за 1 000 год.:

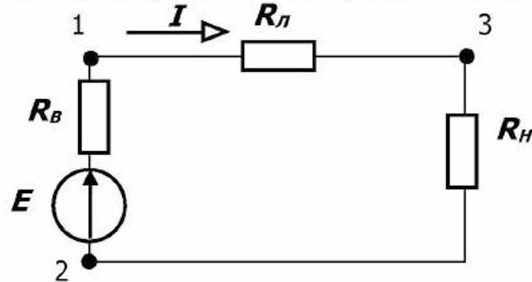
$$C_H = W_H c_E = 1\,700 \cdot 0,2 = 340 \text{ грн}.$$

Запитання для самоконтролю

1. Що таке потенціал точки розрахункової схеми електричного кола?
2. Що таке напруга (спадання напруги) на ділянці кола?
3. Сформулюйте закон Ома для ділянки кола без е.р.с.
4. Сформулюйте закон Ома для замкненого кола з однією е.р.с.
5. Як розрахувати спадання напруги в джерелі?
6. Як розрахувати напругу на затискачах джерела?
7. Як розрахувати спадання напруги в лінії електропередачі?
8. Як розрахувати напругу на навантаженні?
9. Як розрахувати потужність, яку розвиває джерело?
10. Як розрахувати втрати потужності в джерелі?
11. Як розрахувати втрати потужності в лінії електропередачі?
12. Як розрахувати потужність приймача?
13. Як розрахувати к.к.д. лінії електропередачі?
14. Як розрахувати к.к.д. джерела?
15. Як розрахувати к.к.д. електроустановки?
16. Як розрахувати енергію, яку споживає приймач?

Завдання для самоконтролю

На приведеній розрахунковій схемі електричного кола відомо:
 $E = 200 \text{ В}$; $R_B = 1 \text{ Ом}$; $R_L = 3 \text{ Ом}$; $R_H = 16 \text{ Ом}$; $\varphi_2 = 0$.



1. Визначити силу струму в колі.
2. Визначити потенціал точки 1.
3. Визначити напругу на затискачах джерела.
4. Визначити спадання напруги в лінії.
5. Визначити напругу на затискачах навантаження.
6. Визначити потужність навантаження.
7. Визначити кількість енергії, яка втрачається в лінії за *100 секунд*.
8. Визначити потужність, яку розвиває джерело.
9. Визначити потужність, яку віддає джерело в лінію.
10. Визначити к.к.д. джерела.

1.9 Закон Ома для замкненого електричного кола з декількома електрорушійними силами

Розглянемо принципову електричну схему кола зарядки акумулятора (рис.1.11).

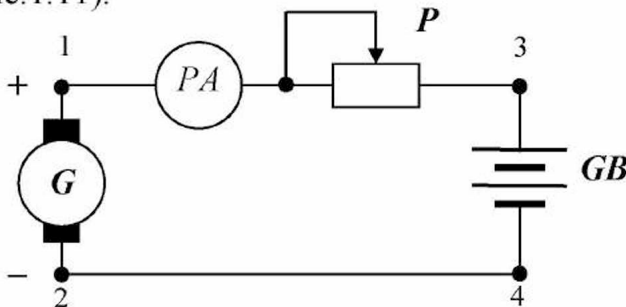


Рис.1.11:

G – генератор;
 GB – акумулятор;
 P – регулюючий реостат;
 PA – амперметр.

Складемо розрахункову схему цього кола (рис.1.12).

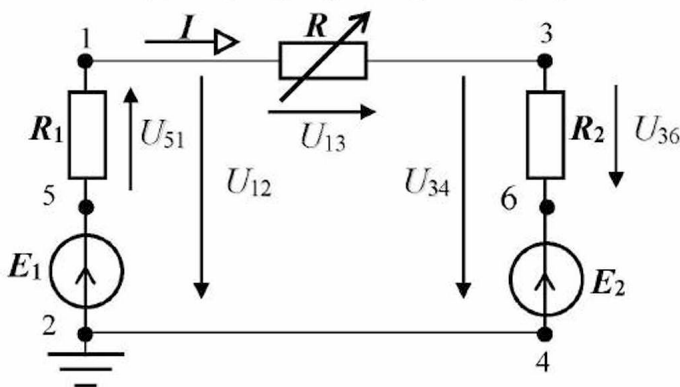


Рис.1.12:

E_1 – е.р.с. генератора;
 R_1 – опір генератора;
 E_2 – е.р.с. акумулятора;
 R_2 – опір акумулятора;
 R – опір регулюючого реостата.

Знайдемо взаємозв'язок між струмом у колі I , е.р.с. E_1 і E_2 та опорами R_1 , R , R_2 . Для цього потенціал точки 2 дорівнюємо до нуля і знайдемо потенціали інших точок:

$$\varphi_5 = \varphi_2 + E_1, \quad (1.14)$$

$$\varphi_1 = \varphi_5 - R_1 I = \varphi_2 + E_1 - R_1 I, \quad (1.15)$$

$$\varphi_3 = \varphi_1 - R I = \varphi_2 + E_1 - R_1 I - R I, \quad (1.16)$$

$$\varphi_6 = \varphi_3 - R_2 I = \varphi_2 + E_1 - R_1 I - R I - R_2 I, \quad (1.17)$$

$$\varphi_4 = \varphi_6 - E_2 = \varphi_2 + E_1 - R_1 I - R I - R_2 I - E_2. \quad (1.18)$$

В останньому виразі $\varphi_2 = 0$ і $\varphi_4 = 0$.

З огляду на це, перепишемо вираз (1.18) у наступному вигляді:

$$E_1 - R_1 I - R I - R_2 I - E_2 = 0. \quad (1.19)$$

Якщо перетворити цей вираз, то знаходимо:

$$I = \frac{E_1 - E_2}{R_1 + R + R_2}. \quad (1.20)$$

В іншому вигляді це можна записати так (**закон Ома для замкненого кола**):

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

де $\sum E$ – алгебраїчна сума е.р.с. у колі, B ;
 $\sum R$ – сума опорів кола (еквівалентний опір кола), Ω .

Алгебраїчна сума е.р.с.:

$$\sum E = E_1 - E_2. \quad (1.22)$$

Зі знаком “+” беруться е.р.с., що збігаються за напрямком з обраним напрямком струму (при розбіжності беруться зі знаком “-”).

Приклад 1.13

Для розрахункової схеми, приведеної на рис. 1.12, відомо:

$E_1 = 24 \text{ В}$, $E_2 = 6 \text{ В}$, $R_1 = 2 \text{ Ом}$, $R_2 = 1 \text{ Ом}$, $R = 3 \text{ Ом}$.

Визначити силу струму в колі.

Рішення.

Силу струму в колі знаходимо за виразом (1.21):

$$I = \frac{E_1 - E_2}{R_1 + R + R_2} = \frac{24 - 6}{2 + 3 + 1} = 3 \text{ А}.$$

1.10 Узагальнений закон Ома

Знайдемо взаємозв'язок між струмом I , напругою U_{34} , опором R_2 і е.р.с. E_2 на ділянці кола між точками 3 і 4 (рис.1.12). Для цього виразимо потенціал точки 4 через потенціал точки 3:

$$\varphi_4 = \varphi_3 - R_2 I - E_2 . \quad (1.23)$$

Перепишемо цей вираз в іншому вигляді:

$$R_2 I = \varphi_3 - \varphi_4 - E_2 , \quad (1.24)$$

з цього знаходимо (враховуючи, що $U_{34} = \varphi_3 - \varphi_4$):

$$I = \frac{U_{34} - E_2}{R_2} . \quad (1.25)$$

У загальному вигляді це може бути записане так (**узагальнений закон Ома для ділянки кола з е.р.с.**):

$$I = \frac{U + \sum E}{\sum R} , \quad (1.26)$$

де U – напруга на ділянці кола, B ;
 $\sum E$ – алгебраїчна сума е.р.с. на ділянці кола, B ;
 $\sum R$ – сума опорів на ділянці кола, Om ;
 I – сила струму на ділянці кола, A .

Приклад 1.14

Задано ділянку кола, розрахункова схема якої приведена на рис.12а.

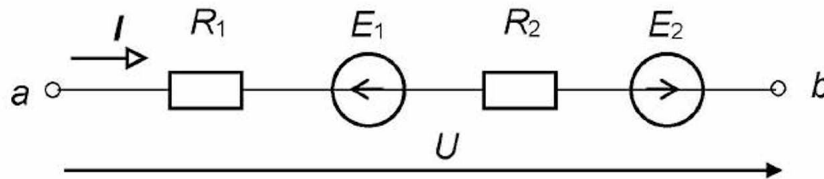


Рис.1.12а

Для зазначеної розрахункової схеми відомо:

$R_1 = 2 \text{ Ом}$, $R_2 = 8 \text{ Ом}$, $E_1 = 17 \text{ В}$, $E_2 = 47 \text{ В}$, $U = 50 \text{ В}$.

Визначити силу струму в колі.

Рішення.

Силу струму в колі визначаємо за виразом (1.26):

$$I = \frac{50 + (-17 + 47)}{2 + 8} = 8 \text{ А} .$$

Запитання для самоконтролю

1. Сформулюйте узагальнений закон Ома.

1.11 Баланс потужностей

В електричному колі діє **закон збереження енергії**, відповідно до якого **енергія нізвідки не береться і нікуди не зникає, а переходить з одного виду в інший**. Джерело виробляє електричну енергію, перетворюючи, наприклад, механічну енергію.

Запишемо потужність (кількість виробленої енергії за одиницю часу) джерела:

$$P = EI, \quad (1.27)$$

де E – е.р.с. джерела, B ;
 I – сила струму, A ;
 P – потужність джерела, Bm .

$$[P] = B \cdot A = Bm .$$

У проводах, резисторах електрична енергія перетворюється в теплову енергію. Втрати потужності в резисторах (проводах):

$$P = RI^2, \quad (1.28)$$

$$\text{або } P = UI, \quad (1.29)$$

де R – опір резистора, Om ;
 I – сила струму в резисторі, A ;
 U – напруга на резисторі, B ;
 P – втрати потужності в резисторі, Bm .

В електричному колі (рис.1.12) перетворення потужності здійснюється в такий спосіб. Генератор розвиває потужність:

$$P_{\Gamma} = E_1 I. \quad (1.30)$$

Ця потужність частково споживається акумулятором і витрачається на його зарядку:

$$P_A = E_2 I, \quad (1.31)$$

частково виділяється в акумуляторі та витрачається на нагрівання акумулятора:

$$P_2 = R_2 I^2, \quad (1.32)$$

частково виділяється в генераторі та витрачається на його нагрівання:

$$P_1 = R_1 I^2, \quad (1.33)$$

частково виділяється в регулюючому реостаті та витрачається на його нагрівання:

$$P = RI^2. \quad (1.34)$$

Складемо **баланс потужностей** – рівняння витрати виробленої джерелом (генератором) потужності:

$$P_{\Gamma} = P_A + P_1 + P + P_2 . \quad (1.35)$$

Перепишемо (1.35) в іншому вигляді:

$$E_1 I = E_2 I + R_1 I^2 + R I^2 + R_2 I^2 , \quad (1.36)$$

або
$$E_1 I - E_2 I = R_1 I^2 + R I^2 + R_2 I^2 . \quad (1.37)$$

Запитання для самоконтролю

1. Як скласти баланс потужностей?

1.12 Лінія електропередачі

Дослідимо режим роботи лінії електропередачі постійного струму, прийнявши наступні умови: генератор ідеальний, усі опори лінії покажемо на розрахунковій схемі в одному місці, опір навантаження будемо змінювати від ∞ до 0. Розрахункова схема цього кола показана на рис.1.13.

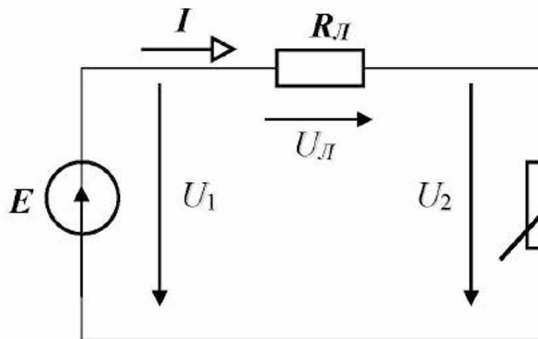


Рис.1.13:

U_1 – напруга на затискачах джерела;

U_2 – напруга на навантаженні;

U_L – спадання напруги в лінії.

Потужність джерела:

$$P_1 = U_1 I ; \quad U_1 = \text{const} . \quad (1.38)$$

Потужність, яка споживається навантаженням:

$$P_H = U_2 I . \quad (1.39)$$

Напруга на затискачах споживача:

$$U_2 = U_1 - R_L I . \quad (1.40)$$

Тоді потужність споживача (навантаження):

$$P_H = U_1 I - R_L I^2 . \quad (1.41)$$

Знайдемо силу струму, за якої потужність споживача буде максимальною. Для цього візьмемо похідну від P_H по I і дорівняємо її до нуля:

$$\frac{dP_H}{dI} = U_1 - 2R_L I = 0, \quad (1.42)$$

звідки
$$I = \frac{U_1}{2R_L}. \quad (1.43)$$

У загальному випадку сила струму в колі дорівнює:

$$I = \frac{U_1}{R_L + R_H}. \quad (1.44)$$

Порівнявши (1.43) і (1.44) бачимо, що потужність навантаження буде максимальною, якщо

$$R_L = R_H. \quad (1.45)$$

Таким чином, **максимальну потужність споживачу можна передати за умови: опір лінії дорівнює опору навантаження**. Коефіцієнт корисної дії при цьому буде дорівнювати 50 %, тому що половина потужності, яку розвиває джерело, буде втрачатися в лінії електропередачі.

Приклад 1.15

Для розрахункової схеми, приведеної на рис.1.13, відомо:

$E = 200 \text{ В}$, $R_L = 2 \text{ Ом}$, опір навантаження змінюється від 0 до ∞ .

Визначити опір навантаження, при якому йому буде передана максимальна потужність, і знайти цю потужність.

Рішення.

1. Максимальна потужність, яка може бути передана навантаженню, можлива за умови:

$$R_H = R_L = 2 \text{ Ом}.$$

2. Знаходимо силу струму в колі в цьому випадку:

$$I = \frac{E}{R_L + R_H} = \frac{200}{2 + 2} = 50 \text{ А}.$$

3. Знаходимо максимальну потужність, яку можна передати навантаженню:

$$P_{\text{МАКС}} = R_H I^2 = 2 \cdot 50^2 = 5\,000 \text{ Вт} = 5 \text{ кВт}.$$

Запитання для самоконтролю

1. За якої умови по лінії можна передати навантаженню максимальну потужність? Чому буде дорівнювати к.к.д. лінії у цьому випадку?

ТЕМАТИЧНЕ КОМПЛЕКСНЕ КВАЛІФІКАЦІЙНЕ ЗАВДАННЯ

Умова

Від машинного генератора постійного струму за допомогою лінії електропередачі, яка складається з двох металевих проводів, живиться електроосвітлювальний пристрій.

Технічна характеристика генератора: номінальна напруга $U_{нг}$, номінальна сила струму $I_{нг}$, напруга на затискачах генератора при холостому ході U_x .

Технічна характеристика проводів лінії електропередачі: площа поперечного перерізу проводу S , загальна довжина проводів l , питомий опір провідника ρ .

Технічна характеристика електроосвітлювального пристрою: номінальна потужність $P_{н.о.}$, номінальна напруга $U_{н.о.}$.

Для вимірювання сили електричного струму в колі та напруги на затискачах електроосвітлювального пристрою передбачені електровимірювальні прилади. Включення електроосвітлювального пристрою здійснюється вимикачем.

Завдання

1. Скласти принципову електричну схему зазначеного електричного кола. Окремі елементи кола виділити жирними лініями, а їх з'єднуючі проводи – тонкими лініями. Позначити номери проводів.
2. Скласти розрахункову схему електричного кола, прийнявши наступні припущення:
 - опори прямого і зворотнього проводів лінії електропередачі зосередити в одному місці;
 - опорамі проводів, що з'єднують елементи кола, знехтувати;
 - опором амперметра знехтувати;
 - опір вольтметра прийняти дорівнюючим нескінченності.

3. Виконати розрахунок електричного кола:

- визначити електрорушійну силу генератора;
- визначити внутрішній опір генератора;
- визначити опір проводів лінії електропередачі;
- визначити опір електроосвітлювального пристрою;
- визначити силу електричного струму в колі;
- визначити напругу на затискачах генератора;
- визначити спадання напруги в лінії електропередачі;
- визначити напругу на затискачах електроосвітлювального пристрою;
- визначити потужність, яку розвиває генератор;
- визначити втрати потужності в генераторі;
- визначити втрати потужності в лінії електропередачі;
- визначити потужність, яку споживає електроосвітлювальний пристрій;
- скласти баланс потужностей електричного кола;
- визначити коефіцієнт корисної дії лінії електропередачі;
- визначити коефіцієнт корисної дії генератора;
- визначити коефіцієнт корисної дії всієї електроустановки;
- визначити кількість електричної енергії, яку споживе електроосвітлювальний пристрій за 1000 год. роботи.

**Варіанти вихідних даних до тематичного комплексного
кваліфікаційного завдання**

Таблиця 1.1

Варіанти	Вихідні дані							
	$U_{нг},$ <i>B</i>	$I_{нг},$ <i>A</i>	$U_x,$ <i>B</i>	$S,$ <i>мм²</i>	$l,$ <i>м</i>	$\rho,$ $\frac{Ом \cdot м}{мм^2}$	$P_{но},$ <i>Вт</i>	$U_{но},$ <i>B</i>
1	32	2	36	2	471	0,017	675	90
2	260	20	300	2	353	0,017	6000	300
3	200	10	220	2	276	0,029	3800	380
4	135	15	150	3	353	0,017	1200	120
5	110	20	150	3	529	0,017	2250	150
6	85	15	100	3	207	0,029	1700	170
7	185	15	200	2	235	0,017	1700	170
8	110	10	120	2	353	0,017	500	100
9	320	15	350	2	345	0,029	11250	450
10	275	25	300	3	529	0,017	4400	220
11	17	3	20	3	529	0,017	24	12
12	180	20	200	3	414	0,029	6000	300
13	210	20	250	2	353	0,017	4500	300
14	275	25	300	2	353	0,017	10000	400
15	175	5	200	2	1034	0,029	3000	300

4. Провести порівняльний аналіз режимів роботи генератора і електроосвітлювального пристрою за наступним алгоритмом (таблиця 1.2), вибравши відповіді з таблиці 1.3:

Таблиця 1.2

Номери питань і завдань	Питання і завдання	Номери вірних відповідей
1.	Яким загальним поняттям можна об'єднати генератор і приймач?	
2.	Приведіть три ознаки подібності режимів роботи генератора і приймача.	
3.	Приведіть три ознаки розходження режимів роботи генератора і приймача.	
4.	Виділіть головну ознаку подібності режимів роботи генератора і приймача.	
5.	Обґрунтуйте головну ознаку подібності режимів роботи генератора і приймача.	
6.	Виділіть головну ознаку розходження режимів роботи генератора і приймача.	
7.	Обґрунтуйте головну ознаку розходження режимів роботи генератора і приймача.	
8.	Виділіть три шляхи взаємодії генератора і приймача між собою.	
9.	Установіть причинно-наслідковий зв'язок режимів роботи генератора і приймача.	

Таблиця 1.3

Номери вірних відповідей	Варіанти відповідей
1.	За допомогою електричного поля.
2.	Перетворювачі енергії.
3.	Зміною електрорушійної сили.
4.	Однаковий струм.
5.	Зміною опору навантаження.
6.	Різні перетворення енергії.
7.	Причиною зміни режиму роботи може бути як джерело, так і приймач.
8.	Функціональне призначення.
9.	Різні напруги на затискачах.
10.	Елемент електричного кола.
11.	Є вільні заряди.
12.	Різні потужності.
13.	Однакові напруги на затискачах.
14.	Однакові потужності.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

1. Опис експериментальної установки

Експериментальна установка складається з генератора постійного струму G , лінії електропередачі $ЛЕП$, освітлювальної установки EL , вимикача SA , амперметра PA , двох вольтметрів PV_1 і PV_2 .

Принципова електрична схема експериментальної установки наведена на рисунку 1.

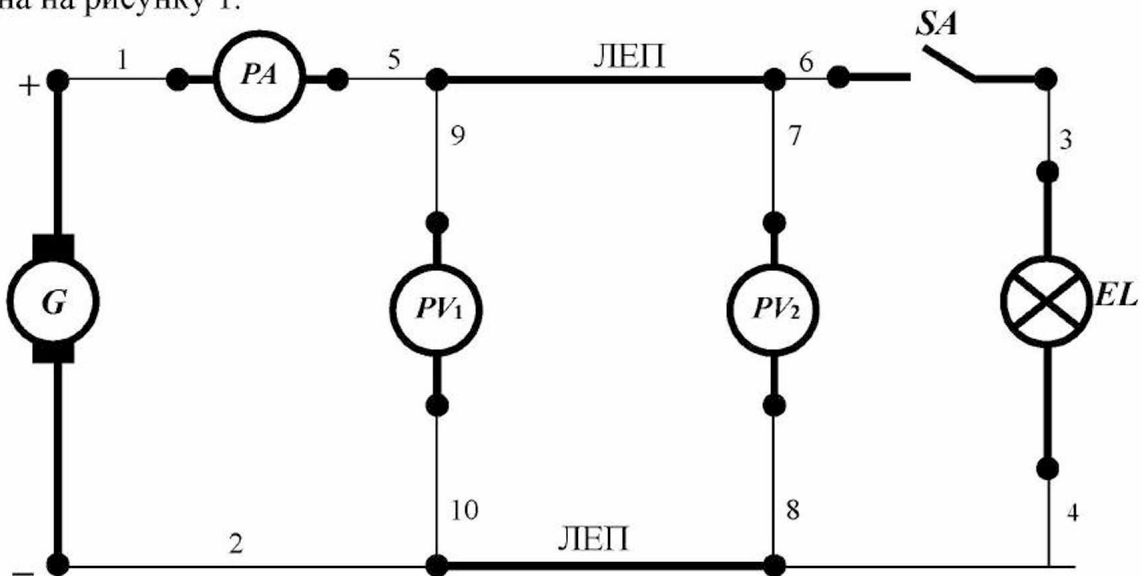


Рисунок 1 - Принципова електрична схема експериментальної установки.

Для складання схеми необхідно мати 10 провідників (на схемі позначені номерами 1-10).

2. Розрахункова схема експериментальної установки

При складанні розрахункової схеми прийняті наступні допущення:

- опори з'єднувальних проводів і контактів вимикача дорівнюють нулю;
- опір обмотки амперметра дорівнює нулю;
- опори обмоток вольтметрів дорівнюють нескінченності, тобто електричний струм у них не протікає.

Тоді розрахункова схема електричного кола експериментальної установки має вигляд, наведений на рисунку 2.

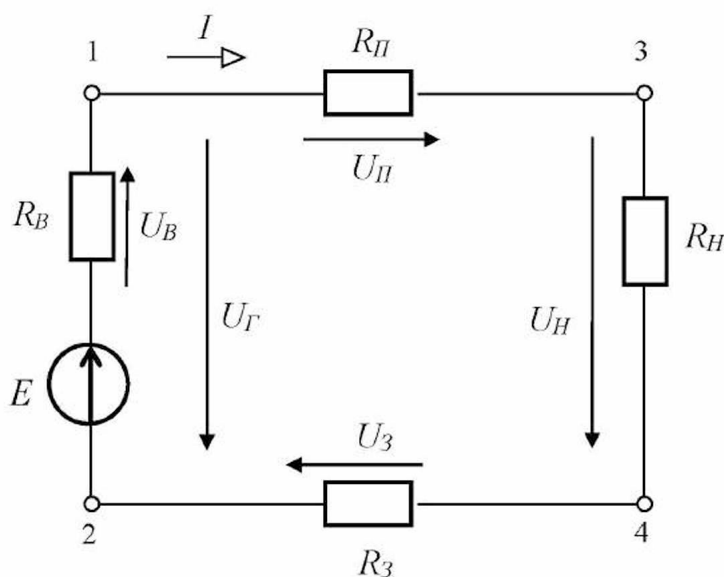


Рисунок 2 - Розрахункова схема електричного кола експериментальної установки.

На розрахунковій схемі введені наступні умовні позначення:

E – е.р.с. генератора, B ;

R_B – внутрішній опір генератора, $Ом$;

$R_П$ – опір прямого проводу ЛЕП, $Ом$;

$R_З$ – опір зворотного проводу ЛЕП, $Ом$;

$R_Н$ – опір освітлювальної установки (навантаження), $Ом$;

U_B – спадання напруги на внутрішньому опорі генератора, B ;

$U_П$ – спадання напруги на прямому проводі лінії, B ;

$U_З$ – спадання напруги на зворотному проводі лінії, B ;

$U_Г$ – напруга на затискачах генератора, B ;

$U_Н$ – напруга на затискачах освітлювальної установки (на навантаженні), B ;

I – сила струму в колі, A .

3. Уміння, які здобуваються студентами в результаті виконання експериментального дослідження

- 3.1 Уміти скласти принципову електричну схему кола та зібрати її.
- 3.2 Уміти скласти розрахункову схему електричного кола та пояснити її.
- 3.3 Уміти визначити значення електрорушійної сили генератора за допомогою експериментальних даних.
- 3.4 Уміти визначити опір проводів лінії за допомогою експериментальних даних.
- 3.5 Уміти визначити опір освітлювального пристрою за допомогою експериментальних даних.
- 3.6 Уміти визначити внутрішній опір генератора за допомогою експериментальних даних.
- 3.7 Уміти визначити потужність, що віддається генератором у лінію електропередачі, за допомогою експериментальних даних.
- 3.8 Уміти визначити потужність, спожиту електроосвітлювальним пристроєм, за допомогою експериментальних даних.
- 3.9 Уміти визначити втрати потужності в лінії електропередачі за допомогою експериментальних даних.
- 3.10 Уміти визначити втрати потужності в генераторі за допомогою експериментальних даних.
- 3.11 Уміти визначити потужність, що розвивається генератором, за допомогою експериментальних даних.
- 3.12 Уміти визначити коефіцієнт корисної дії лінії електропередачі за допомогою експериментальних даних.
- 3.13 Уміти визначити коефіцієнт корисної дії генератора за допомогою експериментальних даних.
- 3.14 Уміти скласти баланс потужностей за допомогою експериментальних даних.
- 3.15 Уміти підтвердити закон Ома для замкненого кола за допомогою експериментальних даних.
- 3.16 Уміти підтвердити експериментально три умови виникнення електричного струму.

4. Завдання з виконання експериментального дослідження

4.1 Зібрати схему експериментальної установки.

4.2 Подати напругу на затискачі експериментальної установки.

4.3 Зняти показання приладів, результати занести в таблицю 1.

Таблиця 1

№ п/п	Умови проведення експерименту	Показання приладів		
		I, A	U_1, B	U_2, B
1	Вимикач SA розімкнений			
2	Вимикач SA замкнений			

4.4 Визначити за допомогою експериментальних даних електрорушійну силу генератора, використовуючи рівняння зовнішньої характеристики генератора:

$$U_G = E - R_B \cdot I$$

і дослід холостого ходу, тобто роботи генератора без навантаження (перший експеримент).

4.5 Визначити за допомогою експериментальних даних загальний опір лінії електропередачі, використовуючи рівняння спадання напруги в лінії:

$$U_L = U_G - U_H = R_L \cdot I,$$

де U_L – спадання напруги в лінії, B ;

R_L – загальний опір лінії, що складається із суми опорів прямого і зворотного проводів, Om ;

I – сила струму в колі, A ;

і показання приладів (другий експеримент).

4.6 Визначити за допомогою експериментальних даних опір освітлювального пристрою, використовуючи закон Ома для ділянки кола:

$$I = \frac{U_H}{R_H}$$

і показання приладів при навантаженні генератора (другий експеримент).

4.7 Визначити внутрішній опір генератора, використовуючи рівняння зовнішньої характеристики генератора:

$$U_G = E - R_B \cdot I$$

і показання приладів при навантаженні генератора (другий експеримент).

4.8 Визначити потужність, що розвивається генератором при навантаженні, використовуючи рівняння:

$$P = E \cdot I$$

і експериментальні дані.

4.9 Визначити потужність, що віддається генератором при навантаженні в лінію електропередачі, використовуючи рівняння:

$$P_r = U_r \cdot I$$

і експериментальні дані.

4.10 Визначити потужність, спожиту освітлювальним пристроєм, використовуючи рівняння:

$$P_H = U_H \cdot I$$

і експериментальні дані.

4.11 Визначити потужність, що втрачається в генераторі при навантаженні, використовуючи рівняння:

$$P_B = U_B \cdot I = (E - U_G) \cdot I$$

і експериментальні дані.

4.12 Визначити потужність, що втрачається в лінії електропередачі при навантаженні, використовуючи рівняння:

$$P_L = U_L \cdot I = (U_G - U_H) \cdot I$$

і експериментальні дані.

4.13 Скласти баланс потужностей, використовуючи розрахункові дані:

$$P = P_B + P_L + P_H.$$

4.14 Визначити коефіцієнт корисної дії лінії електропередачі, використовуючи рівняння:

$$\eta_L = \frac{P_H}{P_G} = \frac{U_H \cdot I}{U_G \cdot I} = \frac{U_H}{U_G}$$

і експериментальні дані.

4.15 Визначити коефіцієнт корисної дії генератора при навантаженні, використовуючи рівняння:

$$\eta_G = \frac{P_G}{P} = \frac{U_G \cdot I}{E \cdot I} = \frac{U_G}{E}.$$

4.16 Занести отримані значення в таблицю 2.

Таблиця 2

№ п/п	Фізичні величини, що характеризують коло										
	$E,$ B	$R_B,$ $Ом$	$R_L,$ $Ом$	$R_H,$ $Ом$	$P,$ $Вт$	$P_B,$ $Вт$	$P_G,$ $Вт$	$P_L,$ $Вт$	$P_H,$ $Вт$	η_L	η_G
1											

4.17 Підтвердити за допомогою експериментальних даних закон Ома для замкненого кола, використовуючи його рівняння для досліджуваного кола:

$$I = \frac{E}{R_B + R_L + R_H}.$$

4.18 Експериментально підтвердити три умови виникнення електричного струму.

5. Структура звіту

5.1 Назва експериментального дослідження.

5.2 Принципова електрична схема експериментальної установки.

5.3 Розрахункова схема електричного кола експериментальної установки.

5.4 Таблиця 1.

5.5 Таблиця 2.

Тема 2 ЛІНІЙНІ РОЗГАЛУЖЕНІ ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

2.1 Закони Кірхгофа

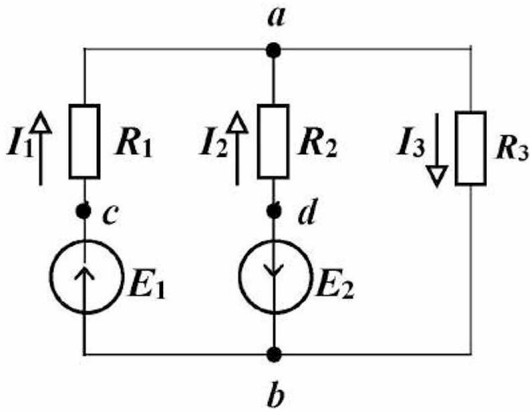


Рис.2.1

Розглянемо розрахункову схему заданого електричного кола (рис.2.1). Вона має три розгалуження і два вузли. У кожному розгалуженні проходить струм певної сили. **Розгалуження** – це ділянка кола, яка складається з послідовно з'єднаних елементів, включених між двома вузлами. У свою чергу, **вузол** – це точка, у якій сходяться не менше трьох розгалужень.

Кола, що подібні приведеному на рис.2.1, називаються **розгалуженими**. Розгалужені електричні кола розраховуються різними методами, в основу яких покладені закони, які відкрив німецький фізик *Гюстав Кірхгоф* у 1845 році.

1-й закон Кірхгофа формулюється так: **алгебраїчна сума сил струмів у вузлі дорівнює нулю**, тобто

$$\sum_1^n I_i = 0 \quad (2.1)$$

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

Наприклад, для вузла **а** розрахункової схеми електричного кола, приведеної на рис.2.1, рівняння за 1-м законом Кірхгофа має такий вигляд:

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0 \quad .$$

2-й закон Кірхгофа формулюється так: **у замкненому контурі електричного кола алгебраїчна сума е.р.с. дорівнює алгебраїчній сумі спадів напруг на опорах, що входять у цей контур**, тобто

$$\sum_1^n E_i = \sum_1^n R_i I_i \quad (2.2)$$

Умовно приймають, що е.р.с. та сили струмів беруться зі знаком “+”, якщо їх напрями збігаються з довільно обраним напрямом обходу контуру; якщо не збігаються – зі знаком “-”.

Наприклад, для контуру **a-d-b-c-a** (рис.2.1), прийнявши напрям обходу за годинниковою стрілкою, маємо:

$$E_1 + E_2 = R_1 I_1 - R_2 I_2 .$$

Запитання для самоконтролю

1. Що таке вузол розгалуженого електричного кола?
2. Що таке розгалуження розгалуженого електричного кола?
3. Приведіть приклад розрахункової схеми розгалуженого кола.
4. Сформулюйте 1-й закон Кірхгофа.
5. Запишіть математично 1-й закон Кірхгофа.
6. Що таке умовно позитивний напрям струму?
7. Коли умовно позитивний напрям струму є дійсним напрямом струму?
8. Позначте умовно позитивні напрями струмів на приведеній розрахунковій схемі (пункт 3) і запишіть рівняння за 1-м законом Кірхгофа для одного з вузлів.
9. Сформулюйте 2-й закон Кірхгофа.
10. Запишіть математично 2-й закон Кірхгофа.
11. Запишіть рівняння за 2-м законом Кірхгофа для одного з контурів приведеної розрахункової схеми (пункт 3).

2.2 Застосування законів Кірхгофа для розрахунку розгалужених кіл

Для вирішення задач аналізу розгалужених електричних кіл за допомогою законів **Кірхгофа** необхідно скласти рівняння електричної рівноваги заданої розрахункової схеми кола в наступній послідовності:

- 1) вибрати довільно напрями струмів у всіх розгалуженнях схеми електричного кола;
- 2) скласти рівняння за 1-м законом Кірхгофа для вузлів схеми кола (кількість аналізованих вузлів повинна бути на один вузол менше, ніж сумарна кількість вузлів схеми кола);
- 3) вибрати напрями обходів усіх незалежних контурів схеми кола;
- 4) скласти рівняння за 2-м законом Кірхгофа для всіх незалежних контурів схеми кола;
- 5) вирішити отриману систему рівнянь.

Розглянемо застосування законів Кірхгофа на прикладі розрахункової схеми кола, приведеної на рис.2.2. Схема має шість розгалужень ($m = 6$) і чотири вузли ($n = 4$).

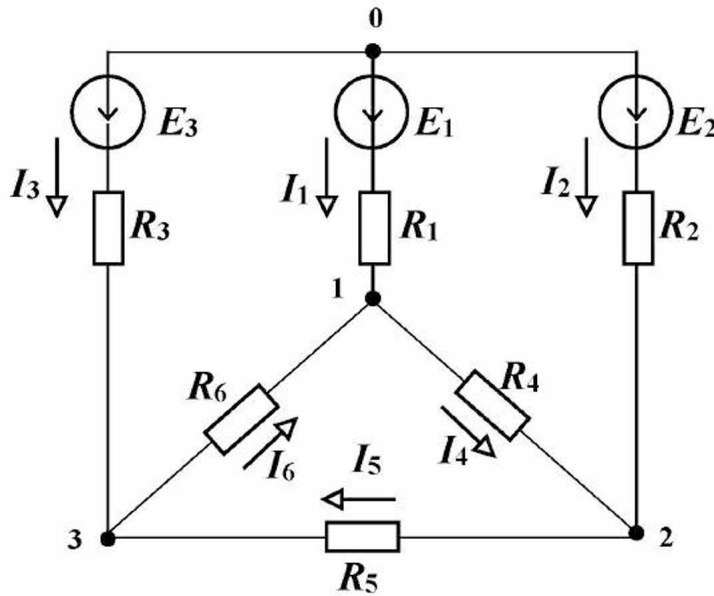


Рис.2.2

Складаємо рівняння за 1-м законом Кірхгофа (кількість рівнянь становить $n - 1 = 3$):

для вузла 1:

$$I_1 + I_6 - I_4 = 0;$$

для вузла 2:

$$I_2 + I_4 - I_5 = 0;$$

для вузла 3:

$$I_3 + I_5 - I_6 = 0.$$

При складанні рівнянь за 2-м законом Кірхгофа необхідно враховувати, що рівняння повинні бути взаємно незалежними. Для цього контури необхідно вибирати так, щоб кожний контур (для якого складається рівняння) неможливо було одержати з контурів (для яких уже складені рівняння) шляхом видалення з них загальних розгалужень. Наприклад, контур 0-2-1-3-0 можна одержати з контурів 0-1-2-0 та 0-1-3-0 шляхом видалення з них загального розгалуження 0-1.

Усього рівнянь за 2-м законом Кірхгофа повинне бути $m - n + 1 = 3$.

Вибираємо незалежні контури 0-1-3-0; 0-1-2-0 та 1-2-3-1. Складаємо для них рівняння за 2-м законом Кірхгофа, вибравши напрями обходів контурів за годинниковою стрілкою:

$$\text{для контуру } 0-1-3-0: \quad R_1 I_1 - R_6 I_6 - R_3 I_3 = E_1 - E_3;$$

$$\text{для контуру } 0-1-2-0: \quad R_2 I_2 - R_4 I_4 - R_1 I_1 = E_2 - E_1;$$

$$\text{для контуру } 1-2-3-1: \quad R_4 I_4 + R_5 I_5 + R_6 I_6 = 0.$$

Таким чином, ми одержали шість рівнянь із шістьма невідомими: I_1, I_2, I_3, I_4, I_5 і I_6 . Спільне розв'язання цих рівнянь дозволяє одержати значення сил струмів у всіх розгалуженнях схеми кола. Якщо при вирішенні рівнянь сила струму буде мати негативне значення, то це означає, що напрям струму на схемі кола необхідно замінити на протилежний.

Запитання для самоконтролю

1. Приведіть послідовність аналізу розгалуженого електричного кола за допомогою законів Кірхгофа.
2. Скільки незалежних рівнянь за 1-м законом Кірхгофа можна записати для розрахункової схеми розгалуженого електричного кола?
3. Скільки незалежних рівнянь за 2-м законом Кірхгофа можна записати для розрахункової схеми розгалуженого електричного кола?

2.3 Еквівалентні перетворення схем з'єднань опорів

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

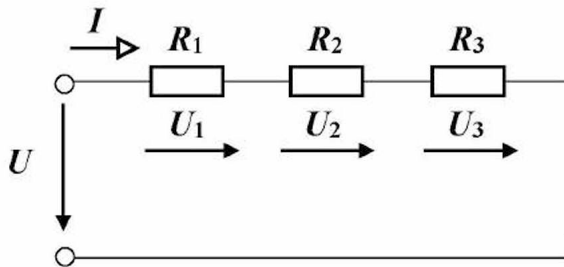


Рис.2.3

Складаємо рівняння за 2-м законом Кірхгофа:

$$U = U_1 + U_2 + U_3 ;$$

або

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

де

$R_e = R_1 + R_2 + R_3$ – еквівалентний опір послідовно з'єднаних опорів, Ом.

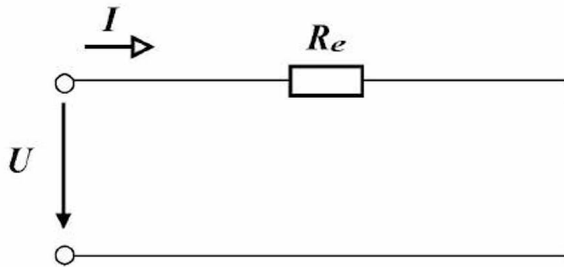


Рис.2.4

Таким чином, задану схему з'єднання опорів (рис.2.3) можна замінити еквівалентною (рис.2.4). При еквівалентному перетворенні напруга на зажимах кола і сила струму в колі не змінюються.

Розглянемо розрахункову схему кола з **паралельним** з'єднанням опорів (рис.2.5).

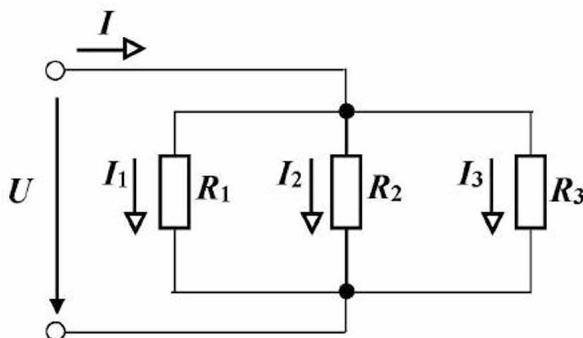


Рис.2.5

Складаємо рівняння за 1-м законом Кірхгофа:

$$I = I_1 + I_2 + I_3 .$$

Перепишемо це рівняння в наступному вигляді:

$$I = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3} . \quad (2.3)$$

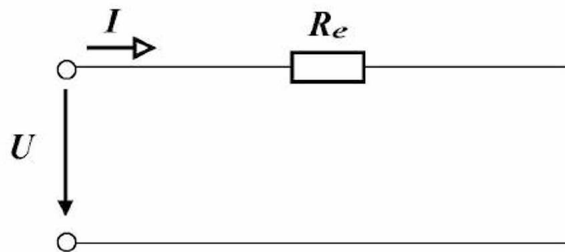


Рис.2.6

Замінімо схему еквівалентною (рис.2.6).

Сила струму в колі:

$$I = \frac{U}{R_e} \quad (2.4)$$

Сила струму в колі залишається без зміни, тому, дорівнявши (2.3) і (2.4), знаходимо:

$$\frac{1}{R_e} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \quad (2.5)$$

Введемо поняття **провідності елемента кола**, під якою будемо розуміти **фізичну величину, яка характеризує здатність елемента кола проводити електричний струм, обернено пропорційну опору елемента кола**, тобто

$$g = \frac{1}{R}, \quad (2.6)$$

$$[g] = \frac{1}{\text{Ом}} = \text{См (сіменс)}.$$

Сили струмів у розгалуженнях з урахуванням (2.6) дорівнюють:

$$I_1 = g_1 U ; I_2 = g_2 U ; I_3 = g_3 U .$$

Підставивши отримані значення в рівняння, складене за 1-м законом Кірхгофа, одержимо:

$$I = g_1 U + g_2 U + g_3 U = (g_1 + g_2 + g_3) U = g_e U,$$

де

$g_e = g_1 + g_2 + g_3$ – еквівалентна провідність паралельно з'єднаних опорів, См.

Визначаємо еквівалентний опір:

$$\frac{1}{R_e} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3},$$

зв'ідки

$$R_e = \frac{1}{\sum_1^n \frac{1}{R_i}}$$

Таким чином, задану схему з'єднання опорів (рис.2.5) можна замінити еквівалентною (рис.2.6). При еквівалентному перетворенні напру-га на затискачах кола і сила струму в колі не змінюються.

Приклад 2.1

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

Опір освітлювальної установки дорівнює **8 Ом**.

Опори нагрівальних установок відповідно дорівнюють **3 Ом** і **4 Ом**.

Опір лінії електропередачі на ділянці генератор – освітлювальна установка дорівнює **5 Ом**.

Опір лінії електропередачі на ділянці освітлювальна установка – нагрівальні установки дорівнює **6 Ом**.

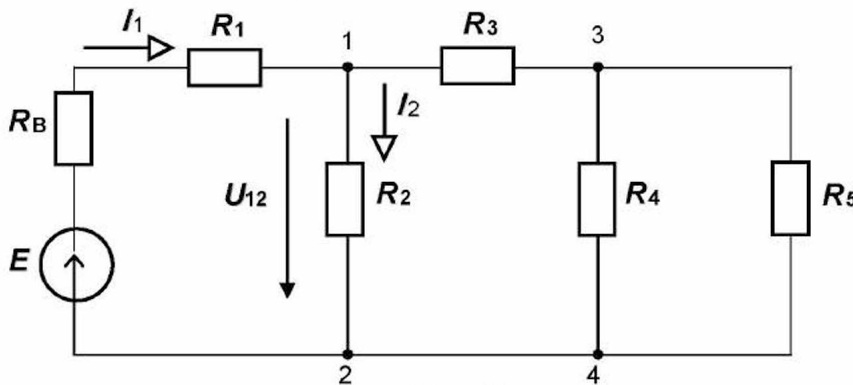
Електрорушійна сила, яку розвиває генератор, дорівнює **300 В**.

Внутрішній опір генератора дорівнює **1 Ом**.

Скласти розрахункову схему кола. Визначити силу струму, який віддається генератором. Визначити напругу на освітлювальній установці і силу струму, який у ній протікає. Визначити потужність, яку споживає освітлювальна установка.

Рішення.

1. Складаємо розрахункову схему електричного кола, увівши наступні позначення: R_B – 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.2.7).



Дано:

- $E = 300 \text{ В} ;$
- $R_B = 1 \text{ Ом} ;$
- $R_1 = 5 \text{ Ом} ;$
- $R_2 = 8 \text{ Ом} ;$
- $R_3 = 6 \text{ Ом} ;$
- $R_4 = 3 \text{ Ом} ;$
- $R_5 = 6 \text{ Ом} .$

Рис.2.7

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

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

3. Заміняємо опір R_3 і R_{45} одним еквівалентним:

$$R_{345} = R_3 + R_{45} = 6 + 2 = 8 \text{ Ом}.$$

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

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

5. Знаходимо еквівалентний опір усього кола:

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

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

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

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

$$U_{12} = E - R_B I - R_1 I = 300 - 1 \cdot 30 - 5 \cdot 30 = 120 \text{ В}.$$

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

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

9. Знаходимо потужність, яку споживає освітлювальна установка:

$$P_2 = R_2 I_2^2 = U_{12} I_2 = 8 \cdot 15^2 = 120 \cdot 15 = 1800 \text{ Вт} = 1,8 \text{ кВт}.$$

Запитання для самоконтролю

1. Як розрахувати еквівалентний опір послідовно з'єднаних опорів?
2. Як розрахувати еквівалентний опір паралельно з'єднаних опорів?
3. Дайте визначення провідності елемента кола.
4. Запишіть визначальну формулу провідності елемента кола.

ТЕМАТИЧНЕ КОМПЛЕКСНЕ КВАЛІФІКАЦІЙНЕ ЗАВДАННЯ

Умова

Два реальних машинних генератори включені на паралельну роботу.

Технічна характеристика першого генератора: електрорушійна сила, що розвивається, E_1 , внутрішній опір $R_{В1}$.

Технічна характеристика другого генератора: електрорушійна сила, що розвивається, E_2 , внутрішній опір $R_{В2}$.

Генератори живлять лінію електропередачі, опір якої $R_{Л1}$.

Наприкінці лінії електропередачі підключене навантаження, опір якого $R_{Н1}$.

Далі підключена наступна лінія електропередачі, опір якої $R_{Л2}$.

Наприкінці другої лінії електропередачі підключене навантаження, опір якого $R_{Н2}$.

Для вимірювання сил електричних струмів генераторів передбачені амперметри. На початку і наприкінці першої лінії електропередачі установлені вольтметри. Вольтметр також установлений наприкінці другої лінії електропередачі.

Кожне навантаження включене через вимикач.

Завдання

1. Скласти принципову електричну схему описаного електричного кола. Навантаженням є освітлювальні установки. Окремі елементи кола виділити жирними лініями, а їх з'єднуючі проводи – тонкими лініями. Позначити номери проводів.
2. Скласти розрахункову схему електричного кола, прийнявши наступні допущення:
 - опори прямого і зворотнього проводів лінії електропередачі зосередити в одному місці;
 - опорами проводів, які з'єднують елементи кола, знехтувати;
 - опором амперметра знехтувати;
 - опори вольтметрів прийняти дорівнюючими нескінченності.

3. Виконати розрахунок електричного кола:

- замінити опори ліній і навантажень одним еквівалентним опором R_E ;
- скласти рівняння за першим і другим законами Кірхгофа для розрахунку сил електричних струмів еквівалентної схеми і розрахувати їх;
- визначити напругу на затискачах генератора;
- визначити силу електричного струму в першій лінії електропередачі;
- визначити напругу на затискачах першого навантаження;
- визначити силу електричного струму в другій лінії електропередачі;
- визначити напругу на затискачах другого навантаження;
- визначити сумарну потужність, яка розвивається генераторами;
- визначити сумарні втрати потужності в генераторах;
- визначити сумарні втрати потужності в лініях електропередачі;
- визначити потужності, які споживає кожне навантаження;
- визначити коефіцієнт корисної дії першої лінії електропередачі;
- визначити коефіцієнт корисної дії другої лінії електропередачі;
- визначити коефіцієнт корисної дії першого генератора;
- визначити коефіцієнт корисної дії другого генератора.

**Варіанти вихідних даних до тематичного комплексного
кваліфікаційного завдання**

Таблиця 2.1

Варіанти	Вихідні дані							
	$E_1,$ <i>B</i>	$R_{B1},$ <i>Om</i>	$E_2,$ <i>B</i>	$R_{B2},$ <i>Om</i>	$R_{Л1},$ <i>Om</i>	$R_{Л2},$ <i>Om</i>	$R_{Н1},$ <i>Om</i>	$R_{Н2},$ <i>Om</i>
1	60	1	80	1	1	1,5	2	0,5
2	60	1	80	1	0,5	2	3	1
3	120	1	160	1	1	1,5	2	0,5
4	120	1	160	2	0,5	2	3	1
5	180	1	189	1	1	0,5	5	7
6	180	1	189	1	1	1	6	5
7	110	1	120	2	1,25	1	6	9
8	110	1	120	2	2,5	1,5	5	3,5
9	110	1	120	1	0,5	2	3	1
10	90	1,5	120	1,5	1,5	1	3	2
11	90	1,5	120	1,5	1,5	2	3	1
12	145	0,5	175	3	1,25	9	6	1
13	145	0,5	175	3	1,25	1	6	9
14	90	1,5	120	1,5	1	4	3	2
15	110	1	120	1	0,5	2	3	1

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

1. Опис експериментальної установки

Експериментальна установка містить ідеальний генератор постійного струму G , три резистори, які включені змішано: два резистори R_2 і R_3 – паралельно, а послідовно з ними – резистор R_1 . Для вимірювання сил електричних струмів у розгалуженнях електричного кола встановлені амперметри PA_1 , PA_2 і PA_3 . Для вимірювання напруг на ділянках кола встановлені вольтметри PV_1 , PV_2 і на затискачах генератора PV . Для комутації кола передбачений вимикач SA .

Принципова електрична схема експериментальної установки наведена на рисунку 1.

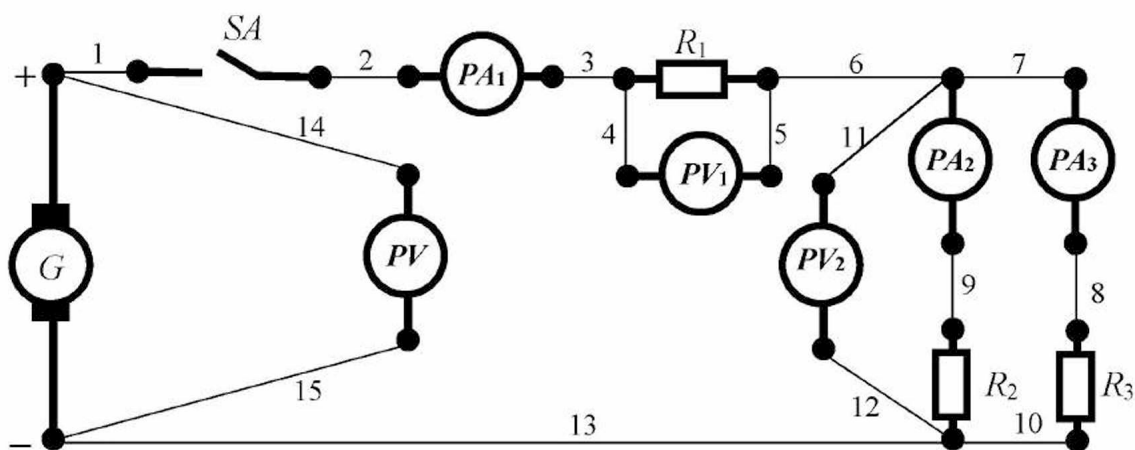


Рисунок 1 - Принципова електрична схема експериментальної установки.

Для складання схеми необхідно мати 15 провідників (на схемі позначені номерами 1-15).

2. Розрахункова схема експериментальної установки

При складанні розрахункової схеми прийняті наступні допущення:

- внутрішній опір генератора дорівнює нулю;

- опори з'єднувальних проводів, обмоток амперметрів і контактів вимикачів дорівнюють нулю;

- опори обмоток вольтметрів дорівнюють нескінченності.

Тоді розрахункова схема електричного кола експериментальної установки має вигляд, наведений на рисунку 2.

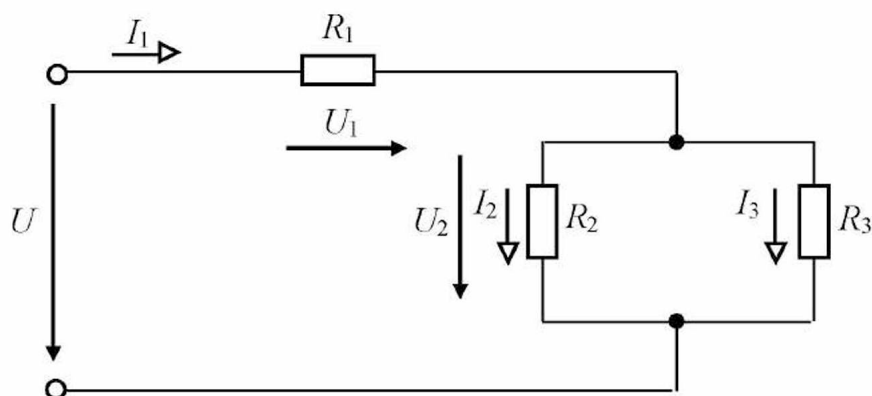


Рисунок 2 - Розрахункова схема електричного кола експериментальної установки.

На розрахунковій схемі введені наступні умовні позначення:

U – напруга на затискачах кола, B ;

R_1 – опір першого резистора, Om ;

R_2 – опір другого резистора, Om ;

R_3 – опір третього резистора, Om ;

U_1 – напруга на затискачах першого резистора, B ;

U_2 – напруга на затискачах другого і третього резисторів, B ;

I_1 – сила струму в першому резисторі, A ;

I_2 – сила струму в другому резисторі, A ;

I_3 – сила струму в третьому резисторі, A .

3. Уміння, які здобуваються студентами в результаті виконання експериментального дослідження

3.1 Уміти скласти принципову електричну схему кола та зібрати її.

- 3.2 Уміти скласти розрахункову схему електричного кола та пояснити її.
- 3.3 Уміти визначити значення електрорушійної сили генератора за допомогою експериментальних даних.
- 3.4 Уміти визначити опори резисторів за допомогою експериментальних даних.
- 3.5 Уміти визначити потужність, що розвивається генератором, за допомогою експериментальних даних.
- 3.6 Уміти визначити потужність, спожиту кожним резистором, за допомогою експериментальних даних.
- 3.7 Уміти скласти баланс потужностей за допомогою розрахункових даних.
- 3.8 Уміти підтвердити перший закон Кірхгофа за допомогою експериментальних даних.
- 3.9 Уміти підтвердити другий закон Кірхгофа за допомогою експериментальних даних.

4. Завдання з виконання експериментального дослідження

- 4.1 Зібрати схему експериментальної установки.
- 4.2 Подати напругу на затискачі експериментальної установки.
- 4.3 Зняти показання приладів, результати занести в таблицю 1.

Таблиця 1

№ п/п	Умови проведення експерименту	Показання приладів					
		I_1, A	I_2, A	I_3, A	U, B	$U_{1,B}$	$U_{2,B}$
1	Вимикач SA замкнений						

- 4.4 Прийняти, що значення електрорушійної сили дорівнює напрузі на затискачах генератора, тому що генератор ідеальний.

4.5 Визначити за допомогою експериментальних даних еквівалентний опір всього кола, використовуючи рівняння:

$$U = R_E \cdot I_1,$$

де R_E – еквівалентний опір всього кола, Ом.

4.6 Визначити за допомогою експериментальних даних опір першого резистора, використовуючи рівняння закону Ома для ділянки кола:

$$I_1 = \frac{U_1}{R_1}.$$

4.7 Визначити за допомогою експериментальних даних опір другого резистора, використовуючи рівняння закону Ома для ділянки кола:

$$I_2 = \frac{U_2}{R_2}.$$

4.8 Визначити за допомогою експериментальних даних опір третього резистора, використовуючи рівняння закону Ома для ділянки кола:

$$I_3 = \frac{U_3}{R_3}.$$

4.9 Визначити потужність, що розвивається генератором при навантаженні, використовуючи рівняння:

$$P = E \cdot I_1.$$

4.10 Визначити потужність, спожиту першим резистором, використовуючи рівняння:

$$P_1 = U_1 \cdot I_1.$$

4.11 Визначити потужність, спожиту другим резистором, використовуючи рівняння:

$$P_2 = U_2 \cdot I_2.$$

4.12 Визначити потужність, спожиту третім резистором, використовуючи рівняння:

$$P_3 = U_2 \cdot I_3.$$

4.13 Скласти баланс потужностей, використовуючи розрахункові дані:

$$P = P_1 + P_2 + P_3.$$

4.14 Занести отримані значення в таблицю 2.

Таблиця 2

№ П/П	Фізичні величини, що характеризують коло							
	E, B	$R_1, Ом$	$R_2, Ом$	$R_3, Ом$	$P, Вт$	$P_1, Вт$	$P_2, Вт$	$P_3, Вт$
1								

4.15 Підтвердити за допомогою експериментальних даних перший закон Кірхгофа:

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

4.16 Підтвердити за допомогою експериментальних даних другий закон Кірхгофа:

$$U = U_1 + U_2.$$

5. Структура звіту

5.1 Назва теми експериментального дослідження.

5.2 Принципова електрична схема експериментальної установки.

5.3 Розрахункова схема експериментальної установки.

5.4 Таблиця 1.

5.5 Таблиця 2.

Тема 3 НЕРОЗГАЛУЖЕНІ ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ЗМІННОГО СИНУСОЇДНОГО СТРУМУ

3.1 Основні фізичні поняття

Явище електромагнетизму було відкрито в 1820 році датським фізиком *Г.Х. Ерстедом*, суть якого полягає в тому, що **при протіканні по провіднику електричного струму навколо останнього утворюється магнітне поле.**

Був установлений **закон електромагнетизму: потокозчеплення електричної котушки прямо пропорційно силі електричного струму й індуктивності котушки.**

Математичний запис закону електромагнетизму наступний:

$$\psi = w \cdot \Phi = L \cdot i, \quad (3.1)$$

де ψ – потокозчеплення котушки, *Вб*;
 w – кількість витків котушки;
 Φ – магнітний потік, *Вб*;
 L – індуктивність котушки, *Гн*;
 i – сила електричного струму в котушці, *А*.

Представимо описане явище схематично (рис.3.1).

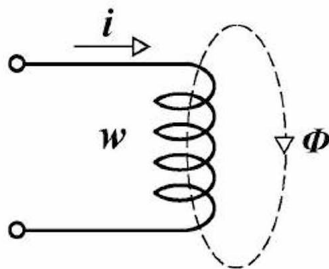


Рис.3.1

Явище електромагнітної індукції відкрив у 1831 році англійський фізик *Майкл Фарадей*, суть якого полягає в наступному: **якщо провідний контур пронизується змінним магнітним потоком, то в контурі наводиться електрорушійна сила.**

Закон електромагнітної індукції: значення електрорушійної сили, яка наводиться в контурі, прямо пропорційно кількості витків контуру і швидкості зміни магнітного потоку.

Математичний запис закону:

$$e = -w \frac{d\Phi}{dt}, \quad (3.2)$$

де e – електрорушійна сила, *В*;
 w – кількість витків котушки;
 Φ – магнітний потік, *Вб*;
 t – поточний час, *с*.

$$[e] = \frac{Вб}{с} = \frac{В \cdot с}{с} = В.$$

Приклад 3.1

Котушка зі **100 витків** має індуктивність **0,1 Гн**;
по котушці протікає струм $i = 10 \sin \omega t$ А.
Визначити магнітний потік усередині котушки.

Рішення.

З (3.1) знаходимо магнітний потік:

$$\Phi = \frac{L \cdot i}{w} \quad (3.1a)$$

Підставляємо значення фізичних величин і одержуємо:

$$\Phi = \frac{0,1 \cdot 10 \sin \omega t}{100} = 0,01 \sin \omega t \text{ Вб}.$$

Фізична суть знака «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.

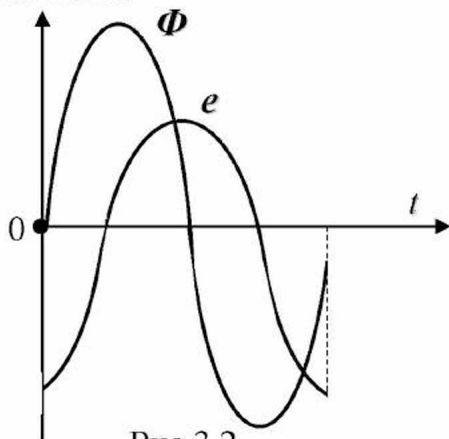


Рис.3.2

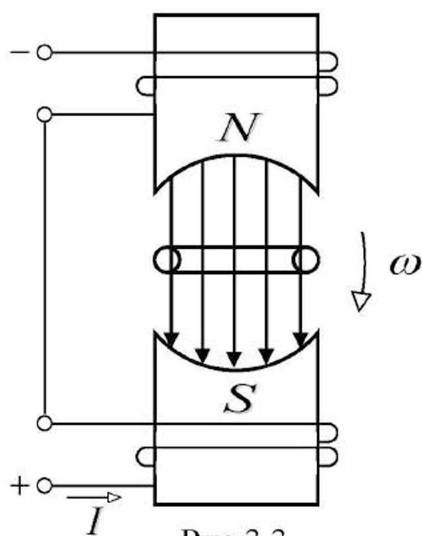


Рис.3.3

Розглянемо це на графіку (рис.3.2).

Явища електромагнетизму й електромагнітної індукції лежать в основі принципу дії генераторів змінного синусоїдного струму.

Приведемо варіант конструктивної схеми генератора змінного синусоїдного струму (рис.3.3).

Магнітний потік створюється струмом намагнічування I . Провідний контур (рамка) розміщений на осі між полюсами електромагніта. Якщо рамку привести в обертання, то магнітний потік, що пронизує рамку, буде змінюватися в часі за синусоїдним законом і у рамці буде наводитися е.р.с., яка також буде змінюватися за синусоїдним законом в залежності від кута відхилення рамки від горизонтального положення (рис.3.2, 3.3), тобто

$$e = E_m \cdot \sin \alpha, \quad (3.3)$$

де E_m – амплітудне (максимальне) значення е.р.с. (при вертикальному положенні рамки), В;
 α – кут відхилення рамки від горизонтального положення, рад (град);
 e – миттєве значення е.р.с. для заданого кута відхилення рамки, В.

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

$$\alpha = \omega \cdot t, \quad (3.4)$$

де ω – кутова швидкість обертання рамки, рад/с (град/с);
 t – поточний час, с.

Таким чином, підставивши (3.4) у (3.3), одержимо залежність е.р.с. від кутової швидкості обертання рамки:

$$e = E_m \cdot \sin \omega t, \quad (3.5)$$

Приклад 3.2

Котушка індуктивності, яка має **100 витків**, пронизується магнітним потоком $\Phi = 0,01 \sin \omega t$ Вб, $\omega = 314$ с⁻¹.
 Визначити електрорушійну силу, яка наводиться в котушці.

Рішення.

Підставляємо значення фізичних величин у (3.2) і одержуємо:

$$e = -100 \cdot \frac{d}{dt} 0,01 \sin 314t = -100 \cdot 0,01 \cdot 314 \cdot \sin (\omega t + 90^\circ) = 314 \cdot \sin (\omega t - 90^\circ) \text{ В}.$$

Якщо рамку замкнути за допомогою щіткового механізму на резистор, то виникає синусоїдний струм:

$$i = I_m \cdot \sin \omega t, \quad (3.6)$$

де I_m – амплітудне (максимальне) значення струму (при амплітудному значенні е.р.с.), А;
 i – миттєве значення струму, А.

Покажемо графік $i = f(t)$ на рис.3.4.

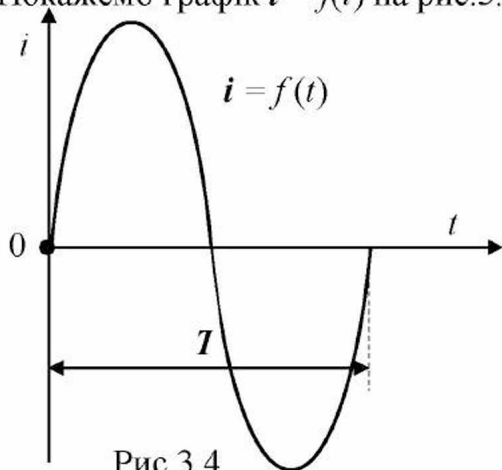


Рис.3.4

Запишемо кутову швидкість обертання рамки через частоту (кількість обертів за секунду):

$$\omega = 2\pi \cdot f, \quad (3.7)$$

де f – частота обертання рамки, (1/с) Гц.

З такою ж **частотою** f буде змінюватися й електричний струм.

Час одного обороту рамки позначимо через T ; таким же буде і час одного повного коливання струму, назовемо його **періодом** струму.

У Європі частота струму дорівнює 50 Гц , тобто $f = 50 \text{ Гц} (1/\text{с})$.
Тоді період струму $T = 0,02 \text{ с}$, тобто

$$T = \frac{1}{f}. \quad (3.8)$$

У загальному випадку в момент часу $t = 0$ рамка може знаходитися під певним кутом відносно горизонтального положення і тоді миттєве значення струму записується в такий спосіб:

$$i = I_m \cdot \sin(\omega t + \psi_1), \quad (3.9)$$

де ψ_1 – початкова фаза струму
(початковий кут відхилення рамки), $\text{рад} (\text{град})$;
 $(\omega t + \psi_1)$ – поточна фаза струму, $\text{рад} (\text{град})$.

Синусоїдні величини (струми, напруги, е.р.с., потенціали) зображують на площині за допомогою векторів. Для цього береться амплітудне значення синусоїдної величини та в обраному масштабі відкладається у вигляді відрізка прямої під кутом до вісі відліку, який дорівнює початковій фазі зображуваної величини. Якщо початкова фаза позитивна, то кут відліку відкладається проти годинникової стрілки, якщо негативна – за годинниковою стрілкою. Як приклад струм $i = I_m \cdot \sin(\omega t + 45^\circ) \text{ А}$ зображений на рис.3.5.

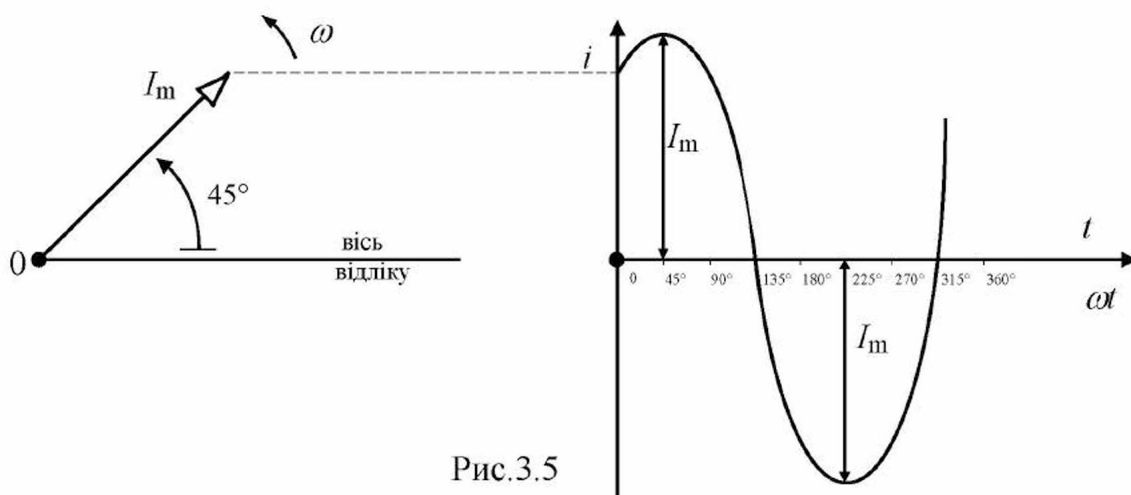


Рис.3.5

Кутову швидкість обертання рамки називають **кутовою (кутовою) частотою струму**:

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

і графік $i = f(t)$ найчастіше будують у вигляді $i = f(\omega t)$, тобто миттєве значення струму у функції миттєвого значення фази струму (миттєвого кута повороту рамки).

У вигляді вектора струм зображують для моменту часу $t = 0$. Миттєве значення струму в будь-який інший момент часу (іншої фази струму) є проекція вектора на вертикальну вісь (рис.3.5).

Приклад 3.3

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

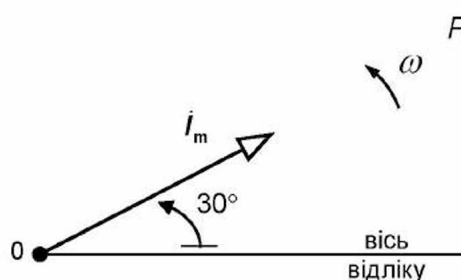


Рис.3.6

Вибираємо масштаб струму $m_i = 0,5$ А/мм і будуємо вектор струму (рис.3.6).

Опір провідника змінному струму (активний) залежить від частоти струму і пов'язаний з тим, що в результаті витиснення струму на поверхню провідника переріз провідника як би зменшується, що призводить до збільшення його опору в порівнянні з постійним струмом. Витиснення струму на поверхню провідника (поверхневий ефект) виникає внаслідок явища електромагнітної індукції. Змінне магнітне поле навколо провідника, створене змінним струмом у провіднику, наводить е.р.с. самоіндукції. Якщо представити провідник у вигляді безлічі паралельних ниток, по яких проходять свої струми, то найбільша кількість магнітних силових ліній зчеплено з центральними нитками і там наводиться найбільша е.р.с., яка перешкоджає струму і витісняє його на поверхню (рис.3.7).

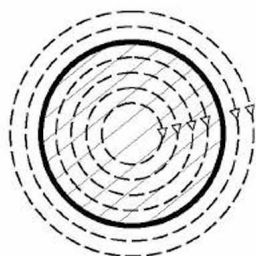


Рис.3.7

Зображується активний опір на розрахункових схемах у такий спосіб: $\xrightarrow{i} \boxed{r}$.

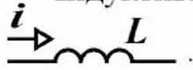
З курсу фізики відомо, що індуктивність котушки (провідника) залежить від квадрата кількості витків, магнітної проникності середовища, по якому замикається магнітний потік, площі внутрішнього перерізу котушки і довжини середньої силової лінії магнітного потоку, тобто

$$L = \frac{w^2 \cdot \mu \mu_0 \cdot S}{l}, \quad (3.10)$$

- де w – кількість витків котушки;
 μ – відносна магнітна проникність середовища, по якому замикається магнітний потік;
 μ_0 – магнітна постійна ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$), Гн/м ;
 S – площа внутрішнього перерізу котушки, м^2 ;
 l – довжина середньої магнітної силової лінії, м .

$$[L] = \frac{\text{Гн} \cdot \text{м}^2}{\text{м} \cdot \text{м}} = \text{Гн}.$$

Індуктивність на розрахункових схемах зображується в такий спосіб:



Приклад 3.4

Котушка індуктивності без феромагнітного осердя має **1000 витків**. Площа внутрішнього перерізу котушки дорівнює **400 см²**, довжина середньої силової лінії магнітного потоку котушки дорівнює **12,56 см**.
 Визначити індуктивність котушки.

Рішення.

Підставляємо значення параметрів котушки в (3.10) і одержуємо:

$$L = \frac{1000^2 \cdot 1 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 400 \cdot 10^{-4}}{12,56 \cdot 10^{-2}} = 0,4 \text{ Гн}.$$

Діюче значення змінного синусоїдного струму. Змінний синусоїдний струм, проходячи по провіднику, супроводжується тепловою дією незалежно від напрямку струму. Миттєва потужність, яка виділяється в провіднику

$$p = r \cdot i^2, \quad (3.11)$$

- де r – активний опір, Ом ;
 i – миттєвий струм, А ;
 p – миттєва потужність, Вт .

Знайдемо кількість тепла (енергії), що виділиться в провіднику за період струму:

$$W = \int_0^T p dt = \int_0^T r i^2 dt = \int_0^T r I_m^2 \sin^2 \omega t dt = r \cdot \frac{I_m^2}{2} \cdot T. \quad (3.12)$$

Замінімо дійсний змінний синусоїдний струм еквівалентним постійним струмом, при якому за період виділиться така ж кількість тепла в тому же провіднику:

$$W = r \cdot I^2 \cdot T, \quad (3.13)$$

де I – еквівалентний постійний струм, A .

Дорівнявши (3.12) до (3.13), знаходимо:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}. \quad (3.14)$$

Величину еквівалентного постійного струму назвали **діючим** значенням змінного синусоїдного струму. За аналогією введемо поняття діючих значень е.р.с. і напруги:

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}}; \quad (3.15)$$

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}. \quad (3.16)$$

Електровимірювальні прилади показують діючі значення вимірюваних величин (струму, напруги).

Приклад 3.5

У колі протікає електричний струм $i = 14,1 \sin(\omega t - 37^\circ) A$.
Визначити показання амперметра, включеного в коло.

Рішення.

Амперметр показує діюче значення струму, яке визначаємо за (3.14), підставивши амплітуду струму:

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

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 знака «мінус».

8. Приведіть приклад використання явища електромагнітної індукції в техніці.
9. Складіть і опишіть конструктивну схему машинного генератора змінного синусоїдного струму.
10. Опишіть принцип дії машинного генератора змінного синусоїдного струму.
11. Поясніть, чому в генераторі наводиться синусоїдна е.р.с., запишіть і розшифруйте її математичний вираз.
12. Запишіть і розшифруйте математичний вираз миттєвої напруги на затискачах ідеального генератора.
13. Як одержати синусоїдний струм?
14. Запишіть і розшифруйте математичний вираз миттєвого синусоїдного струму.
15. Що таке амплітуда струму?
16. Що таке частота струму?
17. Що таке період струму?
18. Що таке кругова частота струму?
19. Що таке початкова фаза струму?
20. Що таке миттєва фаза струму?
21. Як зобразити струм за допомогою радіус-вектора?
22. Поясніть фізичну суть активного опору провідника змінному струму в порівнянні з опором провідника постійному струму.
23. Що таке індуктивність котушки? Від чого вона залежить?
24. Що розуміється під діючим значенням змінного синусоїдного струму? Як його розрахувати через амплітудне значення струму?
25. Як розрахувати діюче значення е.р.с. через амплітудне значення?
26. Як розрахувати діюче значення напруги через амплітудне значення?

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.

3.2 Коло змінного синусоїдного струму з резистором

Складемо принципову електричну схему кола з резистором (рис.3.8).

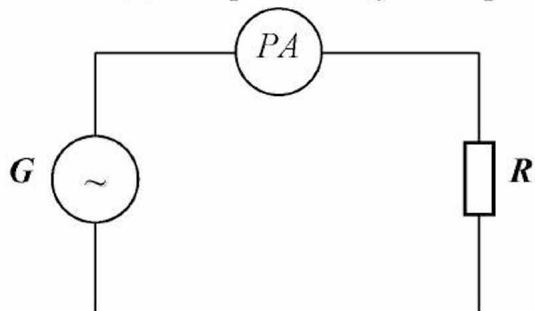


Рис.3.8

G – генератор синусоїдної е.р.с.;

PA – амперметр;

R – резистор.

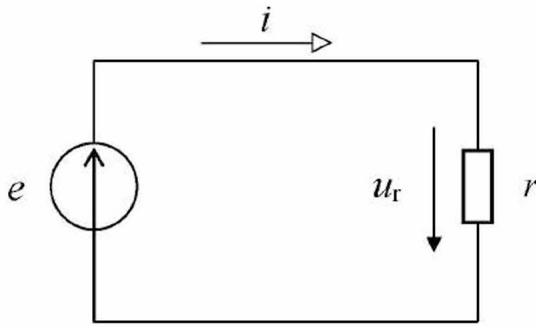


Рис.3.9

Приймаємо генератор ідеальним (який не має активного опору й 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 тепла дія струму (рис.3.9).

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

$$e = E_m \cdot \sin \omega t. \quad (3.17)$$

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

$$u_r = e, \quad (3.18)$$

$$u_r = U_{rm} \cdot \sin \omega t, \quad (3.19)$$

$$U_{rm} = E_m. \quad (3.20)$$

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

$$i = \frac{e}{r}; \quad (3.21)$$

або
$$i = \frac{u_r}{r}. \quad (3.22)$$

Підставляємо вираз напруги (3.19) і одержуємо:

$$i = \frac{U_{rm}}{r} \sin \omega t = I_m \sin \omega t, \quad (3.23)$$

де
$$I_m = \frac{U_{rm}}{r}. \quad (3.24)$$

Для діючих значень:

$$I = \frac{U_r}{r}. \quad (3.25)$$

Покажемо напругу і струм у колі з резистором (на ділянці кола з активним опором) графічно (рис.3.10).

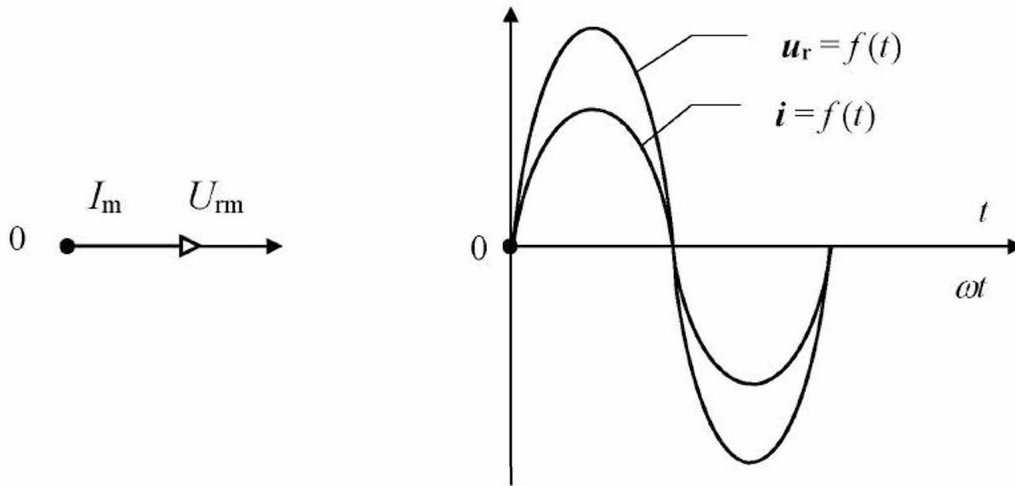


Рис.3.10

Уведемо поняття **кута зсуву фаз**, під яким будемо розуміти абсолютне значення різниці початкових фаз напруги і струму:

$$\varphi = |\psi_{ur} - \psi_i|, \quad (3.26)$$

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

Для ділянки кола з **активним опором**, як видно з (3.19), (3.23) і рис.3.10, кут зсуву фаз дорівнює нулю, тобто напруга і струм на ділянці кола з активним опором збігаються за фазою: $\varphi = 0$.

Знайдемо вираз миттєвої потужності:

$$\begin{aligned} p_r &= u_r \cdot i = U_{\text{m}} \sin \omega t \cdot I_{\text{m}} \sin \omega t = \frac{1}{2} \cdot U_{\text{m}} I_{\text{m}} \cdot (1 - \cos 2\omega t) = \\ &= U_r I \cdot (1 - \cos 2\omega t) = r I^2 \cdot (1 - \cos 2\omega t) . \end{aligned} \quad (3.27)$$

Уведемо поняття **активної потужності**, під якою будемо розуміти середнє значення потужності за період. Знайдемо вираз активної потужності:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T r i^2 dt. \quad (3.28)$$

Підставивши вираз струму (3.23) у (3.28) і перетворивши, одержуємо:

$$P = r \cdot I^2. \quad (3.29)$$

Таким чином, миттєва потужність в активному опорі

$$p_r = P \cdot (1 - \cos 2\omega t). \quad (3.30)$$

Вона завжди позитивна, тобто спрямована від джерела до приймача. Представимо цю залежність графічно (рис.3.11).

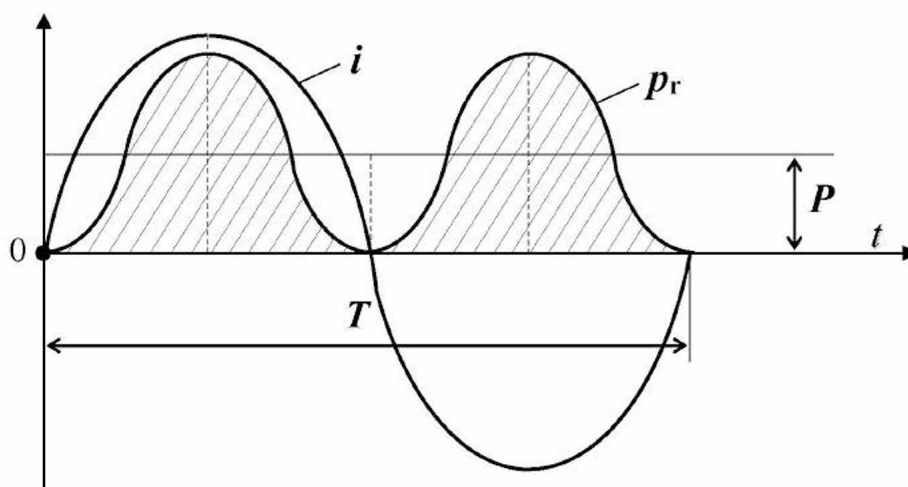


Рис.3.11

Заштрихована площа на рис.3.11 являє собою енергію, що виділяється в резисторі за період:

$$W = \int_0^T p dt = P \cdot T = rI^2 \cdot T. \quad (3.31)$$

Таким чином, активна потужність – це енергія, яка виділяється в активному опорі за одиницю часу:

$$P = \frac{W}{T} = rI^2. \quad (3.32)$$

Приклад 3.6

До резистора підведена напруга $u_r = 141 \sin(\omega t - 30^\circ) \text{ В}$.

Активний опір резистора дорівнює **100 Ом**.

Виконати аналіз ділянки кола.

Рішення.

1. Визначаємо амплітуду струму за (3.24):

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

2. Визначаємо початкову фазу струму:

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

3. Записуємо миттєвий струм:

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

4. Визначаємо діюче значення струму за (3.14):

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

5. Визначаємо активну потужність за (3.32):

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

Запитання для самоконтролю

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

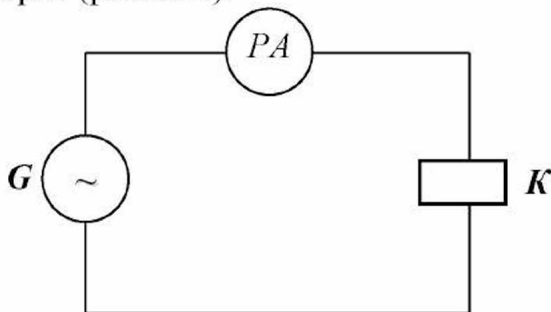
Завдання для самоконтролю

До резистора підведена напруга $u_t = 282 \sin(\omega t + 47^\circ) \text{ В}$.
Активний опір резистора $r = 10 \text{ Ом}$.

1. Записати вираз миттєвого струму.
2. Знайти активну потужність у резисторі.
3. Записати вираз миттєвої потужності в резисторі.
4. Зобразити графічно миттєвий струм і миттєву потужність у функції ωt .

3.3 Коло змінного синусоїдного струму з ідеальною котушкою

Під ідеальною котушкою будемо розуміти таку, у якої активний опір дорівнює нулю. Включимо її в коло з ідеальним генератором синусоїдної е.р.с. (рис.3.12).



G – генератор синусоїдної е.р.с.;

PA – амперметр;

K – котушка.

Рис.3.12

Складемо розрахункову схему кола, нехтуючи опором амперметра і з'єднувальних проводів: генератор виробляє синусоїдну е.р.с., змінний струм у котушці створює змінне магнітне поле (рис.3.13). Буде спостерігатися явище електромагнітної індукції (самоіндукції) і в котушці буде індуктуватися е.р.с. e_L (рис.3.14).

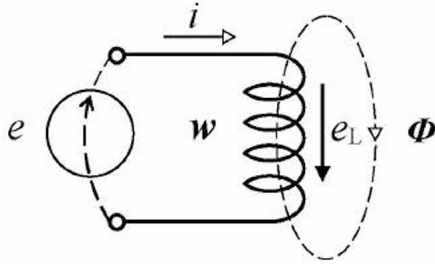


Рис.3.13

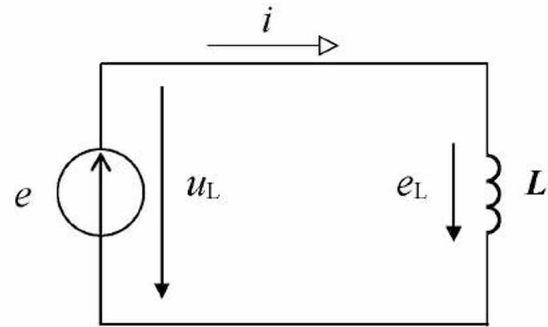


Рис.3.14

Запишемо рівняння електричної рівноваги кола за другим законом Кірхгофа:

$$e + e_L = 0, \quad (3.33)$$

$$e = u_L, \text{ тоді}$$

$$u_L = -e_L. \quad (3.34)$$

Е.р.с. самоіндукції, яка наводиться в котушці, залежить від кількості витків котушки w і швидкості зміни магнітного потоку:

$$e_L = -w \frac{d\Phi}{dt}. \quad (3.35)$$

З урахуванням (3.1) можемо записати:

$$e_L = -L \frac{di}{dt}. \quad (3.36)$$

Підставляємо (3.36) у (3.34) і одержуємо:

$$u_L = L \frac{di}{dt}. \quad (3.37)$$

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

Задамося струмом у колі

$$i = I_m \sin(\omega t - 90^\circ) \quad (3.38)$$

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

$$u_L = L \frac{di}{dt} = L \frac{d}{dt} I_m \sin(\omega t - 90^\circ) = \omega L \cdot I_m \sin \omega t = U_{Lm} \sin \omega t, \quad (3.39)$$

$$\text{де } U_{Lm} = \omega L \cdot I_m. \quad (3.40)$$

Величину ωL позначимо x_L і назвемо **реактивним опором** котушки, тобто

$$x_L = \omega \cdot L. \quad (3.41)$$

Перевіримо одиницю цього опору:

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

Запишемо закон Ома для максимальних значень, виходячи з виразів (3.40) і (3.41) для ділянки кола з індуктивністю:

$$I_m = \frac{U_{Lm}}{x_L}; \quad (3.42)$$

або
$$I_m = \frac{U_{Lm}}{\omega L}. \quad (3.43)$$

Запишемо закон Ома для діючих значень:

$$I = \frac{U_L}{x_L}; \quad (3.44)$$

або
$$I = \frac{U_L}{\omega L}. \quad (3.45)$$

Представимо графічно напругу і струм в індуктивності (рис.3.15).

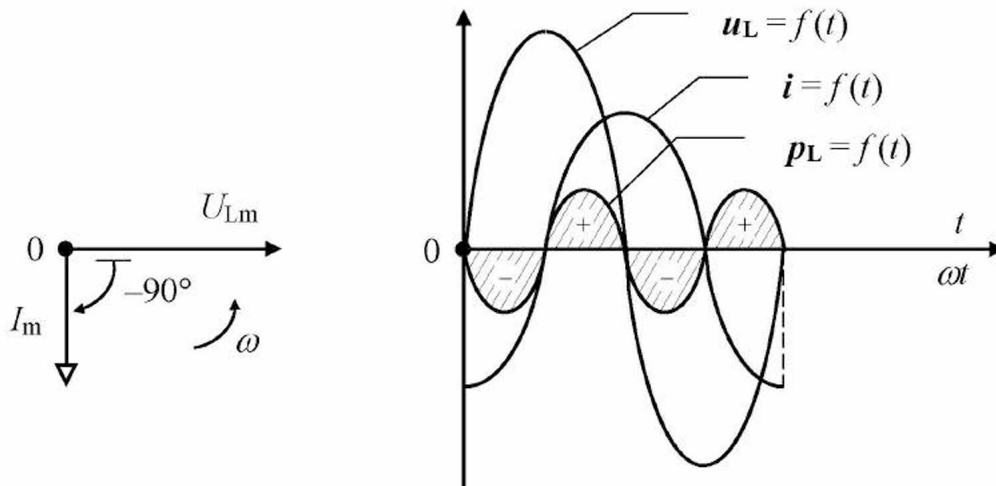


Рис.3.15

Знайдемо кут зсуву фаз між напругою і струмом в індуктивності:

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

Таким чином, струм в індуктивності відстає від напруги за фазою на кут 90° .

Знайдемо миттєву потужність в індуктивності:

$$p_L = u_L \cdot i = U_{Lm} \sin \omega t \cdot I_m \sin(\omega t - 90^\circ) = -\frac{1}{2} \cdot U_{Lm} I_m \cdot \sin 2\omega t =$$

$$= -U_L I \cdot \sin 2\omega t = -x_L I^2 \cdot \sin 2\omega t = -Q_L \cdot \sin 2\omega t, \quad (3.46)$$

$$\text{де } Q_L = x_L \cdot I^2. \quad (3.47)$$

Величину Q_L назвали **реактивною потужністю** котушки, як одиницю уведено:

$$[Q_L] = \text{вар}.$$

Активна потужність в індуктивності як середнє значення потужності за період:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p_L dt = 0. \quad (3.48)$$

Таким чином, енергія в індуктивності не виділяється у вигляді тепла, а відбувається обмін енергією між джерелом і приймачем.

Розглянемо цей процес на графіку (рис.3.15). У першу чверть періоду, коли струм зростає, збільшується магнітний потік і магнітне поле накопичує енергію (позитивна заштрихована площа), миттєва потужність позитивна і спрямована від джерела до приймача. В другу чверть періоду, коли струм знижується, магнітний потік зменшується і магнітне поле віддає енергію джерелу (негативна заштрихована площа), миттєва потужність негативна і спрямована від приймача до джерела.

Таким чином, миттєва потужність коливається з подвійною частотою – за половину періоду струму миттєва потужність здійснює повне коливання.

Приклад 3.7

До ідеальної котушки підведена напруга $u_L = 141 \sin(\omega t + 73^\circ) \text{ В}$.

Частота струму в мережі дорівнює **50 Гц**.

Індуктивність котушки дорівнює **12,7 мГн**.

Виконати аналіз ділянки кола.

Рішення.

1. Визначаємо індуктивний опір котушки за (3.41):

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

2. Визначаємо амплітуду струму за (3.43):

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

3. Визначаємо початкову фазу струму:

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

4. Записуємо миттєвий струм:

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

5. Визначаємо діюче значення струму за (3.14):

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

6. Визначаємо реактивну потужність за (3.47):

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

Запитання для самоконтролю

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

Завдання для самоконтролю

До ідеальної котушки підведена напруга $u_L = 141 \sin(\omega t + 73^\circ) \text{ В}$.

Індуктивність котушки дорівнює **25,4 мГн**.

Частота струму в колі **f = 50 Гц**.

1. Знайти реактивний опір котушки.
2. Записати миттєве значення струму.
3. Знайти реактивну потужність.
4. Записати вираз миттєвої потужності в індуктивності.
5. Зобразити графічно миттєвий струм і миттєву потужність у функції ωt .

3.4 Коло змінного синусоїдного струму з ідеальним конденсатором

Під ідеальним конденсатором будемо розуміти такий, у якого активний опір дорівнює нескінченності. Включимо його в коло з ідеальним генератором (рис.3.16).

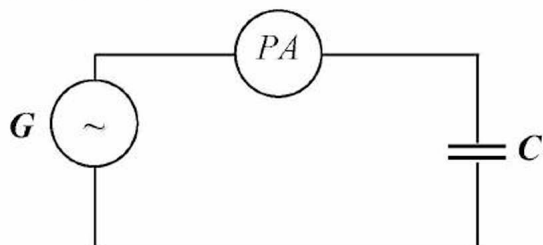


Рис.3.16

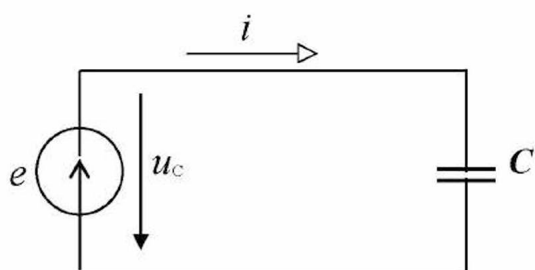


Рис.3.17

G – генератор;

PA – амперметр;

C – конденсатор.

Складемо розрахункову схему кола, прийнявши, що опори амперметра і з'єднувальних проводів дорівнюють нулю: генератор виробляє синусоїдну е.р.с., змінний струм у колі створює змінне електричне поле в конденсаторі (рис.3.17).

Напруга на ємності

$$u_c = e. \quad (3.49)$$

Задамося струмом у колі

$$i = I_m \sin(\omega t + 90^\circ) \quad (3.50)$$

і знайдемо, якою повинна бути в цьому випадку напруга на затискачах генератора.

Заряд на обкладках конденсатора

$$q = C \cdot u_c, \quad (3.51)$$

де q – заряд конденсатора, Кл;
 C – ємність конденсатора, Ф;
 u_c – напруга на конденсаторі, В.

Струм у колі

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du_c}{dt}, \quad (3.52)$$

звідки

$$u_c = \frac{1}{C} \int i dt = \frac{1}{C} \int I_m \sin(\omega t + 90^\circ) = \frac{1}{\omega C} \cdot I_m \sin \omega t = U_{cm} \sin \omega t, \quad (3.53)$$

де

$$U_{cm} = \frac{1}{\omega C} \cdot I_m. \quad (3.54)$$

Величину $\frac{1}{\omega C}$ позначимо x_c і назвемо **реактивним опором** конденсатора, тобто

$$x_c = \frac{1}{\omega C}. \quad (3.55)$$

Перевіримо одиницю цього опору:

$$[x_c] = \frac{1}{\frac{1}{c} \cdot \Phi} = \frac{c}{\frac{Kл}{B}} = \frac{B \cdot c}{Kл} = \frac{B \cdot c}{A \cdot c} = Ом.$$

Запишемо закон Ома для максимальних значень, виходячи з виразів (3.54) і (3.55):

$$I_m = \frac{U_{cm}}{x_c}; \quad (3.56)$$

або
$$I_m = \frac{U_{cm}}{\frac{1}{\omega C}}. \quad (3.57)$$

Запишемо закон Ома для діючих значень:

$$I = \frac{U_c}{x_c}; \quad (3.58)$$

або
$$I = \frac{U_c}{\frac{1}{\omega C}}. \quad (3.59)$$

Представимо графічно напругу і струм у ємності (рис.3.18).

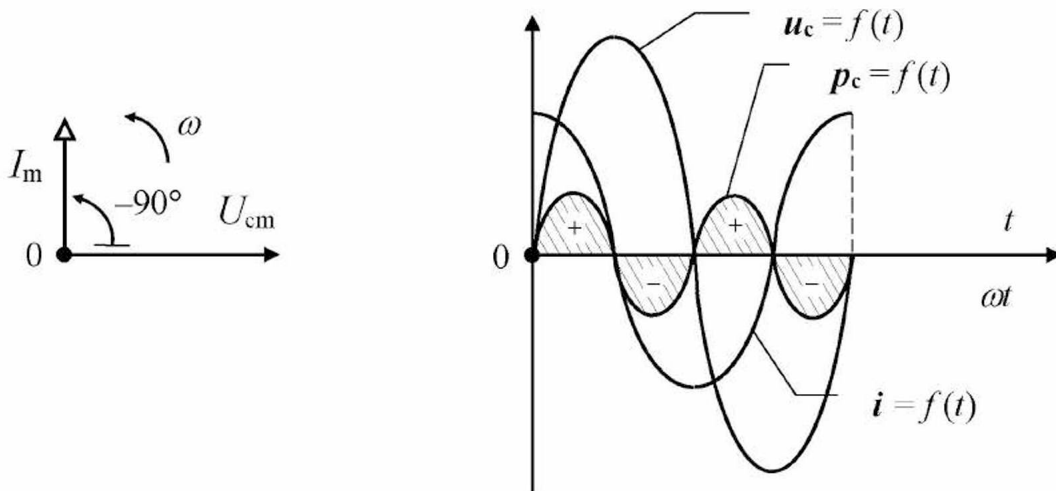


Рис.3.18

Знайдемо кут зсуву фаз між напругою і струмом у ємності:

$$\varphi = |\psi_{u_c} - \psi_i| = |0 - 90^\circ| = 90^\circ.$$

Таким чином, струм у ємності випереджає напругу за фазою на кут 90° .

Знайдемо миттєву потужність у ємності:

$$\begin{aligned} p_c &= u_c \cdot i = U_{\text{cm}} \sin \omega t \cdot I_m \sin(\omega t + 90^\circ) = \frac{1}{2} \cdot U_{\text{cm}} I_m \sin 2\omega t = \\ &= U_c I \cdot \sin 2\omega t = x_c I^2 \cdot \sin 2\omega t = Q_c \cdot \sin 2\omega t, \end{aligned} \quad (3.60)$$

де $Q_c = x_c \cdot I^2$. (3.61)

Величину Q_c назвали **реактивною потужністю** ємності, як одиницю уведено:

$$[Q_c] = \text{вар}.$$

Активна потужність у ємності як середнє значення потужності за період:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p_c dt = 0. \quad (3.62)$$

Отже, енергія в ємності не виділяється, а відбувається обмін енергією між джерелом і приймачем.

Розглянемо цей процес на графіку (рис.3.18). У першу чверть періоду, коли напруга на обкладинках конденсатора зростає, енергія запасається в електричному полі конденсатора (позитивна заштрихована площа), миттєва потужність позитивна і спрямована від джерела до приймача. В другу чверть періоду, коли напруга зменшується, електричне поле віддає енергію джерелу (негативна заштрихована площа), миттєва потужність негативна і спрямована від приймача до джерела.

Таким чином, миттєва потужність коливається з подвійною частотою – за половину періоду напруги миттєва потужність здійснює повне коливання.

Приклад 3.8

До ідеального конденсатора підведена напруга $u_c = 282 \sin(\omega t - 30^\circ)$ В.

Частота струму в мережі дорівнює **50 Гц**.

Ємність конденсатора дорівнює **159 мкФ**.

Виконати аналіз ділянки кола.

Рішення.

1. Визначаємо ємнісний опір конденсатора за (3.56):

$$X_c = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 159 \cdot 10^{-6}} = 20 \text{ Ом}.$$

2. Визначаємо амплітуду струму за (3.56):

$$I_m = \frac{282}{20} = 14,1 \text{ А}.$$

3. Визначаємо початкову фазу струму:

$$\psi_i = \psi_{u_c} + 90 = -30 + 90 = 60^\circ.$$

4. Записуємо миттєвий струм:

$$i = 14,1 \sin(\omega t + 60^\circ) \text{ А}.$$

5. Визначаємо діюче значення струму за (3.14):

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

6. Визначаємо реактивну потужність за (3.61):

$$Q_c = 20 \cdot 10^2 = 2000 \text{ вар} = 2,0 \text{ квар}.$$

Запитання для самоконтролю

1. Опишіть фізичні явища, які спостерігаються в ідеальному конденсаторі в колі синусоїдного струму.
2. Складіть розрахункову схему кола з ідеальним генератором і ідеальним конденсатором.
3. Запишіть математичний зв'язок між миттєвою напругою, миттєвим струмом і ємністю в ідеальному конденсаторі.
4. Поясніть фізичну суть ємнісного опору.
Як розрахувати ємнісний опір ідеального конденсатора?
5. Сформулюйте і математично запишіть закон Ома для максимальних і діючих значень напруги і струму на ділянці кола з ємністю.
6. Запишіть математичний вираз миттєвого струму в ємності, прийнявши, що початкова фаза дорівнює нулю.
7. Запишіть математичний вираз миттєвої напруги на ємності для зазначеного вище струму.
8. Побудуйте графічно оригінали миттєвої напруги і миттєвого струму на ділянці кола з ємністю.
9. Зобразіть напругу і струм за допомогою векторів.
10. Чому дорівнює кут зсуву фаз у ємності?

11. Отримайте математичний вираз миттєвої потужності в ємності.
З якою частотою коливається миттєва потужність у ємності?
12. Чому дорівнює активна потужність у ємності?
13. Як розрахувати реактивну потужність у ємності? Укажіть її одиницю.
14. Поясніть фізичну суть реактивної потужності в ємності.

Завдання для самоконтролю

До ідеального конденсатора підведена напруга $u_c = 282 \sin(\omega t + 47^\circ) \text{ В}$.
Ємність конденсатора дорівнює **318 мкФ**. Частота струму в колі $f = 50 \text{ Гц}$.

1. Знайти реактивний опір конденсатора.
2. Записати миттєве значення струму.
3. Знайти реактивну потужність у ємності.
4. Записати вираз миттєвої потужності в ємності.
5. Зобразити графічно миттєву напругу і миттєву потужність у функції ωt .

3.5 Реальна котушка в колі змінного синусоїдного струму

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

- під дією синусоїдної е.р.с. джерела в котушці протікає струм i ;
- спостерігається теплова дія 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 e_L .

Складемо розрахункову схему кола котушки (рис.3.19).

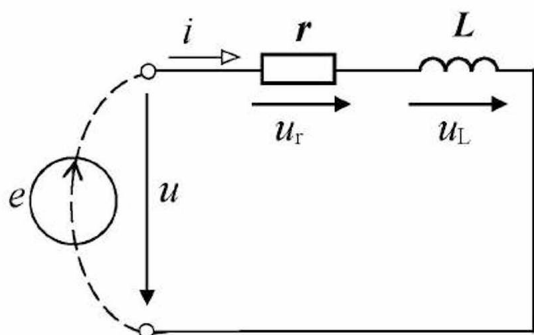


Рис.3.19

Запишемо рівняння електричної рівноваги для цього кола:

$$u = u_r + u_L, \quad (3.63)$$

$$u = r \cdot i + L \frac{di}{dt}. \quad (3.64)$$

Задамося струмом у колі

$$i = I_m \sin \omega t \quad (3.65)$$

і знайдемо, якою повинна бути в цьому випадку прикладена напруга u , для чого підставимо значення струму в (3.64):

$$u = rI_m \sin \omega t + L \frac{d}{dt} I_m \sin \omega t = rI_m \sin \omega t + \omega LI_m \sin(\omega t + 90^\circ). \quad (3.66)$$

Позначимо згідно (3.24) і (3.40)

$$U_{\text{m}} = rI_{\text{m}}, \quad (3.67)$$

$$U_{\text{Lm}} = \omega LI_{\text{m}} = x_{\text{L}}I_{\text{m}} \quad (3.68)$$

і перепишемо рівняння (3.66) у наступному вигляді:

$$u = U_{\text{m}} \sin \omega t + U_{\text{Lm}} \sin(\omega t + 90^\circ). \quad (3.69)$$

Запишемо миттєву прикладену напругу в загальному вигляді:

$$u = U_{\text{m}} \sin(\omega t + \psi_{\text{u}}). \quad (3.70)$$

Побудуємо векторну діаграму струму і напруги цього кола (рис.3.20).

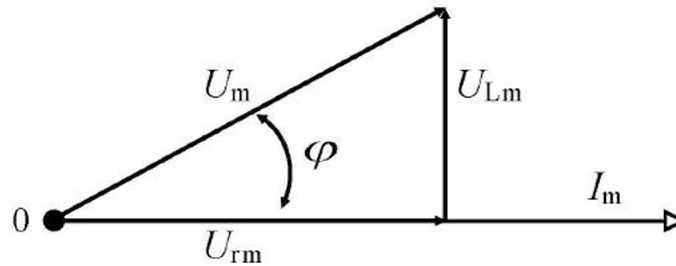


Рис.3.20

Таким чином, $\psi_{\text{u}} = \psi_{\text{i}} + \varphi$ і миттєва напруга на затискачах кола записується так:

$$u = U_{\text{m}} \sin(\omega t + \psi_{\text{i}} + \varphi), \quad (3.71)$$

а через те, що в даному випадку $\psi_{\text{i}} = 0$, то $\psi_{\text{u}} = \varphi$.

Розглянемо трикутник напруг на векторній діаграмі (рис.3.21).

Запишемо вирази сторін трикутника:

$$U_{\text{m}} = rI_{\text{m}}, \quad (3.72)$$

$$U_{\text{Lm}} = \omega LI_{\text{m}} = x_{\text{L}}I_{\text{m}}, \quad (3.73)$$

$$U_{\text{m}} = zI_{\text{m}}, \quad (3.74)$$

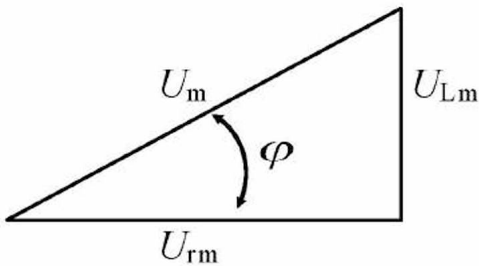


Рис.3.21

де r – активний опір котушки, Ом;
 x – реактивний опір котушки, Ом;
 z – повний опір котушки
 (вводимо таке поняття за аналогією з r і x), Ом.

Розділимо сторони трикутника напруг на I_{m} і одержимо трикутник опорів (рис.3.22).

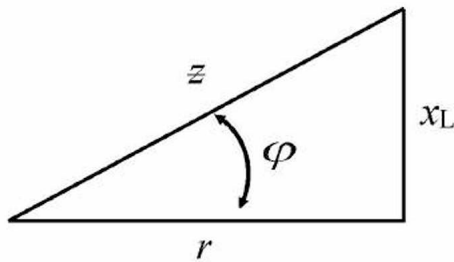


Рис.3.22

Як видно з рис.3.22, повний опір кола котушки змінному струму

$$z = \sqrt{r^2 + x_L^2}. \quad (3.75)$$

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

$$\varphi = \arccos \frac{r}{z}. \quad (3.76)$$

Помножимо сторони трикутника опорів на квадрат діючого значення струму й одержимо трикутник потужностей (рис.3.23).

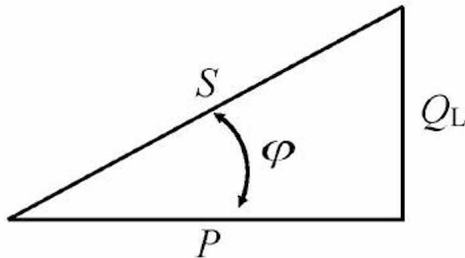


Рис.3.23

Сторони трикутника являють собою потужності:

$$\text{активну } P = rI^2, \text{ Вт}; \quad (3.76)$$

$$\text{реактивну } Q_L = x_L I^2, \text{ вар}; \quad (3.77)$$

$$\text{повну } S = z I^2, \text{ ва}. \quad (3.78)$$

Уведемо поняття **коефіцієнта потужності**, під яким будемо розуміти **відношення активної потужності до повної** $\frac{P}{S}$.

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

$$\frac{P}{S} = \cos \varphi. \quad (3.79)$$

Таким чином, реальну котушку можна розглядати одночасно як резистор – з однієї сторони і як ідеальну котушку – з іншої. Усі процеси можна описати за допомогою двох ідеальних елементів – активного опору й індуктивності, які описані в п.3.2 і 3.3.

Приклад 3.9

До реальної котушки підведена напруга $u = 282 \sin(\omega t + 70^\circ) \text{ В}$.

Активний опір котушки дорівнює **3 Ом**.

Реактивний опір котушки дорівнює **4 Ом**.

Виконати аналіз кола.

Рішення.

1. Визначаємо повний опір кола за (3.75):

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

2. Визначаємо амплітуду струму за (3.74):

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

3. Визначаємо кут зсуву фаз кола за (3.76):

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

4. Визначаємо початкову фазу струму:

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

5. Записуємо миттєвий струм:

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

6. Визначаємо амплітуду напруги на активному опорі за (3.72):

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

7. Визначаємо початкову фазу напруги на активному опорі:

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

8. Записуємо миттєву напругу на активному опорі:

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

9. Визначаємо амплітуду напруги на індуктивному опорі за (3.73):

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

10. Визначаємо початкову фазу напруги на індуктивному опорі:

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

11. Записуємо миттєву напругу на індуктивному опорі:

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

12. Визначаємо діюче значення струму за (3.14):

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

13. Визначаємо активну потужність за (3.76):

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

14. Визначаємо реактивну потужність за (3.77):

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

15. Визначаємо повну потужність за (3.78):

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

16. Визначаємо коефіцієнт потужності котушки за (3.79):

$$\frac{P}{S} = \cos \varphi = \cos 53^\circ \approx 0,6.$$

Запитання для самоконтролю

1. Опишіть фізичні явища, які спостерігаються в реальній котушці в колі змінного 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 струму в колі, прийнявши, що початкова фаза дорівнює нулю.
5. Отримайте вираз миттєвої напруги на затискачах кола, підставивши в рівняння електричної рівноваги вираз миттєвого струму в колі.
6. Побудуйте векторну діаграму струму і напруг кола (для діючих значень).
7. Запишіть вираз миттєвої 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 $u = 282(\omega t + 70^\circ) \text{ В}$. Частота струму в колі $f = 50 \text{ Гц}$.

1. Знайти індуктивний опір котушки.
2. Знайти повний опір котушки.
3. Знайти кут зсуву фаз котушки.
4. Знайти амплітуду струму в котушці.
5. Записати миттєве значення струму в котушці.
6. Знайти амплітуду напруги на активному опорі.
7. Записати миттєве значення напруги на активному опорі.
8. Знайти амплітуду напруги на індуктивності.
9. Записати миттєве значення напруги на індуктивності.
10. Побудувати векторну діаграму напруг і струму кола.
11. Знайти активну потужність котушки.
12. Знайти реактивну потужність котушки.

13. Знайти повну потужність котушки.
 14. Знайти коефіцієнт потужності котушки.

3.6 Коло змінного синусоїдного струму з резистором і конденсатором

Включимо послідовно резистор і конденсатор у коло змінного синусоїдного струму (рис.3.24).

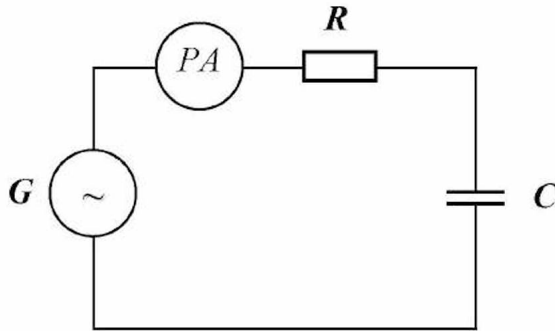


Рис.3.24

- G – генератор;
 PA – амперметр;
 R – резистор;
 C – конденсатор.

Складемо розрахункову схему кола (рис.3.25).

Задамося струмом у колі

$$i = I_m \sin \omega t \quad (3.80)$$

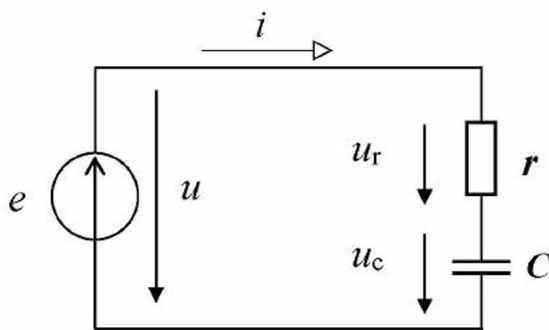


Рис.3.25

і знайдемо, якою повинна бути в цьому випадку прикладена напруга, для чого запишемо рівняння електричної рівноваги кола за другим законом Кірхгофа для миттєвих значень:

$$e = u_r + u_c, \quad (3.81)$$

$$e = u, \quad (3.82)$$

$$u = u_r + u_c. \quad (3.83)$$

Відповідно до (3.22) і (3.52) одержуємо:

$$u = ri + \frac{1}{C} \int idt. \quad (3.84)$$

Підставляємо значення струму (3.80) і одержуємо:

$$u = rI_m \sin \omega t + \frac{1}{\omega C} I_m \sin(\omega t - 90^\circ) = \quad (3.85)$$

$$= U_{rm} \sin \omega t + U_{cm} \sin(\omega t - 90^\circ), \quad (3.86)$$

де $U_{rm} = rI_m,$

$$U_{cm} = x_c I_m. \quad (3.87)$$

Побудуємо векторну діаграму струму і напруг цього кола (рис.3.26).

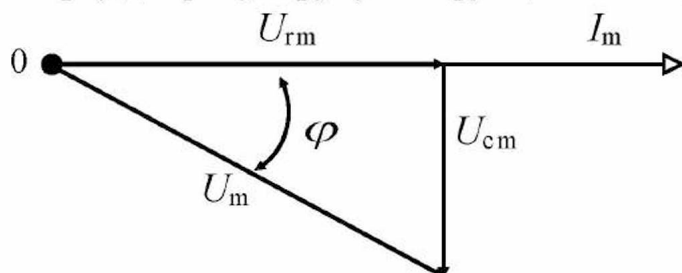


Рис.3.26

Запишемо миттєву прикладену напругу:

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_i - \varphi) = U_m \sin(\omega t - \varphi), \quad (3.88)$$

тому що $\psi_i = 0$.

Таким чином, у даному колі прикладена напруга відстає від струму на кут зсуву фаз φ або навпаки – струм випереджає напругу на кут зсуву фаз φ .

Розглянемо трикутник напруг (рис.3.27).

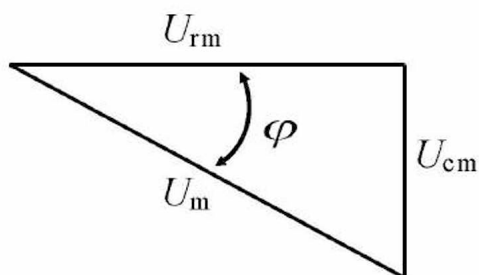


Рис.3.27

Запишемо вирази сторін трикутника:

$$U_m = r I_m, \quad (3.89)$$

$$U_{cm} = x_c I_m, \quad (3.90)$$

$$U_m = z I_m, \quad (3.91)$$

де r – активний опір кола, Ом;

x_c – ємнісний опір кола, Ом;

z – повний опір кола, Ом.

Розділивши сторони трикутника напруг на I_m , одержимо трикутник опорів (рис.3.28).

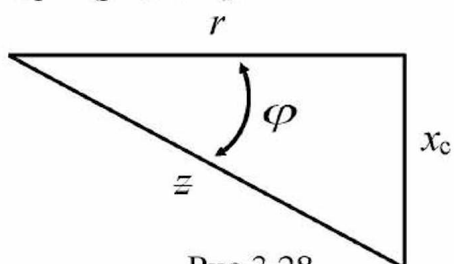


Рис.3.28

Запишемо повний опір кола:

$$z = \sqrt{r^2 + x_c^2} = \sqrt{r^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}. \quad (3.92)$$

Запишемо закон Ома для максимальних і діючих значень струму і напруги з (3.91):

$$I_m = \frac{U_m}{z}; \quad (3.93)$$

$$I = \frac{U}{z}. \quad (3.94)$$

Помножимо сторони трикутника опорів на квадрат діючого значення струму й одержимо трикутник потужностей (рис.3.29).

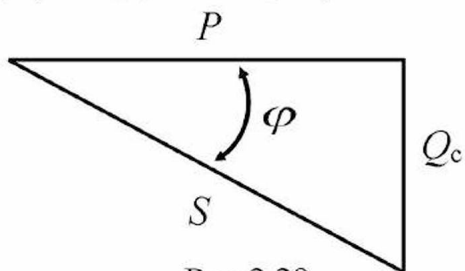


Рис.3.29

Запишемо потужності:

$$P = rI^2, \text{ Вт}; \quad (3.95)$$

$$Q_c = x_c I^2, \text{ вар}; \quad (3.96)$$

$$S = \xi I^2, \text{ ва}. \quad (3.97)$$

Коефіцієнт потужності як відношення активної потужності до повної:

$$\frac{P}{S} = \cos \varphi. \quad (3.98)$$

Кут зсуву фаз за параметрами кола може бути знайдений у такий спосіб:

$$\varphi = \arccos \frac{r}{\xi}. \quad (3.99)$$

Приклад 3.10

До кола, яке складається з послідовно з'єднаних резистора і конденсатора, підведена напруга $u = 141 \sin(\omega t - 30^\circ) \text{ В}$.

Активний опір кола дорівнює **8 Ом**.

Реактивний опір кола дорівнює **6 Ом**.

Виконати аналіз кола.

Рішення.

1. Визначаємо повний опір кола за (3.92):

$$z = \sqrt{6^2 + 8^2} = 10 \text{ Ом}.$$

2. Визначаємо амплітуду струму за (3.93):

$$I_m = \frac{141}{10} = 14,1 \text{ А}.$$

3. Визначаємо кут зсуву фаз кола за (3.99):

$$\varphi = \arccos \frac{8}{10} \approx 37^\circ.$$

4. Визначаємо початкову фазу струму:

$$\psi_i = \psi_u + \varphi = -30 + 37 = 7^\circ.$$

5. Записуємо миттєвий струм:

$$i = 14,1 \sin(\omega t + 7^\circ) \text{ А}.$$

6. Визначаємо амплітуду напруги на активному опорі за (3.89):

$$U_{rm} = 8 \cdot 14,1 = 112,8 \text{ В.}$$

7. Визначаємо початкову фазу напруги на активному опорі:

$$\psi_{ur} = \psi_1 = 7^\circ.$$

8. Записуємо миттєву напругу на активному опорі:

$$u_r = 112,8 \sin(\omega t + 7^\circ) \text{ В.}$$

9. Визначаємо амплітуду напруги на ємнісному опорі за (3.90):

$$U_{cm} = 6 \cdot 14,1 = 84,6 \text{ В.}$$

10. Визначаємо початкову фазу напруги на ємнісному опорі:

$$\psi_{uc} = \psi_1 - 90 = 7 - 90 = -83^\circ.$$

11. Записуємо миттєву напругу на ємнісному опорі:

$$u_c = 84,6 \sin(\omega t - 83^\circ) \text{ В.}$$

12. Визначаємо діюче значення струму за (3.14):

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

13. Визначаємо активну потужність, яку споживає коло, за (3.95):

$$P = 8 \cdot 10^2 = 800 \text{ Вт} = 0,8 \text{ кВт.}$$

14. Визначаємо реактивну потужність, яку споживає коло, за (3.96):

$$Q_c = 6 \cdot 10^2 = 600 \text{ вар} = 0,6 \text{ квар.}$$

15. Визначаємо повну потужність, яку споживає коло, за (3.97):

$$S = 10 \cdot 10^2 = 1000 \text{ ва} = 1,0 \text{ ква.}$$

16. Визначаємо коефіцієнт потужності кола за (3.98):

$$\frac{P}{S} = \cos \varphi = \cos 37^\circ \approx 0,8.$$

Запитання для самоконтролю

1. Опишіть фізичні явища, які спостерігаються в реальному конденсаторі в колі змінного синусоїдного струму.
2. Складіть розрахункову схему кола з ідеальним генератором і реальним конденсатором.

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

Завдання для самоконтролю

До джерела синусоїдної напруги $u = 282 \sin(\omega t + 47^\circ)$ В підключені послідовно з'єднані резистор і конденсатор. Активний опір кола дорівнює **8 Ом**, ємнісний опір конденсатора дорівнює **6 Ом**.

1. Знайти повний опір кола.
2. Знайти кут зсуву фаз кола.
3. Знайти амплітуду струму в колі.
4. Записати миттєве значення струму в колі.
5. Знайти амплітуду напруги на активному опорі.
6. Записати миттєве значення напруги на активному опорі.
7. Знайти амплітуду напруги на ємності.
8. Записати миттєве значення напруги на ємності.
9. Побудувати векторну діаграму напруг і струму кола.
10. Знайти активну потужність кола.
11. Знайти реактивну потужність кола.
12. Знайти повну потужність кола.
13. Знайти коефіцієнт потужності кола.

3.7 Коло змінного синусоїдного струму з послідовно з'єднаними котушкою і конденсатором

Підключимо до ідеального джерела синусоїдної е.р.с. послідовно котушку і конденсатор (рис.3.30).

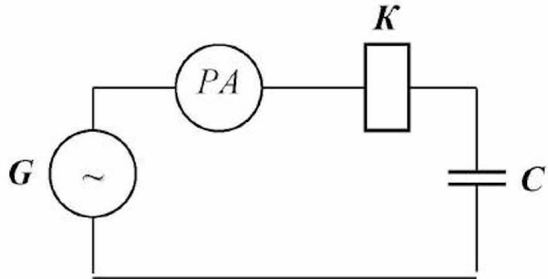


Рис.3.30

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

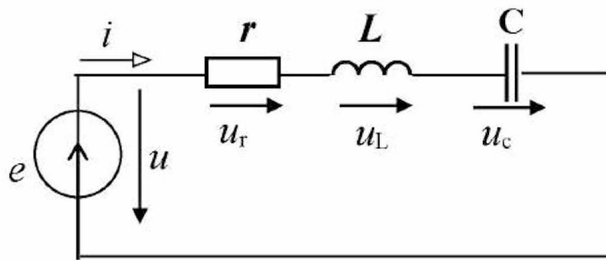


Рис.3.31

Складемо розрахункову схему кола, приймаючи до уваги, що в кожному елементі кола спостерігаються фізичні явища і процеси, які описані в п.3.5 і п.3.6 (рис.3.31).

Задамося струмом у колі

$$i = I_m \sin \omega t \quad (3.100)$$

і знайдемо, якою повинна бути в цьому випадку напруга на затискачах джерела, для чого спочатку запишемо рівняння електричної рівноваги кола для миттєвих значень:

$$u = r \cdot i + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt. \quad (3.101)$$

Підставимо значення струму й одержимо:

$$\begin{aligned} u &= r \cdot I_m \sin \omega t + \omega L \cdot I_m \sin(\omega t + 90^\circ) + \frac{1}{\omega C} \cdot I_m \sin(\omega t - 90^\circ) = \\ &= U_m \sin \omega t + U_{Lm} \sin(\omega t + 90^\circ) + U_{cm} \sin(\omega t - 90^\circ), \end{aligned} \quad (3.102)$$

де

$$U_m = r \cdot I_m; \quad (3.103)$$

$$U_{Lm} = \omega L \cdot I_m; \quad (3.104)$$

$$U_{cm} = \frac{1}{\omega C} \cdot I_m. \quad (3.105)$$

Побудуємо векторну діаграму струму і напруг цього кола (рис.3.32).

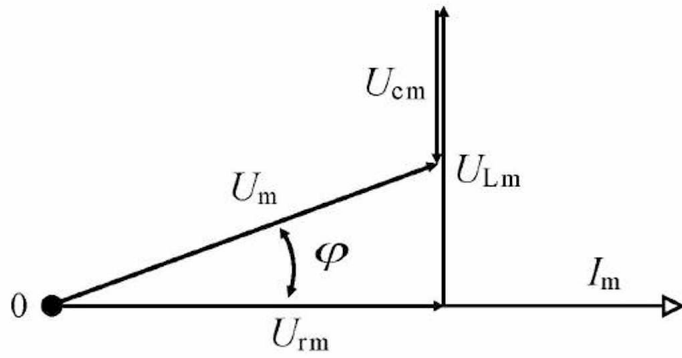


Рис.3.32

Розглянемо трикутник напруг на векторній діаграмі (рис.3.33).

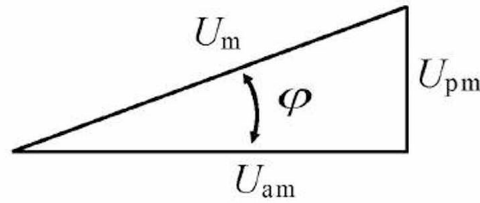


Рис.3.33

Уведемо поняття активної складової напруги

$$U_{am} = U_{fm}, \quad (3.106)$$

і реактивної складової напруги

$$U_{pm} = U_{lm} - U_{cm}. \quad (3.107)$$

Активна складова напруги

$$U_{am} = rI_m. \quad (3.108)$$

Реактивна складова напруги

$$U_{pm} = (x_L - x_c) \cdot I_m = x \cdot I_m, \quad (3.109)$$

де x – реактивний опір кола, Ом.

Якщо $x_L > x_c$, то реактивний опір кола буде носити індуктивний характер, якщо $x_L < x_c$, то реактивний опір кола буде носити ємнісний характер, тобто в першому випадку еквівалентною схемою кола (розрахунковою) буде наступна (рис.3.34):

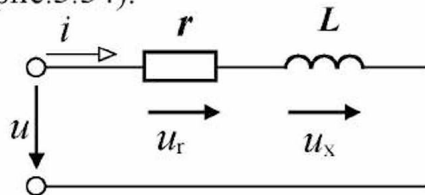


Рис.3.34

В другому випадку еквівалентна розрахункова схема кола буде мати такий вигляд (рис.3.35):

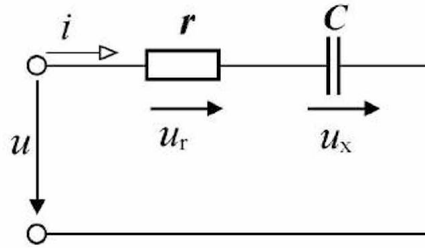


Рис.3.35

Розділимо сторони трикутника напруг на I_m і одержимо трикутник опорів (рис.3.36).

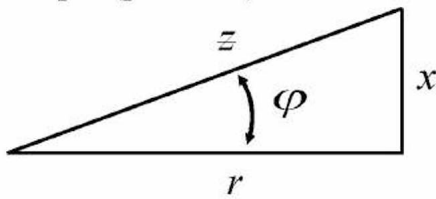


Рис.3.36

Повний опір кола

$$z = \sqrt{r^2 + x^2} = \sqrt{r^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}. \quad (3.110)$$

Запишемо закон Ома для максимальних значень напруги і струму:

$$I_m = \frac{U_m}{z}, \quad (3.111)$$

для діючих значень напруги і струму:

$$I = \frac{U}{z}. \quad (3.112)$$

Помножимо сторони трикутника опорів на квадрат діючого значення струму й одержимо трикутник потужностей (рис.3.37).

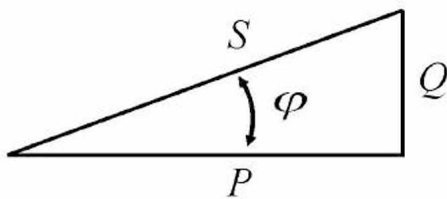


Рис.3.37

У даному випадку:

$$P = rI^2, \text{ Вт}; \quad (3.113)$$

$$Q = xI^2, \text{ вар}; \quad (3.114)$$

$$S = zI^2, \text{ ва}. \quad (3.115)$$

Коефіцієнт потужності кола

$$\frac{P}{S} = \cos \varphi. \quad (3.116)$$

Кут зсуву фаз кола

$$\varphi = \arccos \frac{r}{z}. \quad (3.117)$$

Приклад 3.11

До кола, що складається з послідовно з'єднаних котушки і конденсатора, підведена напруга $u = 282 \sin(\omega t + 80^\circ)$ В.

Активний опір кола дорівнює **6 Ом**.

Індуктивний опір кола дорівнює **20 Ом**.

Ємнісний опір кола дорівнює **12 Ом**.

Виконати аналіз кола.

Рішення.

1. Визначаємо повний опір кола за (3.110):

$$z = \sqrt{6^2 + (20 - 12)^2} = 10 \text{ Ом.}$$

2. Визначаємо амплітуду струму за (3.111):

$$I_m = \frac{282}{10} = 28,2 \text{ А.}$$

3. Визначаємо кут зсуву фаз кола за (3.117):

$$\varphi = \arccos \frac{6}{10} \approx 53^\circ.$$

4. Визначаємо реактивний опір кола, використовуючи (3.109),

і його характер:

$$x = 20 - 12 = 8 \text{ Ом.}$$

Реактивний опір кола носить індуктивний характер, тому що $20 > 12$.

5. Визначаємо початкову фазу струму:

$$\psi_i = \psi_u - \varphi = 80 - 53 = 27^\circ.$$

6. Записуємо миттєвий струм:

$$i = 28,2 \sin(\omega t + 27^\circ) \text{ А.}$$

7. Визначаємо амплітуду активної складової напруги за (3.108):

$$U_{am} = U_{rm} = 6 \cdot 28,2 = 169,2 \text{ В.}$$

8. Визначаємо початкову фазу активної складової напруги:

$$\psi_{ur} = \psi_i = 27^\circ.$$

9. Записуємо миттєву напругу на активному опорі:

$$u_r = 169,2 \sin(\omega t + 27^\circ) \text{ В.}$$

10. Визначаємо амплітуду напруги на індуктивному опорі за (3.73):

$$U_{Lm} = 20 \cdot 28,2 = 564 \text{ В.}$$

11. Визначаємо початкову фазу напруги на індуктивному опорі:

$$\psi_{uL} = \psi_i + 90 = 27 + 90 = 117^\circ.$$

12. Записуємо миттєву напругу на індуктивному опорі:

$$u_L = 564 \sin(\omega t + 117^\circ) \text{ В.}$$

13. Визначаємо амплітуду напруги на ємнісному опорі за (3.90):

$$U_{cm} = 12 \cdot 28,2 = 338,4 \text{ В.}$$

14. Визначаємо початкову фазу напруги на ємнісному опорі:

$$\psi_{uc} = \psi_L - 90 = 27 - 90 = -63^\circ.$$

15. Записуємо миттєву напругу на ємнісному опорі:

$$u_c = 338,4 \sin(\omega t - 63^\circ) \text{ В.}$$

16. Визначаємо амплітуду реактивної складової напруги за (3.107):

$$U_{pm} = 564 - 338,4 = 225,6 \text{ В.}$$

17. Визначаємо діюче значення струму за (3.14):

$$I = \frac{28,2}{\sqrt{2}} = 20 \text{ А.}$$

18. Визначаємо активну потужність, яку споживає коло, за (3.113):

$$P = 6 \cdot 20^2 = 2400 \text{ Вт} = 2,4 \text{ кВт.}$$

19. Визначаємо реактивну потужність, яку споживає коло, за (3.114):

$$Q = 8 \cdot 20^2 = 3200 \text{ вар} = 3,2 \text{ квар.}$$

20. Визначаємо повну потужність, яку споживає коло, за (3.115):

$$S = 10 \cdot 20^2 = 4000 \text{ ва} = 4,0 \text{ ква.}$$

21. Визначаємо коефіцієнт потужності кола за (3.116):

$$\frac{P}{S} = \cos \varphi = \cos 53^\circ \approx 0,6.$$

Запитання для самоконтролю

1. Опишіть фізичні явища, які спостерігаються в колі змінного синусоїдного струму з послідовним з'єднанням реальної котушки й ідеального конденсатора.
2. Складіть розрахункову схему кола з ідеальним генератором, реальною котушкою й ідеальним конденсатором.
3. Складіть рівняння електричної рівноваги кола синусоїдного струму з реальною котушкою й ідеальним конденсатором.
4. Запишіть вираз миттєвого струму в колі, прийнявши, що початкова фаза дорівнює нулю.
5. Отримайте вираз миттєвої напруги на затискачах кола, підставивши в рівняння електричної рівноваги вираз миттєвого струму в колі.
6. Побудуйте векторну діаграму струму і напруг кола (для діючих значень).
7. Запишіть вираз миттєвої напруги на затискачах кола, використовуючи векторну діаграму, з урахуванням кута зсуву фаз.

8. Отримайте з векторної діаграми і побудуйте трикутник діючих значень напруг кола.
9. Що розуміється під активною складовою напруги кола?
10. Що розуміється під реактивною складовою напруги кола?
11. Перетворіть трикутник напруг у трикутник опорів, використовуючи закон Ома.
12. Що розуміється під реактивним опором кола? Який він може носити характер?
13. Установіть зв'язок між параметрами кола, використовуючи трикутник опорів.
14. Як розрахувати кут зсуву фаз кола за допомогою його параметрів?
15. Одержіть з трикутника опорів трикутник потужностей і побудуйте його.
16. Що розуміється під реактивною потужністю кола? Який вона може носити характер?
17. Установіть зв'язок між потужностями в колі, використовуючи трикутник потужностей.
18. Дайте визначення коефіцієнта потужності кола.
19. Запишіть і розшифруйте визначальну формулу коефіцієнта потужності кола.
20. Як розрахувати коефіцієнт потужності кола за допомогою його параметрів?

Завдання для самоконтролю

До джерела синусоїдної напруги $u = 141 \sin(\omega t + 30^\circ)$ В підключені послідовно з'єднані котушка і конденсатор. Активний опір кола дорівнює **12 Ом**, індуктивний опір котушки дорівнює **37 Ом**, ємнісний опір конденсатора дорівнює **21 Ом**.

1. Визначити реактивний опір кола.
2. Визначити повний опір кола.
3. Визначити кут зсуву фаз кола.
4. Визначити амплітуду струму в колі.
5. Записати вираз миттєвого струму в колі.
6. Визначити амплітуду напруги на активному опорі кола.
7. Записати вираз миттєвої напруги на активному опорі кола.
8. Визначити амплітуду напруги на індуктивності кола.
9. Записати вираз миттєвої напруги на індуктивності кола.
10. Визначити амплітуду напруги на ємності кола.
11. Записати вираз миттєвої напруги на ємності кола.
12. Знайти діюче значення струму в колі.
13. Знайти діюче значення напруги на затискачах кола.
14. Знайти діюче значення напруги на активному опорі кола.
15. Знайти діюче значення напруги на індуктивності кола.
16. Знайти діюче значення напруги на ємності кола.
17. Знайти активну потужність кола.
18. Знайти реактивну потужність індуктивності кола.
19. Знайти реактивну потужність ємності кола.
20. Знайти реактивну потужність кола.
21. Знайти повну потужність кола.
22. Знайти коефіцієнт потужності кола.

3.8 Резонанс напруг

Розглянемо розрахункову схему кола змінного синусоїдного струму з активним опором, індуктивністю і ємністю, у якій один з параметрів кола змінної величини, наприклад, ємність (рис.3.38).

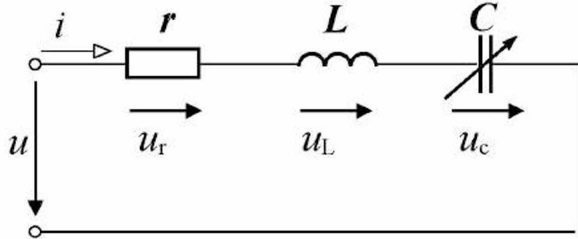


Рис.3.38

Повний опір кола

$$z = \sqrt{r^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}. \quad (3.118)$$

Розглянемо режим роботи кола у випадку, коли $x_c = x_L$. Тоді повний опір кола

$$z = r. \quad (3.119)$$

Сила струму в колі

$$I = \frac{U}{r}. \quad (3.120)$$

Кут зсуву фаз у колі буде дорівнювати нулю, тобто $\varphi = 0$. Коло буде споживати тільки активну потужність:

$$P = rI^2. \quad (3.121)$$

Реактивна потужність

$$Q = Q_L - Q_C = (x_c - x) \cdot I^2 = 0. \quad (3.122)$$

Побудуємо векторну діаграму струму і напруг кола для цього випадку (рис.3.39).

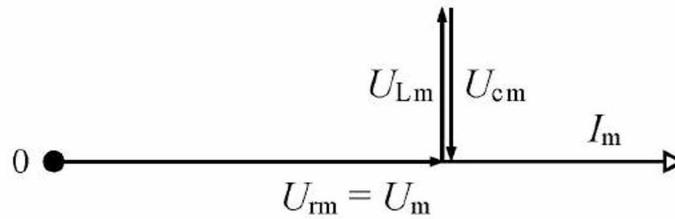


Рис.3.39

Такий режим кола, коли $x_c = x_L$, називається **резонансом напруг**.

Розглянемо більш докладно умови виникнення резонансу напруг:

$$x_c = x_L, \quad (3.123)$$

або

$$\frac{1}{\omega C} = \omega L. \quad (3.124)$$

З (3.124) видно, що резонансу напруг можна досягти, змінюючи значення індуктивності L або ємності C , або змінюючи частоту струму ω .

Уведемо поняття **резонансної частоти**, при якій **настає резонанс напруг при заданих параметрах кола L і C** .

Знаходимо вираз резонансної частоти з (3.124):

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (3.125)$$

$$[\omega] = \frac{1}{\sqrt{\Gamma_n \cdot \Phi}} = \frac{1}{\sqrt{O_m \cdot c \cdot \frac{A \cdot c}{B}}} = \frac{1}{\sqrt{c^2}} = \frac{1}{c}.$$

Приклад 3.12

До кола, яке складається з послідовно з'єднаних котушки, конденсатора і резистора, підведена напруга $u = 282 \sin \omega t$ В. Активний опір кола дорівнює **20 Ом**. Індуктивний опір кола дорівнює **1000 Ом**. Ємнісний опір кола дорівнює **1000 Ом**. Виконати аналіз кола.

Рішення.

1. Визначаємо повний опір кола за (3.119):

$$z = 20 \text{ Ом}.$$

2. Визначаємо діюче значення напруги за (3.16):

$$U = \frac{282}{\sqrt{2}} = 200 \text{ В}.$$

3. Визначаємо діюче значення струму за (3.120):

$$I = \frac{200}{20} = 10 \text{ А}.$$

4. Визначаємо діюче значення напруги на активному опорі, використовуючи (3.103):

$$U_r = r \cdot I = 20 \cdot 10 = 200 \text{ В}.$$

5. Визначаємо діюче значення напруги на індуктивному опорі, використовуючи (3.104):

$$U_L = x_L \cdot I = 1000 \cdot 10 = 10000 \text{ В}.$$

6. Визначаємо діюче значення напруги на ємнісному опорі, використовуючи (3.105):

$$U_c = x_c \cdot I = 1000 \cdot 10 = 10000 \text{ В.}$$

7. Визначаємо активну потужність, яку споживає коло, за (3.121):

$$P = r \cdot I^2 = 20 \cdot 10^2 = 2000 \text{ Вт.}$$

8. Визначаємо реактивну потужність, яку споживає коло, по (3.122):

$$Q = x \cdot I^2 = (x_L - x_c) \cdot I^2 = (1000 - 1000) \cdot 10^2 = 0.$$

На підставі викладеного можна сформулювати наступні характеристики резонансу напруг:

- 1) еквівалентний повний опір кола дорівнює активному опорі;
- 2) кут зсуву фаз кола дорівнює нулю;
- 3) коло споживає тільки активну потужність;
- 4) коло не споживає реактивної потужності;
- 5) прикладена напруга врівноважується напругою на активному опорі;
- 6) напруга на індуктивності та ємності дорівнюють одна одній і можуть значно перевищувати прикладену напругу;
- 7) між індуктивністю і ємністю йде безперервний обмін енергією: енергія електричного поля конденсатора переходить в енергію магнітного поля котушки і навпаки; при цьому сума миттєвих значень енергій у ємності й індуктивності залишається завжди постійною.

Запитання для самоконтролю

1. Що таке резонанс напруг?
2. Запишіть умови виникнення резонансу напруг.
3. Що таке резонансна частота?
Як її розрахувати за допомогою параметрів кола?
4. Дайте характеристику режиму резонанса напруг.
5. Укажіть негативні наслідки резонансу напруг.

Завдання для самоконтролю

До джерела синусоїдної напруги підключені послідовно з'єднані котушка і конденсатор. Активний опір кола дорівнює **20 Ом**, індуктивність котушки дорівнює **25,4 мГн**, ємність конденсатора дорівнює **3,93 мкФ**.

1. Визначити резонансну частоту для цього кола.

3.9 Загальний випадок кола змінного синусоїдного струму

Нехай розрахункова схема кола містить декілька з'єднаних послідовно активних опорів, індуктивностей і ємностей (рис.3.40).

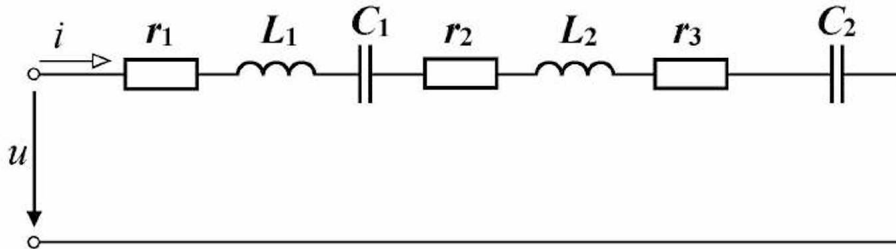


Рис.3.40

Приведену схему можна замінити на еквівалентну (рис.3.41).

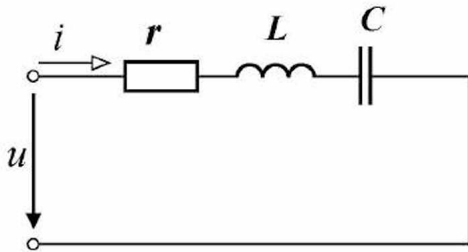


Рис.3.41

При цьому напруга на затискачах і струм у колі залишилися без зміни, у цьому суть (умова) еквівалентного перетворення.

Загальний еквівалентний активний опір кола

$$r = r_1 + r_2 + r_3. \quad (3.126)$$

Загальний еквівалентний індуктивний опір кола

$$x_L = x_{L1} + x_{L2}. \quad (3.127)$$

Загальний еквівалентний ємнісний опір кола

$$x_C = x_{C1} + x_{C2}. \quad (3.128)$$

Повний опір кола

$$Z = \sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2}. \quad (3.129)$$

У підсумку еквівалентне перетворення зводиться до розрахункової схеми, представленої на рис.3.42 або на рис.3.43.

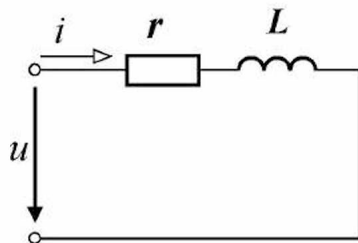


Рис.3.42

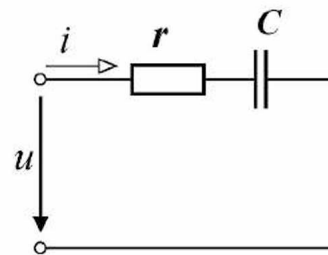


Рис.3.43

Загальний реактивний опір кола

$$x = x_L - x_c. \quad (3.130)$$

Запитання для самоконтролю

1. Запишіть умови еквівалентного перетворення кола змінного синусоїдного струму при послідовному з'єднанні елементів.
2. Приведіть приклад розрахункової схеми кола з послідовним з'єднанням елементів.
3. Побудуйте якісно векторну діаграму приведенного кола, прийнявши, що початкова фаза струму дорівнює нулю.
4. Запишіть вираз еквівалентного активного опору кола.
5. Запишіть вираз еквівалентного реактивного опору кола.
6. Складіть еквівалентну розрахункову схему кола.
7. Запишіть алгоритм розрахунку струму в колі.
8. Як визначити активну потужність у колі?
9. Як визначити реактивну потужність у колі?
10. Як визначити повну потужність у колі?
11. Як визначити коефіцієнт потужності кола?
12. Як визначити кут зсуву фаз кола?
13. Як записати вираз миттєвої напруги в колі за заданими струмом і кутом зсуву фаз?

Завдання для самоконтролю

Електричне коло з послідовно з'єднаними елементами має параметри:

$r_1 = 1 \text{ Ом}$, $x_{L1} = 17 \text{ Ом}$, $x_{C1} = 12 \text{ Ом}$, $r_2 = 3 \text{ Ом}$, $x_{C2} = 3 \text{ Ом}$, $r_3 = 2 \text{ Ом}$,
 $x_{L2} = 10 \text{ Ом}$. На затискачах кола напруга $u = 282 \sin \omega t \text{ В}$.

1. Визначити активний опір кола.
2. Визначити індуктивний опір кола.
3. Визначити ємнісний опір кола.
4. Визначити реактивний опір кола.
5. Визначити повний опір кола.
6. Визначити кут зсуву фаз кола.
7. Визначити амплітуду струму в колі.
8. Знайти діюче значення струму в колі.
9. Знайти активну потужність кола.
10. Знайти реактивну потужність індуктивності кола.
11. Знайти реактивну потужність ємності кола.
12. Знайти реактивну потужність кола.
13. Знайти повну потужність кола.
14. Знайти коефіцієнт потужності кола.

3.10 Лінія електропередачі

Розглянемо ідеальне джерело, яке через лінію електропередачі живить активно-індуктивне навантаження. Складаємо розрахункову схему, для чого приймаємо для джерела $e = u_1$, опори прямого і зворотнього проводів лінії $r_{\text{л}}$ і $x_{\text{л}}$ зосереджуємо в одному місці, навантаження представляємо параметрами $r_{\text{н}}$ і $x_{\text{н}}$ (рис.3.44).

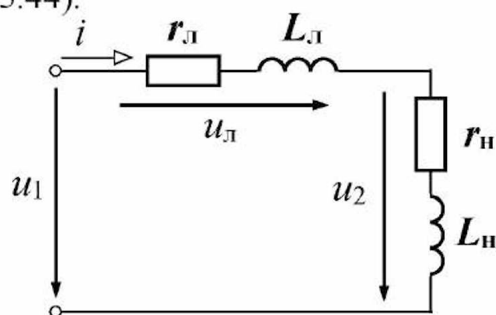


Рис.3.44

Будуємо векторну діаграму кола, прийнявши $i = I_m \sin \omega t$ (рис.3.45).

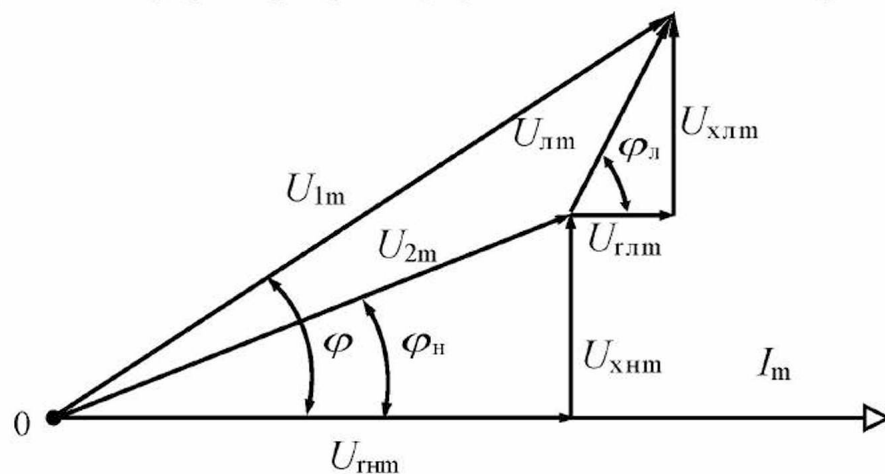


Рис.3.45

Діюче значення струму в колі

$$I = \frac{U_1}{\sqrt{(r_{\text{л}} + r_{\text{н}})^2 + (x_{\text{л}} + x_{\text{н}})^2}}. \quad (3.131)$$

Діюче значення напруги на навантаженні

$$U_2 = z_{\text{н}} \cdot I, \quad (3.132)$$

де

$$z_{\text{н}} = \sqrt{r_{\text{н}}^2 + x_{\text{н}}^2}. \quad (3.133)$$

Уведемо три нових поняття: **втрати напруги** в лінії, **спадання напруги** в лінії і **відхилення напруги** на затискачах приймача (навантаження).

Втрати напруги в лінії – це різниця між напругами на початку і в кінці лінії:

$$\Delta U_{\text{л}} = U_1 - U_2. \quad (3.134)$$

Спадання напруги в лінії – це добуток повного опору лінії на діюче значення струму, що у ній протікає:

$$U_{\text{л}} = z_{\text{л}} I, \quad (3.135)$$

де
$$z_{\text{л}} = \sqrt{r_{\text{л}}^2 + x_{\text{л}}^2}. \quad (3.136)$$

Відхилення напруги на затискачах приймача (навантаження) – це різниця між напругою на навантаженні і номінальною напругою приймача $U_{\text{н}}$, під якою розуміється напруга, зазначена в паспорті приймача (на яку він розрахований при виготовленні):

$$\delta U_{\text{л}} = U_2 - U_{\text{н}}. \quad (3.137)$$

Втрати активної потужності в лінії

$$\Delta P_{\text{л}} = r_{\text{л}} I^2. \quad (3.138)$$

Реактивна потужність лінії

$$\Delta Q_{\text{л}} = x_{\text{л}} I^2. \quad (3.139)$$

Повна потужність лінії

$$\Delta S_{\text{л}} = z_{\text{л}} I^2. \quad (3.140)$$

Коефіцієнт потужності лінії

$$\frac{\Delta P_{\text{л}}}{\Delta S_{\text{л}}} = \cos \varphi_{\text{л}}. \quad (3.141)$$

Кут зсуву фаз лінії

$$\varphi_{\text{л}} = \arccos \frac{r_{\text{л}}}{z_{\text{л}}}. \quad (3.142)$$

Активна потужність приймача (навантаження)

$$P_2 = r_{\text{н}} I^2. \quad (3.143)$$

Реактивна потужність приймача (навантаження)

$$Q_2 = x_H I^2. \quad (3.144)$$

Повна потужність приймача (навантаження)

$$S_2 = \underline{z}_H I^2. \quad (3.145)$$

Коефіцієнт потужності приймача (навантаження)

$$\frac{P_2}{S_2} = \cos \varphi_H. \quad (3.146)$$

Кут зсуву фаз приймача (навантаження)

$$\varphi_H = \arccos \frac{r_H}{\underline{z}_H}. \quad (3.147)$$

Загальний активний опір кола

$$r = r_L + r_H. \quad (3.148)$$

Загальний реактивний опір кола

$$x = x_L + x_H. \quad (3.149)$$

Повний опір кола

$$\underline{z} = \sqrt{r^2 + x^2}. \quad (3.150)$$

Активна потужність кола

$$P = r I^2. \quad (3.151)$$

Реактивна потужність кола

$$Q = x I^2. \quad (3.152)$$

Повна потужність кола

$$S = \underline{z} I^2. \quad (3.153)$$

Коефіцієнт потужності кола

$$\frac{P}{S} = \cos \varphi. \quad (3.154)$$

Кут зсуву фаз кола

$$\varphi = \arccos \frac{r}{\underline{z}}. \quad (3.155)$$

Запитання для самоконтролю

1. Опишіть фізичні явища, які спостерігаються в лінії електропередачі і навантаженні при живленні від джерела змінного синусоїдного струму.
2. Складіть розрахункову схему кола з лінією електропередачі і навантаженням.
3. Побудуйте векторну діаграму кола з лінією електропередачі і навантаженням.
4. Як розрахувати еквівалентний активний опір кола?
5. Як розрахувати еквівалентний реактивний опір кола?
6. Як розрахувати еквівалентний повний опір кола?
7. Як розрахувати струм у колі з лінією електропередачі і навантаженням?
8. Як розрахувати напругу на навантаженні?
9. Як розрахувати втрату напруги в лінії електропередачі?
10. Як розрахувати спадання напруги в лінії електропередачі?
11. Як розрахувати відхилення напруги на затискачах навантаження?
12. Як розрахувати втрати активної потужності в лінії електропередачі?
13. Як розрахувати реактивну потужність, споживану лінією електропередачі?
14. Як розрахувати повну потужність, споживану лінією електропередачі?
15. Як розрахувати коефіцієнт потужності лінії електропередачі?
16. Як розрахувати кут зсуву фаз лінії електропередачі?
17. Як розрахувати активну потужність навантаження?
18. Як розрахувати реактивну потужність навантаження?
19. Як розрахувати повну потужність навантаження?
20. Як розрахувати коефіцієнт потужності навантаження?
21. Як розрахувати кут зсуву фаз навантаження?
22. Як розрахувати активну потужність кола?
23. Як розрахувати реактивну потужність кола?
24. Як розрахувати повну потужність кола?
25. Як розрахувати коефіцієнт потужності кола?
26. Як розрахувати кут зсуву фаз кола?

Завдання для самоконтролю

Навантаження з параметрами $r_n = 2,5 \text{ Ом}$, $x_n = 2,5 \text{ Ом}$ підключене до джерела змінної синусоїдної напруги, діюче значення якої дорівнює **200 В**, за допомогою лінії електропередачі з параметрами $r_l = 0,5 \text{ Ом}$, $x_l = 1,5 \text{ Ом}$.

1. Визначити повний опір навантаження.
2. Визначити кут зсуву фаз навантаження.
3. Визначити повний опір лінії електропередачі.
4. Визначити кут зсуву фаз лінії електропередачі.
5. Визначити активний опір кола.
6. Визначити реактивний опір кола.
7. Визначити повний опір кола.
8. Визначити кут зсуву фаз кола.
9. Знайти діюче значення струму в колі.
10. Знайти діюче значення напруги на навантаженні.
11. Знайти спадання напруги в лінії електропередачі.
12. Знайти втрату напруги в лінії електропередачі.
13. Знайти відхилення напруги на затискачах навантаження, якщо його номінальна діюча напруга дорівнює **220 В**.
14. Побудувати векторну діаграму для діючих значень напруг і струму кола.

ТЕМАТИЧНЕ КОМПЛЕКСНЕ КВАЛІФІКАЦІЙНЕ ЗАВДАННЯ

Умова

Електричне коло змінного синусоїдного електричного струму складається з паралельно включених через вимикачі **S1**, **S2**, **S3**, **S4**, **S5**, **S6** відповідно резистора **R1**, котушки **K1**, котушки **K2**, конденсатора **C1**, послідовно включених резистора **R2** і конденсатора **C2**, послідовно включених котушки **K3** і конденсатора **C3**.

У загальному колі включені амперметр, вольтметр і ватметр.

При включенні вимикача **S1** (інші вимикачі виключені) електровимірювальні прилади показали наступні значення: амперметр – I_1 , вольтметр – U_1 , ватметр – P_1 .

При включенні вимикача **S2** (інші вимикачі виключені) електровимірювальні прилади показали наступні значення: амперметр – I_2 , вольтметр – U_2 , ватметр – P_2 .

При включенні вимикача **S3** (інші вимикачі виключені) електровимірювальні прилади показали наступні значення: амперметр – I_3 , вольтметр – U_3 , ватметр – P_3 .

При включенні вимикача **S4** (інші вимикачі виключені) електровимірювальні прилади показали наступні значення: амперметр – I_4 , вольтметр – U_4 , ватметр – P_4 .

При включенні вимикача **S5** (інші вимикачі виключені) електровимірювальні прилади показали наступні значення: амперметр – I_5 , вольтметр – U_5 , ватметр – P_5 .

При включенні вимикача **S6** (інші вимикачі виключені) електровимірювальні прилади показали наступні значення: амперметр – I_6 , вольтметр – U_6 , ватметр – P_6 , при цьому ємнісний опір конденсатора дорівнює x_c .

Завдання

1. Скласти принципову електричну схему описаного електричного кола. Окремі елементи кола виділити жирними лініями, а їх з'єднуючі проводи – тонкими лініями.
2. Скласти розрахункову схему електричного кола при включеному вимикачеві **S1** (інші вимикачі виключені), прийнявши наступні допущення:
 - опорами проводів, що з'єднують елементи кола, знехтувати;
 - опорами амперметра і струмової обмотки ватметра знехтувати;
 - опори вольтметра й обмотки напруги ватметра вважати дорівненими нескінченності.

3. Виконати розрахунок електричного кола, розглянутого в пункті 2:
 - записати діюче значення напруги на затискачах електричного кола;
 - визначити амплітудне значення напруги на затискачах електричного кола;
 - записати миттєву напругу на затискачах кола, прийнявши, що її початкова фаза дорівнює 30° ;
 - записати діюче значення сили електричного струму в резисторі;
 - записати активну потужність, споживану резистором з електричної мережі;
 - визначити повну потужність, споживану резистором з електричної мережі;
 - визначити реактивну потужність, споживану резистором з електричної мережі;
 - визначити повний опір електричного кола з резистором;
 - визначити активний опір резистора;
 - визначити реактивний опір електричного кола з резистором;
 - визначити кут зсуву фаз в електричному колі;
 - визначити амплітудне значення синусоїдного електричного струму в резисторі;
 - визначити початкову фазу синусоїдного електричного струму в резисторі;
 - записати миттєвий синусоїдний електричний струм у резисторі;
 - визначити коефіцієнт потужності даного електричного кола;
 - побудувати в масштабі векторну діаграму напруги і струму (для діючих значень).

4. Скласти розрахункову схему електричного кола при включеному вимикачеві **S2** (інші вимикачі виключені), прийнявши наступні допущення:
 - опорами проводів, що з'єднують елементи кола, знехтувати;
 - опорами амперметра і струмової обмотки ватметра знехтувати;
 - опори вольтметра й обмотки напруги ватметра вважати дорівніними нескінченності.

5. Виконати розрахунок електричного кола, розглянутого в пункті 4:
 - записати діюче значення напруги на затискачах електричного кола;
 - визначити амплітудне значення напруги на затискачах електричного кола;
 - записати миттєву напругу на затискачах кола, прийнявши, що її початкова фаза дорівнює 30° ;
 - записати діюче значення сили електричного струму в котушці;

- записати активну потужність, споживану котушкою з електричної мережі;
 - визначити повну потужність, споживану котушкою з електричної мережі;
 - визначити реактивну потужність, споживану котушкою з електричної мережі;
 - визначити повний опір котушки;
 - визначити активний опір котушки;
 - визначити реактивний опір котушки;
 - визначити індуктивність котушки;
 - визначити кут зсуву фаз в електричному колі;
 - визначити амплітудне значення синусоїдного електричного струму в котушці;
 - визначити початкову фазу синусоїдного електричного струму в котушці;
 - записати миттєвий синусоїдний електричний струм у котушці;
 - визначити коефіцієнт потужності даного електричного кола;
 - побудувати в масштабі векторну діаграму напруги і струму (для діючих значень).
6. Скласти розрахункову схему електричного кола при включеному вимикачеві **S3** (інші вимикачі виключені), прийнявши наступні допущення:
- опорами проводів, що з'єднують елементи кола, знехтувати;
 - опорами амперметра і струмової обмотки ватметра знехтувати;
 - опори вольтметра й обмотки напруги ватметра вважати дорівненими нескінченності.
7. Виконати розрахунок електричного кола, розглянутого в пункті 6:
- записати діюче значення напруги на затискачах електричного кола;
 - визначити амплітудне значення напруги на затискачах електричного кола;
 - записати миттєву напругу на затискачах кола, прийнявши, що її початкова фаза дорівнює **30°**;
 - записати діюче значення сили електричного струму в котушці;
 - записати активну потужність, споживану котушкою з електричної мережі;
 - визначити повну потужність, споживану котушкою з електричної мережі;
 - визначити реактивну потужність, споживану котушкою з електричної мережі;
 - визначити повний опір котушки;
 - визначити активний опір котушки;

- визначити реактивний опір котушки;
 - визначити індуктивність котушки;
 - визначити кут зсуву фаз в електричному колі;
 - визначити амплітудне значення синусоїдного електричного струму в котушці;
 - визначити початкову фазу синусоїдного електричного струму в котушці;
 - записати миттєвий синусоїдний електричний струм у котушці;
 - визначити діюче значення напруги на активному опорі;
 - визначити амплітудне значення напруги на активному опорі;
 - визначити початкову фазу напруги на активному опорі;
 - записати миттєву напругу на активному опорі;
 - визначити діюче значення напруги на реактивному опорі;
 - визначити амплітудне значення напруги на реактивному опорі;
 - визначити початкову фазу напруги на реактивному опорі;
 - записати миттєву напругу на реактивному опорі;
 - визначити коефіцієнт потужності даного електричного кола;
 - побудувати в масштабі векторну діаграму напруг і струму (для діючих значень).
8. Скласти розрахункову схему електричного кола при включеному вимикачеві **S4** (інші вимикачі виключені), прийнявши наступні допущення:
- опорами проводів, що з'єднують елементи кола, знехтувати;
 - опорами амперметра і струмової обмотки ватметра знехтувати;
 - опори вольтметра й обмотки напруги ватметра вважати дорівніними нескінченності.
9. Виконати розрахунок електричного кола, розглянутого в пункті 8:
- записати діюче значення напруги на затискачах електричного кола;
 - визначити амплітудне значення напруги на затискачах електричного кола;
 - записати миттєву напругу на затискачах кола, прийнявши, що її початкова фаза дорівнює **30°**;
 - записати діюче значення сили електричного струму в конденсаторі;
 - записати активну потужність, споживану конденсатором з електричної мережі;
 - визначити повну потужність, споживану конденсатором з електричної мережі;
 - визначити реактивну потужність, споживану конденсатором з електричної мережі;
 - визначити повний опір конденсатора;

- визначити активний опір конденсатора;
- визначити реактивний опір конденсатора;
- визначити ємність конденсатора;
- визначити кут зсуву фаз в електричному колі;
- визначити амплітудне значення синусоїдного електричного струму в конденсаторі;
- визначити початкову фазу синусоїдного електричного струму в конденсаторі;
- записати миттєвий синусоїдний електричний струм у конденсаторі;
- визначити коефіцієнт потужності даного електричного кола;
- побудувати в масштабі векторну діаграму напруги і струму (для діючих значень).

10. Скласти розрахункову схему електричного кола при включеному вимикачеві **S5** (інші вимикачі виключені), прийнявши наступні допущення:

- опорами проводів, що з'єднують елементи кола, знехтувати;
- опорами амперметра і струмової обмотки ватметра знехтувати;
- опори вольтметра й обмотки напруги ватметра вважати дорівненими нескінченності.

11. Виконати розрахунок електричного кола, розглянутого в пункті 10:

- записати діюче значення напруги на затискачах електричного кола;
- визначити амплітудне значення напруги на затискачах електричного кола;
- записати миттєву напругу на затискачах кола, прийнявши, що її початкова фаза дорівнює **30°**;
- записати діюче значення сили електричного струму в електричному колі;
- записати активну потужність електричного кола;
- визначити повну потужність електричного кола;
- визначити реактивну потужність електричного кола;
- визначити повний опір електричного кола;
- визначити активний опір резистора;
- визначити реактивний опір конденсатора;
- визначити ємність конденсатора;
- визначити кут зсуву фаз в електричному колі;
- визначити амплітудне значення синусоїдного електричного струму в електричному колі;
- визначити початкову фазу синусоїдного електричного струму в електричному колі;

- записати миттєвий синусоїдний електричний струм в електричному колі;
- визначити діюче значення напруги на активному опорі;
- визначити амплітудне значення напруги на активному опорі;
- визначити початкову фазу напруги на активному опорі;
- записати миттєву напругу на активному опорі;
- визначити діюче значення напруги на реактивному опорі;
- визначити амплітудне значення напруги на реактивному опорі;
- визначити початкову фазу напруги на реактивному опорі;
- записати миттєву напругу на реактивному опорі;
- визначити коефіцієнт потужності даного електричного кола;
- побудувати в масштабі векторну діаграму напруг і струму (для діючих значень).

12. Скласти розрахункову схему електричного кола при включеному вимикачеві **S6** (інші вимикачі виключені), прийнявши наступні допущення:

- опорами проводів, що з'єднують елементи кола, знехтувати;
- опорами амперметра і струмової обмотки ватметра знехтувати;
- опори вольтметра й обмотки напруги ватметра вважати дорівніними нескінченності.

13. Виконати розрахунок електричного кола, розглянутого в пункті 12:

- записати діюче значення напруги на затискачах електричного кола;
- визначити амплітудне значення напруги на затискачах електричного кола;
- записати миттєву напругу на затискачах кола, прийнявши, що її початкова фаза дорівнює **30°**;
- записати діюче значення сили електричного струму в електричному колі;
- записати активну потужність електричного кола;
- визначити повну потужність електричного кола;
- визначити реактивну потужність електричного кола;
- визначити ємнісну потужність, споживану конденсатором з електричної мережі;
- визначити індуктивну потужність, споживану котушкою з електричної мережі;
- визначити повний опір електричного кола;
- визначити активний опір електричного кола;
- визначити реактивний опір електричного кола;
- визначити індуктивний опір котушки;
- визначити індуктивність котушки;

- визначити ємність конденсатора;
- визначити кут зсуву фаз в електричному колі;
- визначити амплітудне значення синусоїдного електричного струму в електричному колі;
- визначити початкову фазу синусоїдного електричного струму в електричному колі;
- записати миттєвий синусоїдний електричний струм в електричному колі;
- визначити діюче значення напруги на активному опорі;
- визначити амплітудне значення напруги на активному опорі;
- визначити початкову фазу напруги на активному опорі;
- записати миттєву напругу на активному опорі;
- визначити діюче значення напруги на індуктивному опорі;
- визначити амплітудне значення напруги на індуктивному опорі;
- визначити початкову фазу напруги на індуктивному опорі;
- записати миттєву напругу на індуктивному опорі;
- визначити діюче значення напруги на ємнісному опорі;
- визначити амплітудне значення напруги на ємнісному опорі;
- визначити початкову фазу напруги на ємнісному опорі;
- записати миттєву напругу на ємнісному опорі;
- визначити коефіцієнт потужності даного електричного кола;
- якою повинна бути величина ємності конденсатора, щоб у даному колі виник резонанс напруги;
- побудувати в масштабі векторну діаграму напруг і струму (для діючих значень).

**Варіанти вихідних даних до тематичного комплексного
кваліфікаційного завдання**

Таблиця 3.1

Варіанти	Показання приладів при включенню вимикачі S1	Показання приладів при включенню вимикачі S2	Показання приладів при включенню вимикачі S3	Показання приладів при включенню вимикачі S4	Показання приладів при включенню вимикачі S5	Показання приладів при включенню вимикачі S5
1	$I = 20 A$	$I = 20 A$	$I = 20 A$	$I = 20 A$	$I = 20 A$	$I = 20 A$
	$U = 200B$	$U = 200B$	$U = 200B$	$U = 200B$	$U = 200B$	$U = 200B$
	$P = 4000Bm$	$P = 0 Bm$	$P = 2400Bm$	$P = 0 Bm$	$P = 3200Bm$	$P = 3200Bm$ $x_c = 4 Ом$
2	$I = 10 A$	$I = 10 A$	$I = 10 A$	$I = 10 A$	$I = 10 A$	$I = 10 A$
	$U = 400B$	$U = 400B$	$U = 400B$	$U = 400B$	$U = 400B$	$U = 400B$
	$P = 4000Bm$	$P = 0 Bm$	$P = 3200Bm$	$P = 0 Bm$	$P = 2400Bm$	$P = 2400Bm$ $x_c = 3 Ом$
3	$I = 5 A$	$I = 5 A$	$I = 5 A$	$I = 5 A$	$I = 5 A$	$I = 5 A$
	$U = 100B$	$U = 100B$	$U = 100B$	$U = 100B$	$U = 100B$	$U = 100B$
	$P = 500Bm$	$P = 0 Bm$	$P = 300Bm$	$P = 0 Bm$	$P = 400 Bm$	$P = 300 Bm$ $x_c = 8 Ом$
4	$I = 22 A$	$I = 22 A$	$I = 22 A$	$I = 22 A$	$I = 22 A$	$I = 22A$
	$U = 220B$	$U = 220B$	$U = 220B$	$U = 220B$	$U = 220B$	$U = 220B$
	$P = 4840Bm$	$P = 0 Bm$	$P = 3872Bm$	$P = 0 Bm$	$P = 2904Bm$	$P = 3872Bm$ $x_c = 4 Ом$
5	$I = 10 A$	$I = 10 A$	$I = 10 A$	$I = 10 A$	$I = 10 A$	$I = 10 A$
	$U = 370B$	$U = 370B$	$U = 370B$	$U = 370B$	$U = 370B$	$U = 370B$
	$P = 3700Bm$	$P = 0 Bm$	$P = 3500Bm$	$P = 0 Bm$	$P = 1200Bm$	$P = 3500Bm$ $x_c = 10 Ом$
6	$I = 6 A$	$I = 6 A$	$I = 6 A$	$I = 6 A$	$I = 6 A$	$I = 6 A$
	$U = 120B$	$U = 120B$	$U = 120B$	$U = 120B$	$U = 120B$	$U = 120B$
	$P = 720Bm$	$P = 0 Bm$	$P = 432Bm$	$P = 0 Bm$	$P = 576Bm$	$P = 576Bm$ $x_c = 5 Ом$
7	$I = 2 A$	$I = 2 A$	$I = 2 A$	$I = 2 A$	$I = 2 A$	$I = 2 A$
	$U = 100B$	$U = 100B$	$U = 100B$	$U = 100B$	$U = 100B$	$U = 100B$
	$P = 200Bm$	$P = 0 Bm$	$P = 160 Bm$	$P = 0 Bm$	$P = 160 Bm$	$P = 160Bm$ $x_c = 5 Ом$
8	$I = 4 A$	$I = 4 A$	$I = 4 A$	$I = 4 A$	$I = 4 A$	$I = 4 A$
	$U = 148B$	$U = 148B$	$U = 148B$	$U = 148B$	$U = 148B$	$U = 148B$
	$P = 592Bm$	$P = 0 Bm$	$P = 192 Bm$	$P = 0 Bm$	$P = 192 Bm$	$P = 192Bm$ $x_c = 7 Ом$
9	$I = 2 A$	$I = 2 A$	$I = 2 A$	$I = 2 A$	$I = 2 A$	$I = 2 A$
	$U = 200B$	$U = 200B$	$U = 200B$	$U = 200B$	$U = 200B$	$U = 200B$
	$P = 400Bm$	$P = 0 Bm$	$P = 240 Bm$	$P = 0 Bm$	$P = 320 Bm$	$P = 240Bm$ $x_c = 10 Ом$

Варіанти	Показання приладів при включенню вимикачі S1	Показання приладів при включенню вимикачі S2	Показання приладів при включенню вимикачі S3	Показання приладів при включенню вимикачі S4	Показання приладів при включенню вимикачі S5	Показання приладів при включенню вимикачі S5
10	$I = 15 A$	$I = 15 A$	$I = 15 A$	$I = 15 A$	$I = 15 A$	$I = 15 A$
	$U = 150B$	$U = 150B$	$U = 150B$	$U = 150B$	$U = 150B$	$U = 150B$
	$P = 2250Bm$	$P = 0 Bm$	$P = 1350Bm$	$P = 0 Bm$	$P = 1800Bm$	$P = 1350Bm$ $x_c = 12 Ом$
11	$I = 25 A$	$I = 25 A$	$I = 25 A$	$I = 25 A$	$I = 25 A$	$I = 25 A$
	$U = 375B$	$U = 375B$	$U = 375B$	$U = 375B$	$U = 375B$	$U = 375B$
	$P = 9375Bm$	$P = 0 Bm$	$P = 7500Bm$	$P = 0 Bm$	$P = 5625Bm$	$P = 5625Bm$ $x_c = 5 Ом$
12	$I = 15 A$	$I = 15 A$	$I = 15 A$	$I = 15 A$	$I = 15 A$	$I = 15 A$
	$U = 225B$	$U = 225B$	$U = 225B$	$U = 225B$	$U = 225B$	$U = 225B$
	$P = 3375Bm$	$P = 0 Bm$	$P = 2700Bm$	$P = 0 Bm$	$P = 2700Bm$	$P = 2025Bm$ $x_c = 12 Ом$
13	$I = 19 A$	$I = 19 A$	$I = 19 A$	$I = 19 A$	$I = 19 A$	$I = 19 A$
	$U = 380B$	$U = 380B$	$U = 380B$	$U = 380B$	$U = 380B$	$U = 380B$
	$P = 7220Bm$	$P = 0 Bm$	$P = 4332Bm$	$P = 0 Bm$	$P = 4332Bm$	$P = 5776Bm$ $x_c = 2 Ом$
14	$I = 8 A$	$I = 8 A$	$I = 8 A$	$I = 8 A$	$I = 8 A$	$I = 8 A$
	$U = 160B$	$U = 160B$	$U = 160B$	$U = 160B$	$U = 160B$	$U = 160B$
	$P = 1280Bm$	$P = 0 Bm$	$P = 768Bm$	$P = 0 Bm$	$P = 1024Bm$	$P = 768Bm$ $x_c = 12 Ом$
15	$I = 17 A$	$I = 17 A$	$I = 17 A$	$I = 17 A$	$I = 17 A$	$I = 17 A$
	$U = 85B$	$U = 85B$	$U = 85B$	$U = 85B$	$U = 85B$	$U = 85B$
	$P = 1445Bm$	$P = 0 Bm$	$P = 1156Bm$	$P = 0 Bm$	$P = 876Bm$	$P = 876Bm$ $x_c = 5 Ом$

14. Нерозгалужене електричне коло змінного синусоїдного струму містить ідеальний генератор, ідеальну лінію і приймач з регульованим опором.

Провести порівняльний аналіз режимів роботи генератора і приймача за наступним алгоритмом (таблиця 3.2), вибравши відповіді з таблиці 3.3:

Таблиця 3.2

Номери питань і завдань	Питання і завдання	Номери вірних відповідей
1.	Яким загальним поняттям можна об'єднати генератор і приймач?	
2.	Приведіть сім ознак подібності режимів роботи генератора і приймача.	
3.	Приведіть дві ознаки розходження режимів роботи генератора і приймача.	
4.	Виділіть головну ознаку подібності режимів роботи генератора і приймача.	
5.	Обґрунтуйте головну ознаку подібності режимів роботи генератора і приймача.	
6.	Виділіть головну ознаку розходження режимів роботи генератора і приймача.	
7.	Обґрунтуйте головну ознаку розходження режимів роботи генератора і приймача.	
8.	Виділіть три шляхи взаємодії генератора і приймача між собою.	
9.	Установіть причинно-наслідковий зв'язок режимів роботи генератора і приймача.	

Таблиця 3.3

Номери вірних відповідей	Варіанти відповідей
1.	За допомогою електричного поля.
2.	Перетворювачі енергії.
3.	Зміною е.р.с.
4.	Однаковий струм.
5.	Зміною активного опору навантаження.
6.	Зміною індуктивного опору навантаження.
7.	Зміною ємнісного опору навантаження.
8.	Зміною повного опору навантаження.
9.	Різні перетворювання енергії.
10.	Причиною зміни режиму роботи може бути як джерело, так і приймач.
11.	Функціональне призначення.
12.	Різні напруги на затискачах.
13.	Елемент електричного кола.
14.	Є вільні заряди.
15.	Різні миттєві потужності.
16.	Однакові напруги на затискачах.
17.	Однакові миттєві потужності.
18.	Однакові кути зсуву фаз.
19.	Генератор має вільні заряди, а приймач – не має.
20.	Різні напрями активних потужностей.
21.	Відсутня активна потужність.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ 1

1. Опис експериментальної установки

Експериментальна установка містить лабораторний автотрансформатор TV , вольтметр PV , підключений до вторинних затискачів лабораторного автотрансформатора TV , амперметр PA , включений послідовно з навантажувальним резистором R , і ватметр PW . Для комутації кола передбачений вимикач SA .

Принципова електрична схема експериментальної установки наведена на рисунку 1.

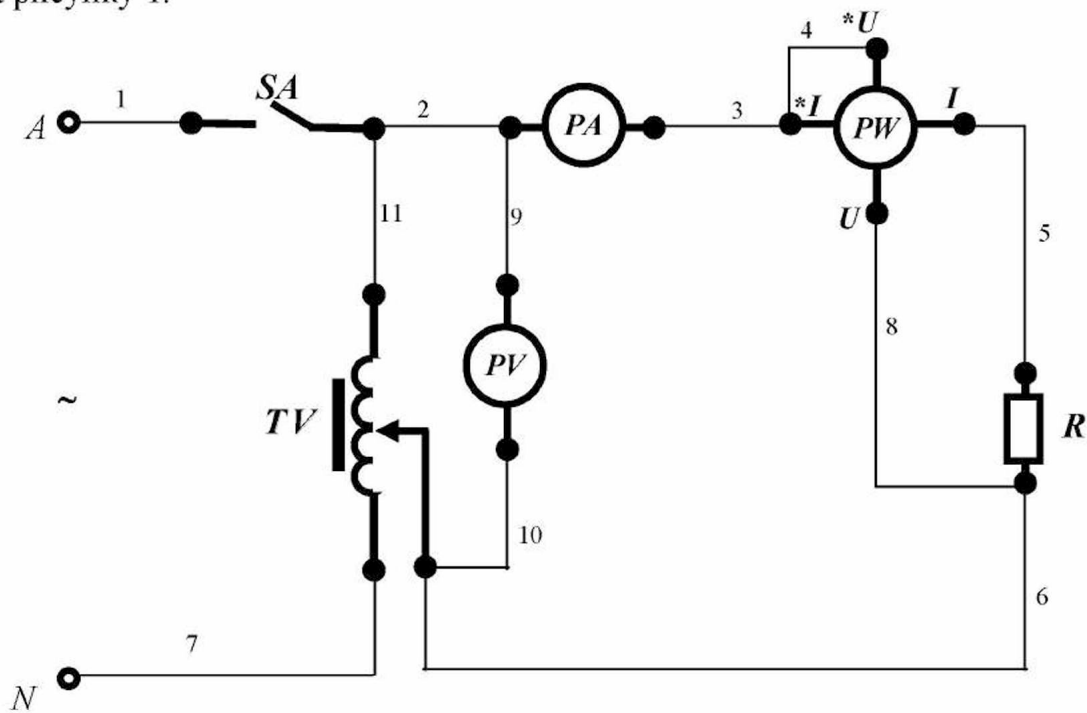


Рисунок 1 - Принципова електрична схема експериментальної установки.

Для складання схеми необхідно мати 11 провідників (на схемі позначені номерами 1-11).

2. Розрахункова схема експериментальної установки

При складанні розрахункової схеми прийняті наступні допущення:

- опори з'єднувальних проводів, обмотки амперметра, струмової обмотки ватметра і контактів вимикача дорівнюють нулю;

- опори обмотки вольтметра і обмотки напруги ватметра дорівнюють нескінченності.

Тоді розрахункова схема електричного кола експериментальної установки має вигляд, наведений на рисунку 2.

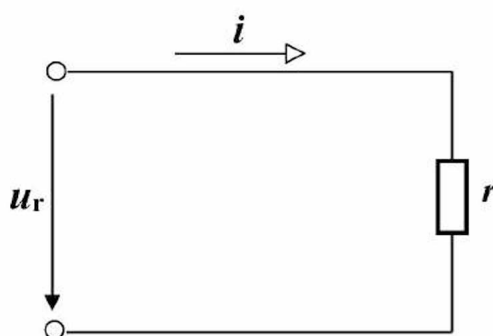


Рисунок 2 - Розрахункова схема електричного кола експериментальної установки.

На розрахунковій схемі введені наступні умовні позначення:

u_r – миттєва напруга на резисторі, B ;

i – миттєвий струм в електричному колі, A ;

r – активний опір резистора, Om .

3. Уміння, які здобуваються студентами в результаті виконання експериментального дослідження

3.1 Уміти скласти принципову електричну схему кола та зібрати її.

3.2 Уміти скласти розрахункову схему електричного кола та пояснити її.

3.3 Уміти за допомогою експериментальних даних визначити діюче значення напруги на затискачах резистора.

3.4 Уміти за допомогою експериментальних даних визначити амплітудне значення напруги на затискачах резистора.

- 3.5 Уміти записати рівняння миттєвої напруги на резисторі.
- 3.6 Уміти за допомогою експериментальних даних визначити діюче значення сили електричного струму в колі з резистором.
- 3.7 Уміти за допомогою експериментальних даних визначити амплітудне значення синусоїдного електричного струму в колі з резистором.
- 3.8 Уміти записати рівняння миттєвого синусоїдного електричного струму в резисторі.
- 3.9 Уміти за допомогою експериментальних даних визначити активну потужність, споживану резистором.
- 3.10 Уміти визначити активний опір резистора, використовуючи експериментальні дані.
- 3.11 Уміти побудувати векторну діаграму діючих значень сили струму і напруги резистора.

4. Завдання з виконання експериментального дослідження

- 4.1 Зібрати принципову електричну схему кола.
- 4.2 Подати напругу на затискачі експериментальної установки.
- 4.3 Зняти показання приладів, результати занести в таблицю 1.

Таблиця 1

№ п/п	Умови проведення експерименту	Показання приладів		
		U, B	I, A	P, Вт
1	Вимикач SA замкнений			

- 4.4 Визначити діюче значення напруги на затискачах резистора, використовуючи експериментальні дані.
- 4.5 Визначити амплітудне значення напруги на затискачах резистора, використовуючи експериментальні дані.

4.6 Записати рівняння миттєвої напруги на резисторі, прийнявши, що її початкова фаза дорівнює $\psi_{ur} = 30^\circ$.

4.7 Визначити діюче значення сили електричного струму в резисторі, використовуючи експериментальні дані.

4.8 Визначити амплітудне значення синусоїдного електричного струму в резисторі, використовуючи експериментальні дані.

4.9 Записати рівняння миттєвого струму в резисторі.

4.10 Визначити активну потужність, споживану резистором, використовуючи експериментальні дані.

4.11 Визначити за допомогою експериментальних даних активний опір резистора, використовуючи рівняння:

$$P = r \cdot I^2.$$

4.12 Побудувати в обраному масштабі векторну діаграму діючих значень напруги та струму кола.

4.13 Занести отримані значення в таблицю 2.

Таблиця 2

№ п/п	Фізичні величини, що характеризують коло							
	U_r, B	U_m, B	u_r, B	I, A	I_m, A	i, A	P, Bm	$r, Ом$
1								

5. Структура звіту

5.1 Назва теми експериментального дослідження.

5.2 Принципова електрична схема експериментальної установки.

5.3 Розрахункова схема електричного кола.

5.6 Таблиця 1.

5.7 Таблиця 2.

5.8 Векторна діаграма.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ 2

1. Опис експериментальної установки

Експериментальна установка містить лабораторний автотрансформатор TV , вольтметр PV , підключений до вторинних затискачів лабораторного автотрансформатора TV , амперметр PA , включений послідовно з котушкою індуктивності K , і ватметр PW . Для комутації кола передбачений вимикач SA .

Принципова електрична схема експериментальної установки наведена на рисунку 1.

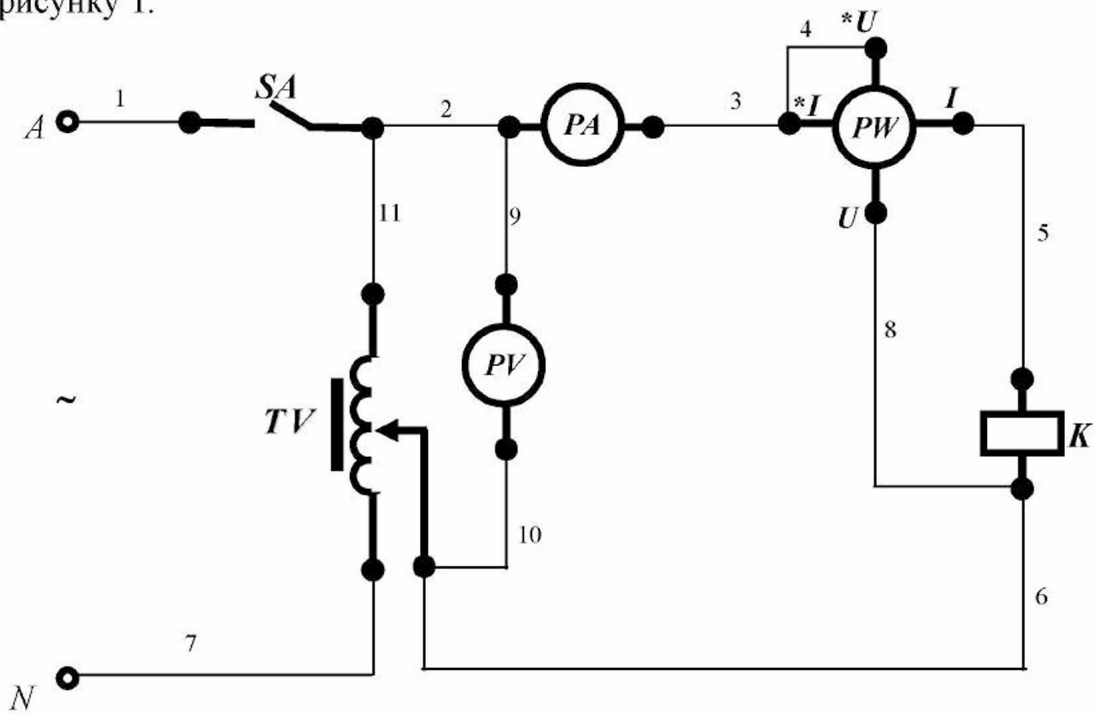


Рисунок 1 - Принципова електрична схема експериментальної установки.

Для складання схеми необхідно мати 11 провідників (на схемі позначені номерами 1-11).

2. Розрахункова схема експериментальної установки

При складанні розрахункової схеми прийняті наступні допущення:

- опори з'єднувальних проводів, обмотки амперметра, струмової обмотки ватметра і контактів вимикача дорівнюють нулю;

- опори обмотки вольтметра і обмотки напруги ватметра дорівнюють нескінченності.

Тоді розрахункова схема електричного кола експериментальної установки має вигляд, наведений на рисунку 2.

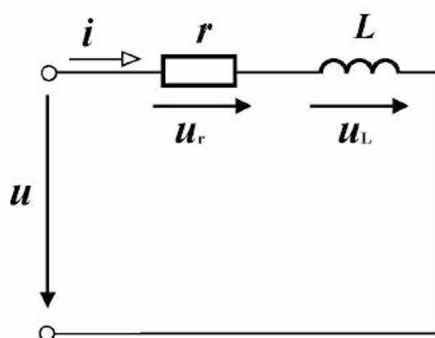


Рисунок 2 - Розрахункова схема електричного кола експериментальної установки.

На розрахунковій схемі введені наступні умовні позначення:

u – миттєва напруга на затискачах кола, B ;

i – миттєвий струм в електричному колі, A ;

r – активний опір котушки, Om ;

L – індуктивність котушки, $Гн$;

u_r – миттєва напруга на активному опорі котушки, B ;

u_L – миттєва напруга на індуктивності котушки, B .

3. Уміння, які здобуваються студентами в результаті виконання експериментального дослідження

3.1 Уміти скласти принципову електричну схему кола та зібрати її.

3.2 Уміти скласти розрахункову схему електричного кола та пояснити її.

- 3.3 Уміти визначити за допомогою експериментальних даних діюче значення сили струму в котушці.
- 3.4 Уміти визначити за допомогою експериментальних даних діюче значення напруги на затискачах котушки.
- 3.5 Уміти визначити за допомогою експериментальних даних активну потужність, споживану котушкою.
- 3.6 Уміти визначити за допомогою експериментальних даних активний опір котушки.
- 3.7 Уміти визначити за допомогою експериментальних даних повний опір котушки.
- 3.8 Уміти визначити за допомогою експериментальних даних індуктивний опір котушки.
- 3.9 Уміти побудувати трикутник опорів котушки в колі змінного синусоїдного струму.
- 3.10 Уміти визначити кут зсуву фаз між напругою і струмом котушки.
- 3.11 Уміти визначити за допомогою експериментальних і розрахункових даних реактивну потужність котушки.
- 3.12 Уміти визначити за допомогою експериментальних даних повну потужність котушки.
- 3.13 Уміти побудувати трикутник потужностей котушки.
- 3.14 Уміти визначити за допомогою експериментальних і розрахункових даних діюче значення напруги на активному опорі котушки.
- 3.15 Уміти визначити за допомогою експериментальних і розрахункових даних діюче значення напруги на індуктивності котушки.
- 3.16 Уміти за допомогою експериментальних і розрахункових даних визначити індуктивність котушки.
- 3.17 Уміти побудувати векторну діаграму діючих значень сили струму і напруг котушки.
- 3.18 Уміти визначити коефіцієнт потужності котушки.

4. Завдання з виконання експериментального дослідження

4.1 Зібрати принципову електричну схему кола.

4.2 Подати напругу на затискачі експериментальної установки.

4.3 Зняти показання приладів, результати занести в таблицю 1.

Таблиця 1

№ п/п	Умови проведення експерименту	Показання приладів		
		U, В	I, А	P, Вт
1	Вимикач SA замкнений			

4.4 Визначити за допомогою експериментальних даних діюче значення напруги на затискачах котушки.

4.5 Визначити за допомогою експериментальних даних діюче значення сили струму в котушці.

4.6 Визначити за допомогою експериментальних даних активну потужність, споживану котушкою.

4.7 Визначити за допомогою експериментальних даних активний опір котушки, використовуючи рівняння:

$$P = r \cdot I^2.$$

4.8 Визначити за допомогою експериментальних даних повний опір котушки, використовуючи запис закону Ома для ділянки кола:

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

4.9 Визначити за допомогою розрахункових даних індуктивний опір котушки, використовуючи рівняння:

$$z = \sqrt{r^2 + x_L^2}.$$

4.10 Побудувати в обраному масштабі трикутник опорів котушки в колі змінного синусоїдного струму.

4.11 Визначити за допомогою розрахункових даних кут зсуву фаз між напругою і струмом котушки, використовуючи рівняння:

$$\varphi = \arccos \frac{r}{Z}$$

4.12 Визначити за допомогою експериментальних і розрахункових даних реактивну потужність котушки, використовуючи рівняння:

$$Q_L = x_L \cdot I^2.$$

4.13 Визначити за допомогою експериментальних даних повну потужність котушки, використовуючи рівняння:

$$S = U \cdot I.$$

4.14 Побудувати в обраному масштабі трикутник потужностей котушки.

4.15 Визначити за допомогою експериментальних і розрахункових даних діюче значення напруги на активному опорі котушки, використовуючи запис закону Ома для ділянки кола:

$$I = \frac{U_r}{r}$$

4.16 Визначити за допомогою експериментальних і розрахункових даних діюче значення напруги на індуктивності котушки, використовуючи запис закону Ома для ділянки кола:

$$I = \frac{U_L}{x_L}$$

4.17 Визначити індуктивність котушки, використовуючи рівняння:

$$x_L = \omega \cdot L,$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f,$$

$$f = 50 \text{ Гц}.$$

4.18 Побудувати в обраному масштабі векторну діаграму діючих значень сили струму і напруг котушки, прийнявши, що початкова фаза струму дорівнює нулю.

4.19 Визначити коефіцієнт потужності котушки, використовуючи рівняння:

$$\frac{P}{S} = \cos \varphi.$$

4.20 Занести отримані значення в таблицю 2.

Таблиця 2

№ п/п	Фізичні величини, що характеризують коло												
	$U,$ B	$I,$ A	$P,$ $Вт$	$r,$ $Ом$	$z,$ $Ом$	$x_L,$ $Ом$	$L,$ $Гн$	$\varphi,$ $град$	$Q_L,$ $вар$	$S,$ $ВА$	$U_r,$ B	$U_L,$ B	$\cos \varphi$
1													

5. Структура звіту

5.1 Назва теми експериментального дослідження.

5.2 Принципова електрична схема експериментальної установки.

5.3 Розрахункова схема електричного кола.

5.4 Таблиця 1.

5.5 Таблиця 2.

5.6 Трикутник опорів.

5.7 Трикутник потужностей.

5.8 Векторна діаграма.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ 3

1. Опис експериментальної установки

Експериментальна установка містить лабораторний автотрансформатор TV , вольтметр PV , підключений до вторинних затискачів лабораторного автотрансформатора TV , амперметр PA , включений послідовно з резистором R і конденсатором C , і ватметр PW . Для комутації кола передбачений вимикач SA .

Принципова електрична схема експериментальної установки наведена на рисунку 1.

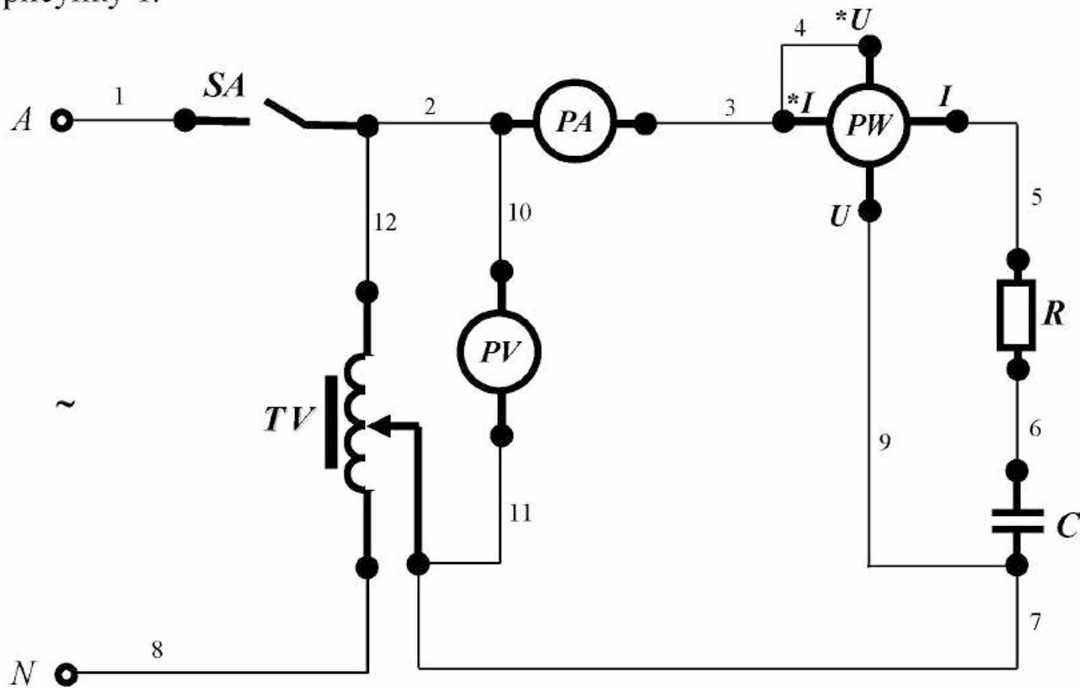


Рисунок 1 - Принципова електрична схема експериментальної установки.

Для складання схеми необхідно мати 12 провідників (на схемі позначені номерами 1-12).

2. Розрахункова схема експериментальної установки

При складанні розрахункової схеми прийняті наступні допущення:

- активний опір конденсатора дорівнює нулю;

- опори з'єднувальних проводів, обмотки амперметра, струмової обмотки ватметра і контактів вимикача дорівнюють нулю;

- опори обмотки вольтметра і обмотки напруги ватметра дорівнюють нескінченності.

Тоді розрахункова схема електричного кола експериментальної установки має вигляд, наведений на рисунку 2.

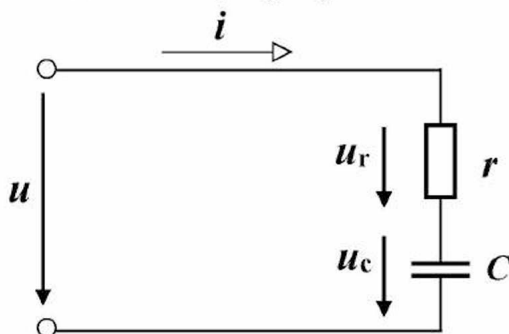


Рисунок 2 - Розрахункова схема електричного кола експериментальної установки.

На розрахунковій схемі введені наступні умовні позначення:

u – миттєва напруга на затискачах кола, B ;

i – миттєвий струм в електричному колі, A ;

r – активний опір резистора, Om ;

C – ємність конденсатора, Φ ;

u_r – миттєва напруга на активному опорі котушки, B ;

u_c – миттєва напруга на ємності конденсатора, B .

3. Уміння, які здобуваються студентами в результаті виконання експериментального дослідження

3.1 Уміти скласти принципову електричну схему кола і зібрати її.

3.2 Уміти скласти розрахункову схему електричного кола та пояснити її.

3.3 Уміти визначити за допомогою експериментальних даних діюче значення сили струму в колі.

- 3.4 Уміти визначити за допомогою експериментальних даних діюче значення напруги на затискачах кола.
- 3.5 Уміти визначити за допомогою експериментальних даних активну потужність, споживану електричним колом.
- 3.6 Уміти визначити за допомогою експериментальних даних активний опір резистора.
- 3.7 Уміти визначити за допомогою експериментальних даних повний опір електричного кола.
- 3.8 Уміти визначити за допомогою експериментальних даних ємнісний опір конденсатора.
- 3.9 Уміти побудувати трикутник опорів в електричному колі змінного синусоїдного струму.
- 3.10 Уміти визначити кут зсуву фаз між напругою і струмом в електричному колі.
- 3.11 Уміти визначити за допомогою експериментальних і розрахункових даних реактивну потужність кола.
- 3.12 Уміти визначити за допомогою експериментальних даних повну потужність кола.
- 3.13 Уміти побудувати трикутник потужностей електричного кола.
- 3.14 Уміти визначити за допомогою експериментальних і розрахункових даних діюче значення напруги на активному опорі резистора.
- 3.15 Уміти визначити за допомогою експериментальних і розрахункових даних діюче значення напруги на ємності конденсатора.
- 3.16 Уміти визначити за допомогою експериментальних і розрахункових даних ємність конденсатора.
- 3.17 Уміти побудувати векторну діаграму діючих значень сили струму й напруг в електричному колі.
- 3.18 Уміти визначити за допомогою експериментальний і розрахункових даних коефіцієнт потужності електричного кола.

4. Завдання з виконання експериментального дослідження

4.1 Зібрати принципову електричну схему кола.

4.2 Подати напругу на затискачі експериментальної установки.

4.3 Зняти показання приладів, результати занести в таблицю 1.

Таблиця 1

№ п/п	Умови проведення експерименту	Показання приладів		
		U, В	I, А	P, Вт
1	Вимикач SA замкнений			

4.4 Визначити за допомогою експериментальних даних діюче значення напруги на затискачах електричного кола.

4.5 Визначити за допомогою експериментальних даних діюче значення сили струму в електричному колі.

4.6 Визначити за допомогою експериментальних даних активну потужність, споживану електричним колом.

4.7 Визначити за допомогою експериментальних даних активний опір резистора, використовуючи рівняння:

$$P = r \cdot I^2.$$

4.8 Визначити за допомогою експериментальних даних повний опір електричного кола, використовуючи запис закону Ома для ділянки кола:

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

4.9 Визначити за допомогою експериментальних даних ємнісний опір конденсатора, використовуючи рівняння:

$$\varepsilon = \sqrt{r^2 + x_C^2}.$$

4.10 Побудувати в обраному масштабі трикутник опорів в електричному колі змінного синусоїдного струму.

4.11 Визначити кут зсуву фаз між напругою та струмом в електричному колі, використовуючи рівняння:

$$\varphi = \arccos \frac{r}{z}.$$

4.12 Визначити за допомогою експериментальних і розрахункових даних реактивну потужність електричного кола, використовуючи рівняння:

$$Q_C = x_C \cdot I^2.$$

4.13 Визначити за допомогою експериментальних даних повну потужність електричного кола, використовуючи рівняння:

$$S = U \cdot I.$$

4.14 Побудувати в обраному масштабі трикутник потужностей електричного кола.

4.15 Визначити за допомогою експериментальних і розрахункових даних діюче значення напруги на активному опорі резистора, використовуючи запис закону Ома для ділянки кола:

$$I = \frac{U_r}{r}.$$

4.16 Визначити за допомогою експериментальних і розрахункових даних діюче значення напруги на ємності конденсатора, використовуючи запис закону Ома для ділянки кола:

$$I = \frac{U_C}{x_C}.$$

4.17 Визначити за допомогою експериментальних і розрахункових даних ємність конденсатора, використовуючи рівняння:

$$x_C = \frac{1}{\omega \cdot C},$$
$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f,$$
$$f = 50 \text{ Гц}.$$

4.18 Побудувати в обраному масштабі векторну діаграму діючих значень сили струму і напруг в електричному колі, прийнявши початкову фазу струму рівною нулю.

4.19 Визначити за допомогою експериментальний і розрахункових даних коефіцієнт потужності електричного кола, використовуючи рівняння:

$$\frac{P}{S} = \cos \varphi .$$

4.20 Занести отримані значення в таблицю 2.

Таблиця 2

№ п/п	Фізичні величини, що характеризують коло												
	$U,$ B	$I,$ A	$P,$ $Вт$	$r,$ $Ом$	$z,$ $Ом$	$x_C,$ $Ом$	$C,$ Φ	$\varphi,$ $град$	$Q_C,$ $вар$	$S,$ $ВА$	$U_r,$ B	$U_C,$ B	$\cos \varphi$
1													

5. Структура звіту

5.1 Назва теми експериментального дослідження.

5.2 Принципова електрична схема експериментальної установки.

5.3 Розрахункова схема електричного кола.

5.4 Таблиця 1.

5.5 Таблиця 2.

5.6 Трикутник опорів.

5.7 Трикутник потужностей.

5.8 Векторна діаграма.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ 4

1. Опис експериментальної установки

Експериментальна установка містить лабораторний автотрансформатор TV , вольтметр PV_1 , підключений до вторинних затискачів лабораторного автотрансформатора TV , амперметр PA , включений послідовно з котушкою K і конденсатором C , вольтметр PV_2 , підключений до затискачів конденсатора, і ватметр PW . Для комутації кола передбачений вимикач SA .

Принципова електрична схема експериментальної установки наведена на рисунку 1.

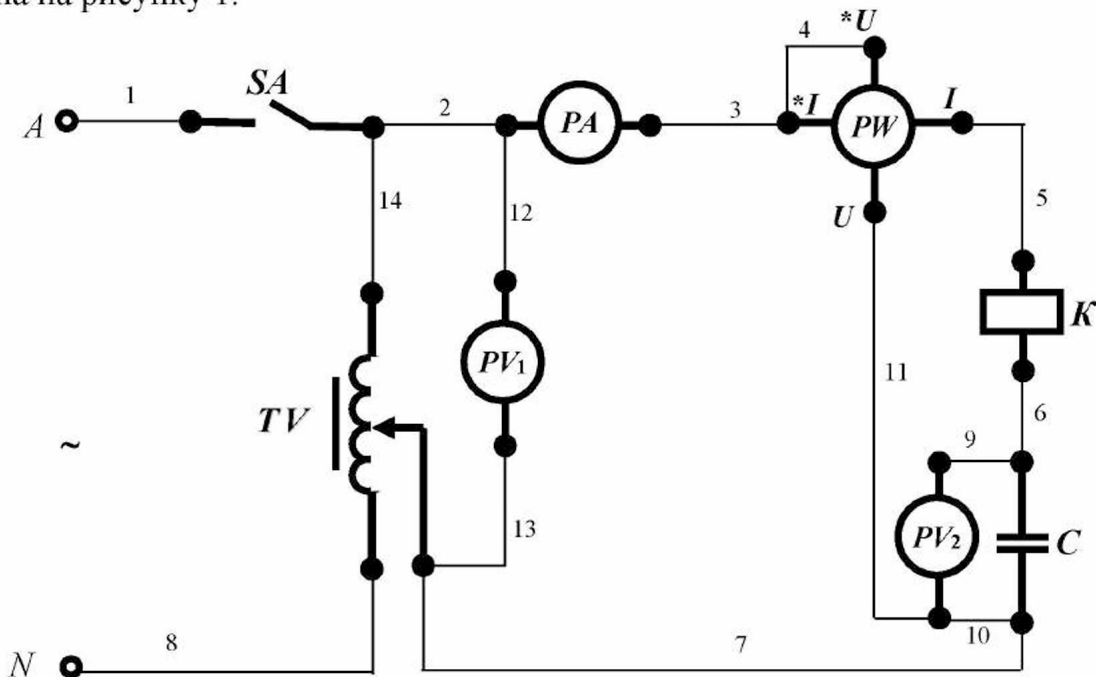


Рисунок 1 - Принципова електрична схема експериментальної установки.

Для складання схеми необхідно мати 14 провідників (на схемі позначені номерами 1-14).

2. Розрахункова схема експериментальної установки

При складанні розрахункової схеми прийняті наступні допущення:

- активний опір конденсатора дорівнює нулю;

- опори з'єднувальних проводів, обмотки амперметра, струмової обмотки ватметра і контактів вимикача дорівнюють нулю;

- опори обмотки вольтметра і обмотки напруги ватметра дорівнюють нескінченності.

Тоді розрахункова схема електричного кола експериментальної установки має вигляд, наведений на рисунку 2.

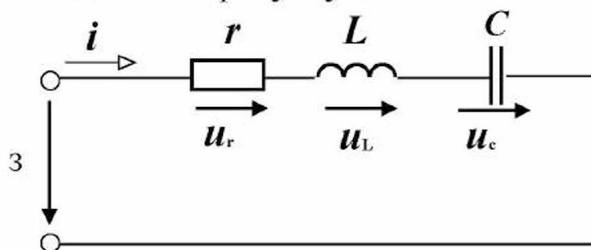


Рисунок 2 - Розрахункова схема електричного кола експериментальної установки.

На розрахунковій схемі введені наступні умовні позначення:

u – миттєва напруга на затискачах кола, B ;

i – миттєвий струм в електричному колі, A ;

r – активний опір котушки, Om ;

L – індуктивність котушки, $Гн$;

C – ємність конденсатора, Φ ;

u_r – миттєва напруга на активному опорі котушки, B ;

u_L – миттєва напруга на індуктивності котушки, B .

u_r – миттєва напруга на активному опорі котушки, B ;

u_c – миттєва напруга на ємності конденсатора, B .

3. Уміння, які здобуваються студентами в результаті виконання експериментального дослідження

3.1 Уміти скласти принципову електричну схему кола і зібрати її.

3.2 Уміти скласти розрахункову схему електричного кола та пояснити її.

- 3.3 Уміти визначити за допомогою експериментальних даних діюче значення сили струму в колі.
- 3.4 Уміти визначити за допомогою експериментальних даних діюче значення напруги на затискачах кола.
- 3.5 Уміти визначити за допомогою експериментальних даних активну потужність, споживану електричним колом.
- 3.6 Уміти визначити за допомогою експериментальних даних активний опір електричного кола.
- 3.7 Уміти визначити за допомогою експериментальних даних повний опір електричного кола.
- 3.8 Уміти визначити за допомогою експериментальних даних еквівалентний реактивний опір електричного кола.
- 3.9 Уміти визначити за допомогою розрахункових даних кут зсуву фаз між напругою і струмом в електричному колі.
- 3.10 Уміти визначити за допомогою експериментальних і розрахункових даних реактивну потужність електричного кола.
- 3.11 Уміти визначити за допомогою експериментальних даних повну потужність електричного кола.
- 3.12 Уміти визначити за допомогою експериментальних і розрахункових даних діюче значення напруги на активному опорі електричного кола.
- 3.13 Уміти визначити за допомогою експериментальних і розрахункових даних діюче значення напруги на індуктивності електричного кола.
- 3.14 Уміти визначити за допомогою експериментальних і розрахункових даних діюче значення напруги на ємності електричного кола.
- 3.15 Уміти побудувати за допомогою експериментальних і розрахункових даних векторну діаграму діючих значень сили струму і напруг в електричному колі.
- 3.16 Уміти визначити за допомогою експериментальних і розрахункових даних коефіцієнт потужності електричного кола.

4. Завдання з виконання експериментального дослідження

4.1 Зібрати принципову електричну схему кола.

4.2 Подати напругу на затискачі експериментальної установки.

4.3 Зняти показання приладів, результати занести в таблицю 1.

Таблиця 1

№ п/п	Умови проведення експерименту	Показання приладів			
		U_1, B	I, A	U_2, B	P, Bm
1	Вимикач SA замкнений				

4.4 Визначити за допомогою експериментальних даних діюче значення напруги на затискачах електричного кола.

4.5 Визначити за допомогою експериментальних даних діюче значення сили струму в електричному колі.

4.6 Визначити за допомогою експериментальних даних діюче значення напруги на конденсаторі.

4.7 Визначити за допомогою експериментальних даних активну потужність, споживану електричним колом.

4.8 Визначити за допомогою експериментальних даних активний опір електричного кола, використовуючи рівняння:

$$P = r \cdot I^2.$$

4.9 Визначити за допомогою експериментальних даних повний опір електричного кола, використовуючи запис закону Ома для ділянки кола:

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

4.10 Визначити за допомогою експериментальних і розрахункових даних загальний реактивний опір електричного кола, використовуючи рівняння:

$$Z = \sqrt{r^2 + x^2}.$$

4.11 Визначити за допомогою експериментальних даних реактивний опір ємності конденсатора, використовуючи рівняння:

$$I = \frac{U_2}{x_C}.$$

4.12 Визначити за допомогою розрахункових даних реактивний опір індуктивності котушки, використовуючи рівняння:

$$x = x_L - x_C.$$

4.13 Визначити за допомогою розрахункових даних кут зсуву фаз між напругою і струмом котушки, використовуючи рівняння:

$$\varphi = \arccos \frac{r}{z}.$$

4.14 Визначити за допомогою експериментальних і розрахункових даних загальну реактивну потужність електричного кола, використовуючи рівняння:

$$Q = x \cdot I^2.$$

4.15 Визначити за допомогою експериментальних і розрахункових даних реактивну потужність індуктивності електричного кола, використовуючи рівняння:

$$Q_L = x_L \cdot I^2.$$

4.16 Визначити за допомогою експериментальних і розрахункових даних реактивну потужність ємності електричного кола, використовуючи рівняння:

$$Q_C = x_C \cdot I^2.$$

4.17 Визначити за допомогою експериментальних даних повну потужність електричного кола, використовуючи рівняння:

$$S = U \cdot I.$$

4.18 Визначити за допомогою експериментальних і розрахункових даних діюче значення напруги на активному опорі електричного кола, використовуючи запис закону Ома для ділянки кола:

$$I = \frac{U_r}{r}.$$

4.19 Визначити за допомогою експериментальних і розрахункових даних діюче значення напруги на індуктивності котушки, використовуючи запис закону Ома для ділянки кола:

$$I = \frac{U_L}{x_L}.$$

4.20 Визначити за допомогою експериментальних і розрахункових даних діюче значення напруги на ємності конденсатора, використовуючи запис закону Ома для ділянки кола:

$$I = \frac{U_C}{x_C}.$$

4.21 Визначити за допомогою розрахункових даних ємність конденсатора, використовуючи рівняння:

$$x_C = \frac{1}{\omega \cdot C},$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f,$$

$$f = 50 \text{ Гц}.$$

4.21 Визначити за допомогою розрахункових даних індуктивність котушки, використовуючи рівняння:

$$x_L = \omega \cdot L,$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f,$$

$$f = 50 \text{ Гц}.$$

4.18 Побудувати в обраному масштабі векторну діаграму діючих значень сили струму і напруг в електричному колі, прийнявши, що початкова фаза струму дорівнює нулю.

4.19 Визначити за допомогою експериментальних і розрахункових даних коефіцієнт потужності електричного кола, використовуючи рівняння:

$$\frac{P}{S} = \cos \varphi .$$

4.20 Занести отримані значення в таблицю 2 і таблицю 3.

Таблиця 2

№ п/п	Фізичні величини, що характеризують коло										
	$U,$ B	$I,$ A	$U_C,$ B	$P,$ Bm	$r,$ Om	$z,$ Om	$x,$ Om	$x_C,$ Om	$C,$ Φ	$x_L,$ Om	$L,$ $Гн$
1											

Таблиця 3

№ п/п	Фізичні величини, що характеризують коло								
	$\varphi,$ $град$	$Q,$ $вар$	$Q_L,$ $вар$	$Q_C,$ $вар$	$S,$ $ВА$	$U_r,$ B	$U_L,$ B	$U_C,$ B	$\cos \varphi$
1									

5. Структура звіту

- 5.1 Назва теми експериментального дослідження.
- 5.2 Принципова електрична схема експериментальної установки.
- 5.3 Розрахункова схема електричного кола.
- 5.4 Таблиця 1.
- 5.5 Таблиця 2.
- 5.6 Таблиця 3.
- 5.7 Векторна діаграма.

Тема 4 СИМЕТРИЧНІ НЕРОЗГАЛУЖЕНІ ТРИФАЗНІ КОЛА СИНУСОЇДНОГО СТРУМУ

4.1 Трифазний генератор

Трифазний генератор має дві основні частини: статор і ротор. На статорі розміщуються три самостійні обмотки, осі яких зсувні одна щодо іншої в просторі на 120° (рис.4.1).

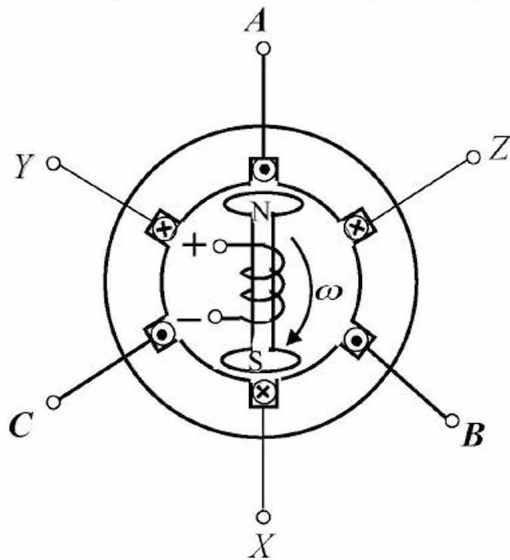


Рис.4.1

Разом з ротором обертається створене його струмом магнітне поле й у кожній обмотці наводиться е.р.с. Оскільки е.р.с. досягає максимального значення, коли осі обмотки 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:

$$e_A = E_{Am} \sin \omega t ; \quad (4.1)$$

$$e_B = E_{Bm} \sin(\omega t - 120^\circ); \quad (4.2)$$

$$e_C = E_{Cm} \sin(\omega t - 240^\circ). \quad (4.3)$$

Зобразимо електрорушійні сили графічно (рис.4.2).

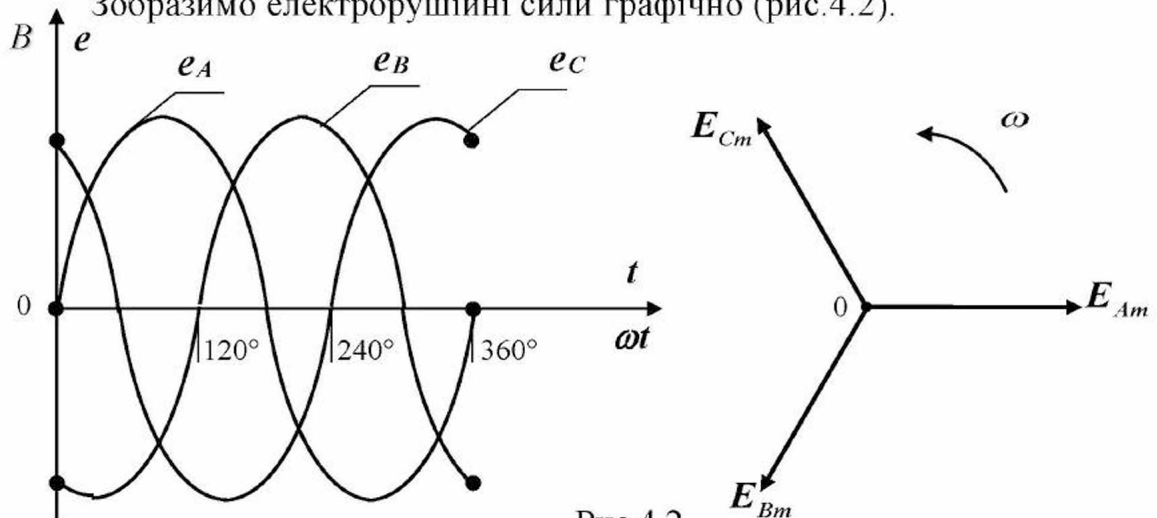


Рис.4.2

Приклад 4.1

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

Записати миттєві значення фазних е.р.с., прийнявши $\psi_{eA} = 0$.

Рішення.

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.:

$$e_A = 310 \sin \omega t;$$

$$e_B = 310 \sin(\omega t - 120^\circ);$$

$$e_C = 310 \sin(\omega t - 240^\circ).$$

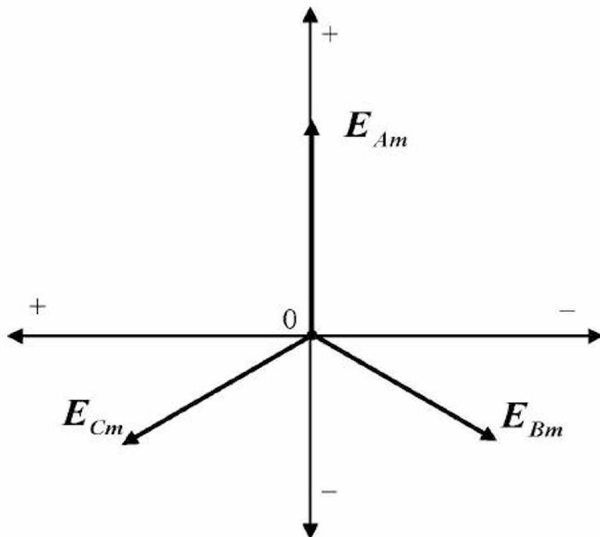


Рис.4.3

Побудуємо вектори е.р.с. на площині, осі якої зсуємо на 90° проти годинникової стрілки (рис.4.3).

Система трьох е.р.с., однакових за величиною і зсунутих 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.4.3).

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 нулю.
8. Складіть розрахункову схему фази *A* генератора для миттєвих значень.
9. Зобразіть векторами на площині фазні е.р.с.

4.2 Трифазні системи

Розрахункова схема окремої фази генератора (наприклад, фази A) має вигляд, зображений на рис.4.4. Але частіше її показують так, як зображено на рис.4.5. На цих схемах r_A , x_A , z_A – відповідно активний, реактивний і повний опори обмотки.

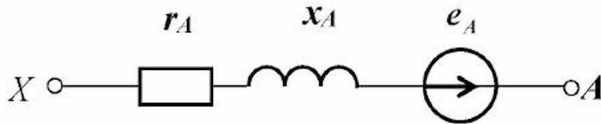


Рис.4.4

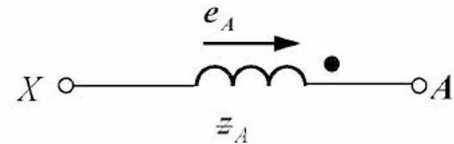


Рис.4.5

Кожну фазу (обмотку) трифазного генератора можна з'єднати з окремим споживачем електричної енергії (фазою навантаження), як показано на рис.4.6. У цьому випадку створюється **незв'язана трифазна система** з трьома самостійними колами і шістьма з'єднувальними проводами. Така система неекономічна і тому не знайшла застосування.

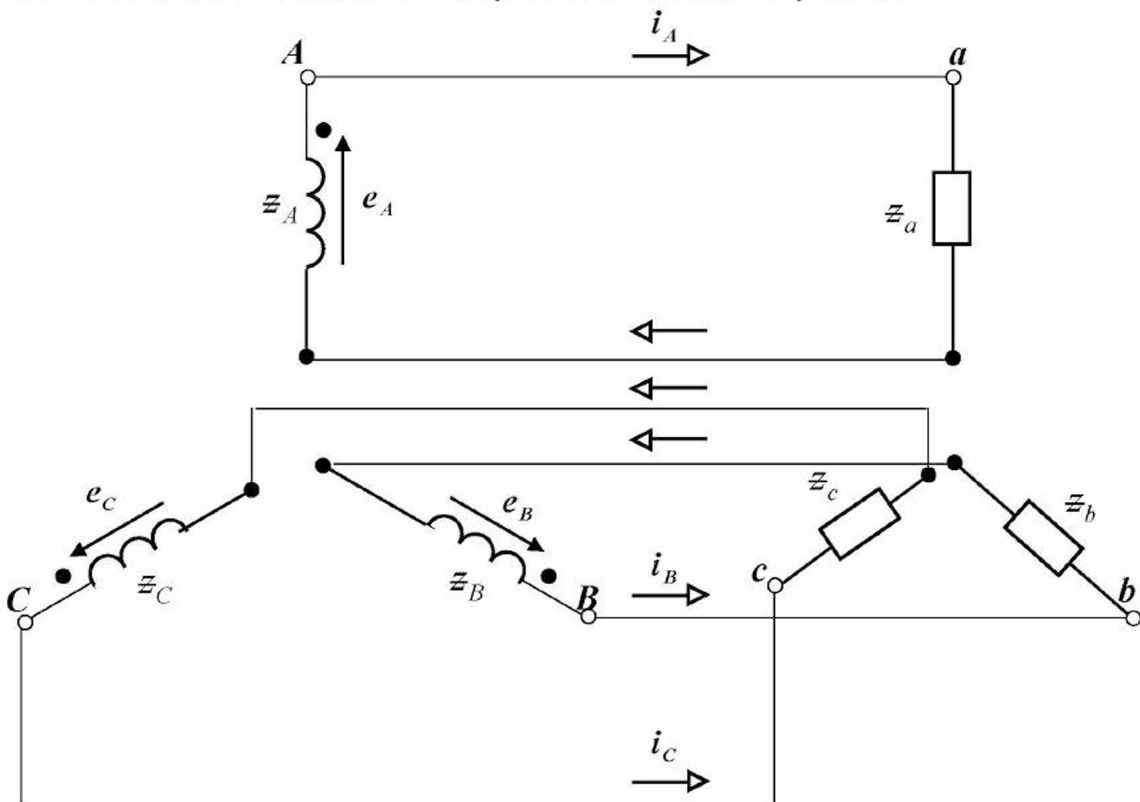


Рис.4.6

Три фази генератора або три фази навантаження можна з'єднати за схемою **зірки**, при цьому однойменні зажимачі фаз генератора або фаз навантаження поєднуються в один вузол (рис.4.7).

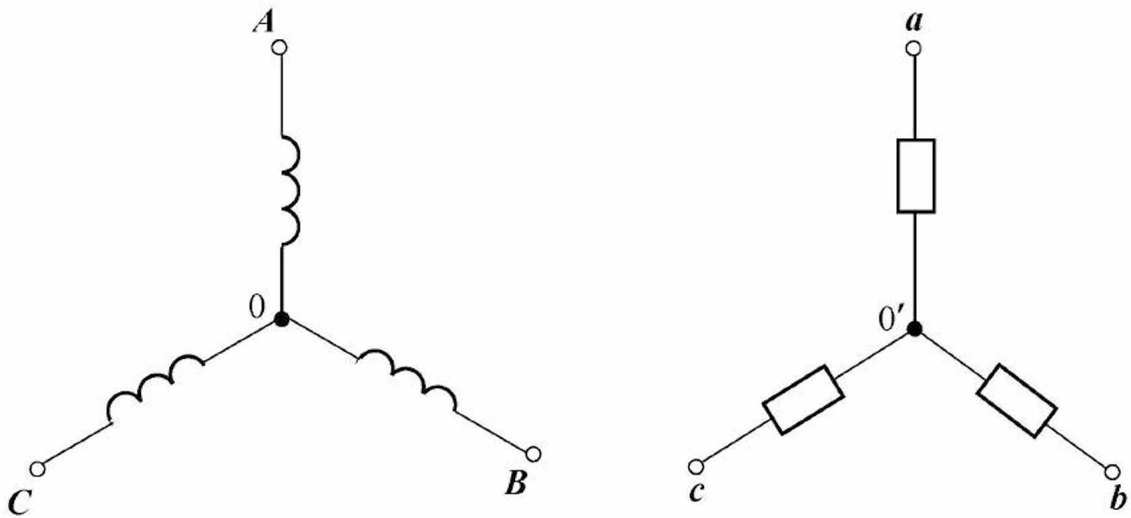


Рис.4.7

Якщо фази генератора і навантаження, які з'єднані за схемою зірки, поєднати між собою, то створиться зв'язана трифазна чотирипровідна система (рис.4.8).

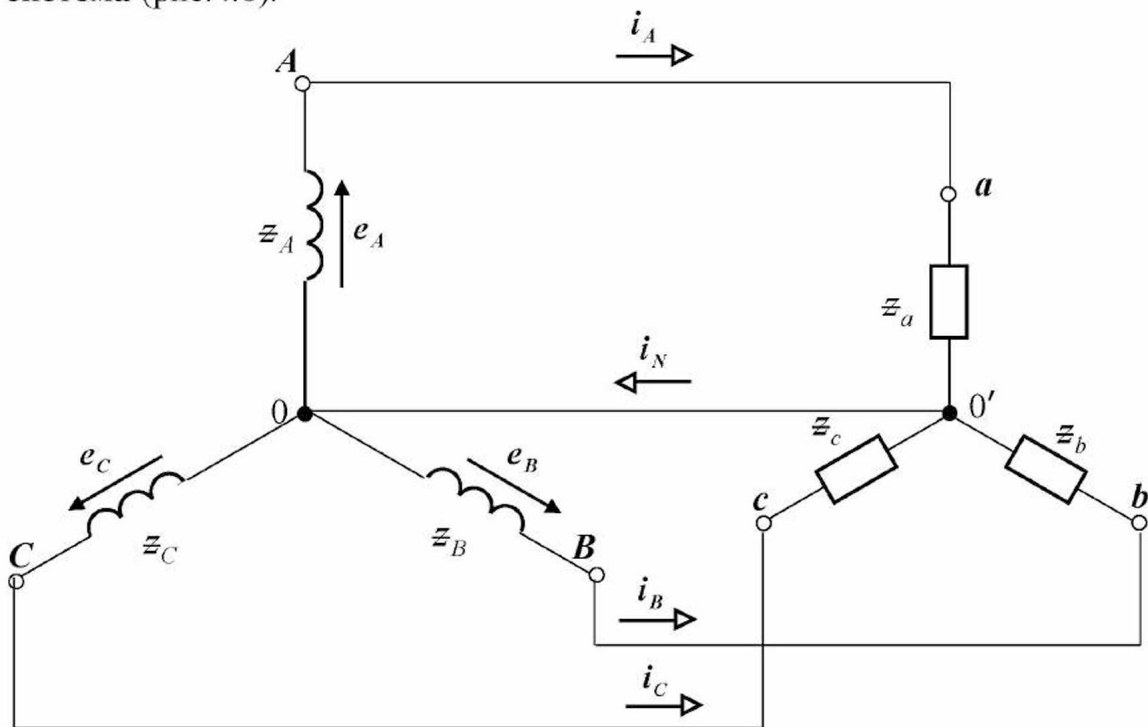


Рис.4.8

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

Відповідно до першого закону Кірхгофа

$$i_N = i_A + i_B + i_C. \quad (4.4)$$

Три фази генератора або три фази навантаження можна з'єднати за схемою **трикутника**: кінець першої фази з'єднується з початком другої і так далі (рис.4.9).

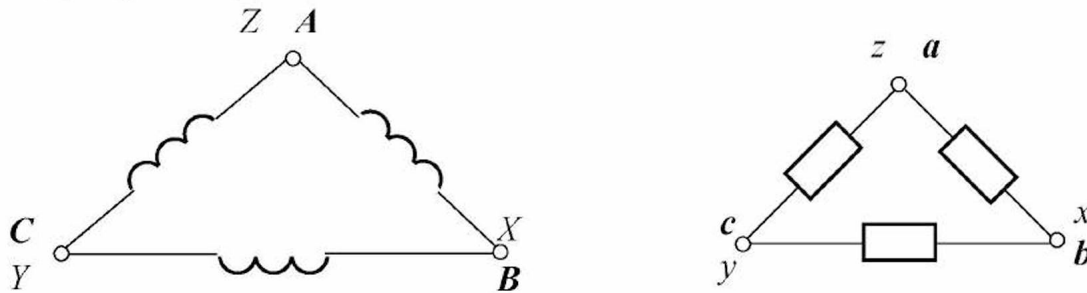


Рис.4.9

Якщо фази генератора і навантаження, які з'єднані за схемою трикутника, поєднати між собою, то створиться зв'язана трифазна трипровідна система (рис.4.10).

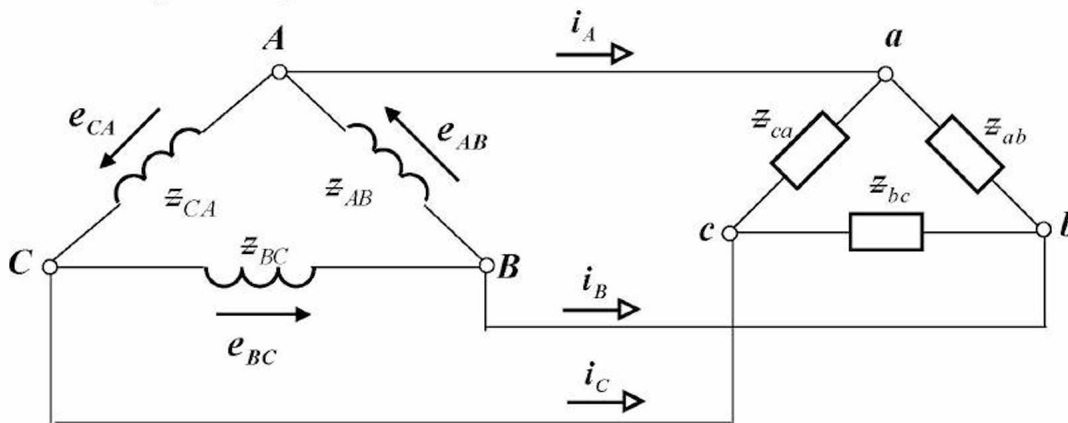


Рис.4.10

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. Що таке зв'язана трифазна система?
5. Що таке лінійний провід?
6. Що таке нульовий (нейтральний) провід?
7. Приведіть приклад зв'язаної трифазної чотирипровідної системи.
8. Приведіть приклади зв'язаних трифазних трипровідних систем.

4.3 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.4.11).

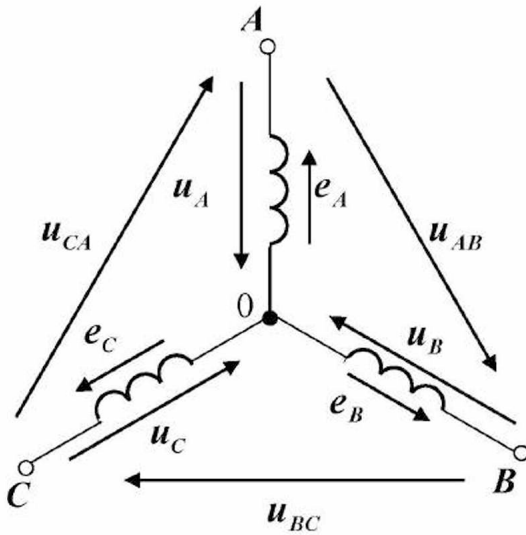


Рис.4.11

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

$$\varphi_0 = 0; \quad (4.5)$$

$$\varphi_A = e_A; \quad (4.6)$$

$$\varphi_B = e_B; \quad (4.7)$$

$$\varphi_C = e_C. \quad (4.8)$$

Різниця потенціалів на затискачах фази генератора називається **фазною напругою**. Знайдемо миттєві значення фазних напруг генератора:

$$u_A = \varphi_A - \varphi_0 = e_A; \quad (4.9)$$

$$u_B = \varphi_B - \varphi_0 = e_B; \quad (4.10)$$

$$u_C = \varphi_C - \varphi_0 = e_C. \quad (4.11)$$

Різниця потенціалів на вихідних затискачах генератора називається **лінійною напругою**. Знайдемо миттєві значення лінійних напруг генератора:

$$u_{AB} = \varphi_A - \varphi_B = u_A - u_B; \quad (4.12)$$

$$u_{BC} = \varphi_B - \varphi_C = u_B - u_C; \quad (4.13)$$

$$u_{CA} = \varphi_C - \varphi_A = u_C - u_A. \quad (4.14)$$

Побудуємо векторну діаграму фазних і лінійних напруг генератора (для діючих значень) на площині (рис.4.12).

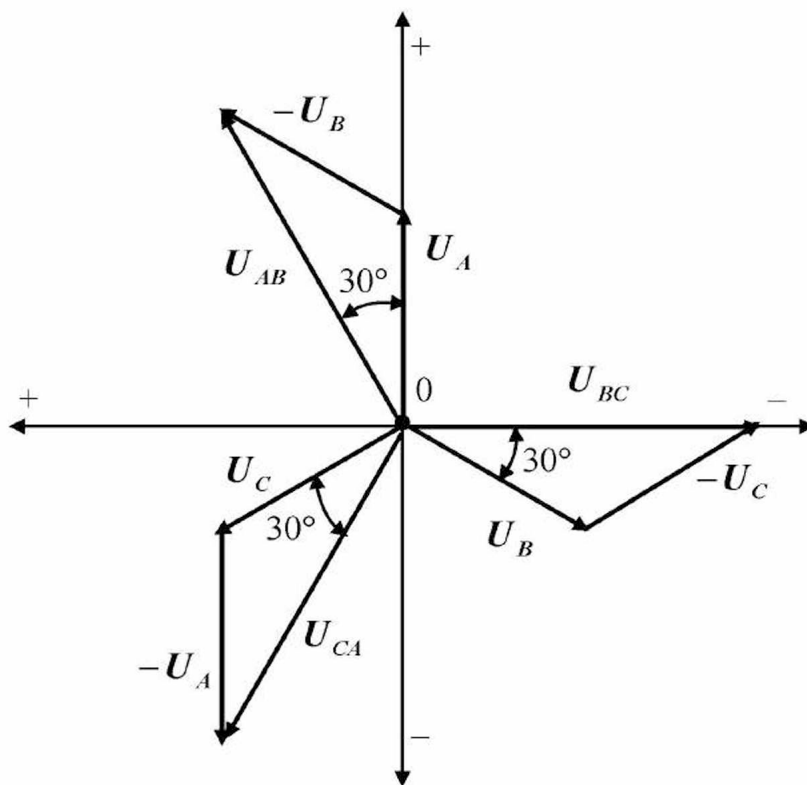


Рис.4.12

Запишемо миттєві значення фазних і лінійних напруг генератора:

$$u_A = U_{\phi m} \sin \omega t; \quad (4.15)$$

$$u_B = U_{\phi m} \sin(\omega t - 120^\circ); \quad (4.16)$$

$$u_C = U_{\phi m} \sin(\omega t - 240^\circ); \quad (4.17)$$

$$u_{AB} = U_{\text{л}m} \sin(\omega t + 30^\circ); \quad (4.18)$$

$$u_{BC} = U_{\text{л}m} \sin(\omega t - 90^\circ); \quad (4.19)$$

$$u_{CA} = U_{\text{л}m} \sin(\omega t - 210^\circ). \quad (4.20)$$

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

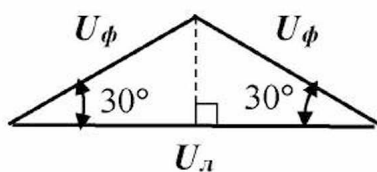


Рис.4.13

Встановимо зв'язок між діючими значеннями фазних (U_ϕ) і лінійних ($U_\text{л}$) напруг генератора, для чого розглянемо трикутник напруг (рис.4.13), який одержано з векторної діаграми.

З трикутника напруг знаходимо:

$$U_{л} = 2U_{\phi} \cos 30^{\circ} = 2U_{\phi} \frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3} U_{\phi}. \quad (4.21)$$

Приклад 4.2

Записати миттєві значення фазних і лінійних напруг генератора на холостому ході, якщо діюче значення фазної напруги дорівнює **220 В** і $\psi_{uA} = 0$.

Рішення.

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:

$$u_A = 310 \sin \omega t; \quad u = 310 \sin(\omega t - 120^{\circ}); \quad u = 310 \sin(\omega t - 240^{\circ}).$$

3. Діюче значення лінійної напруги:

$$U_{л} = \sqrt{3} \cdot U_{\phi};$$

$$U_{л} = \sqrt{3} \cdot 220 = 380 \text{ В}.$$

4. Максимальне значення лінійної напруги:

$$U_{л m} = \sqrt{2} \cdot U_{л};$$

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

5. Миттєві значення лінійних напруг:

$$u_{AB} = 536 \sin(\omega t + 30^{\circ}); \quad u_{BC} = 536 \sin(\omega t - 90^{\circ}); \quad u_{CA} = 536 \sin(\omega t - 210^{\circ}).$$

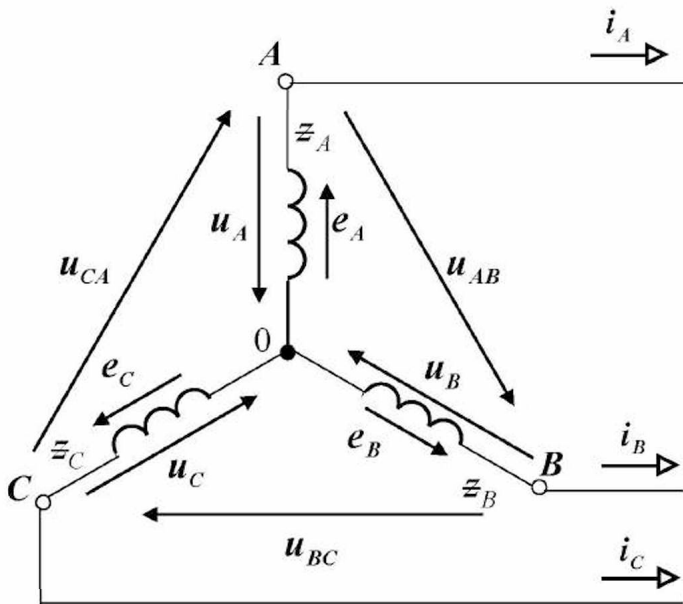


Рис.4.14

Складемо розрахункову схему генератора, фази якого з'єднані зіркою, у випадку, коли генератор навантажений (рис.4.14).

Введемо поняття **фазного струму**, під яким будемо розуміти струм, що проходить по фазі генератора. При з'єднанні обмоток генератора зіркою фазний струм дорівнює лінійному струму, тобто

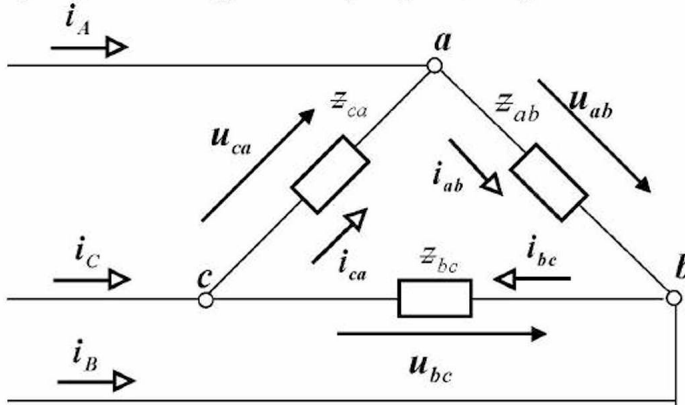
$$I_{\phi} = I_{л}. \quad (4.22)$$

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?

4.4 З'єднання фаз навантаження трикутником

Складемо розрахункову схему навантаження при з'єднанні його фаз трикутником (рис.4.15). При цьому:



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} – лінійні (фазні) напруги навантаження, B .

Рис.4.15

Як видно з розрахункової схеми, фазна напруга навантаження дорівнює лінійній напрузі навантаження, тобто

$$U_{\phi} = U_{\ell} . \quad (4.23)$$

За першим законом Кірхгофа знайдемо лінійні струми через фазні:

$$i_A = i_{ab} - i_{ca} ; \quad (4.24)$$

$$i_B = i_{bc} - i_{ab} ; \quad (4.25)$$

$$i_C = i_{ca} - i_{bc} . \quad (4.26)$$

Побудуємо векторну діаграму лінійних напруг, фазних і лінійних струмів (для діючих значень) на площині (рис.4.16).

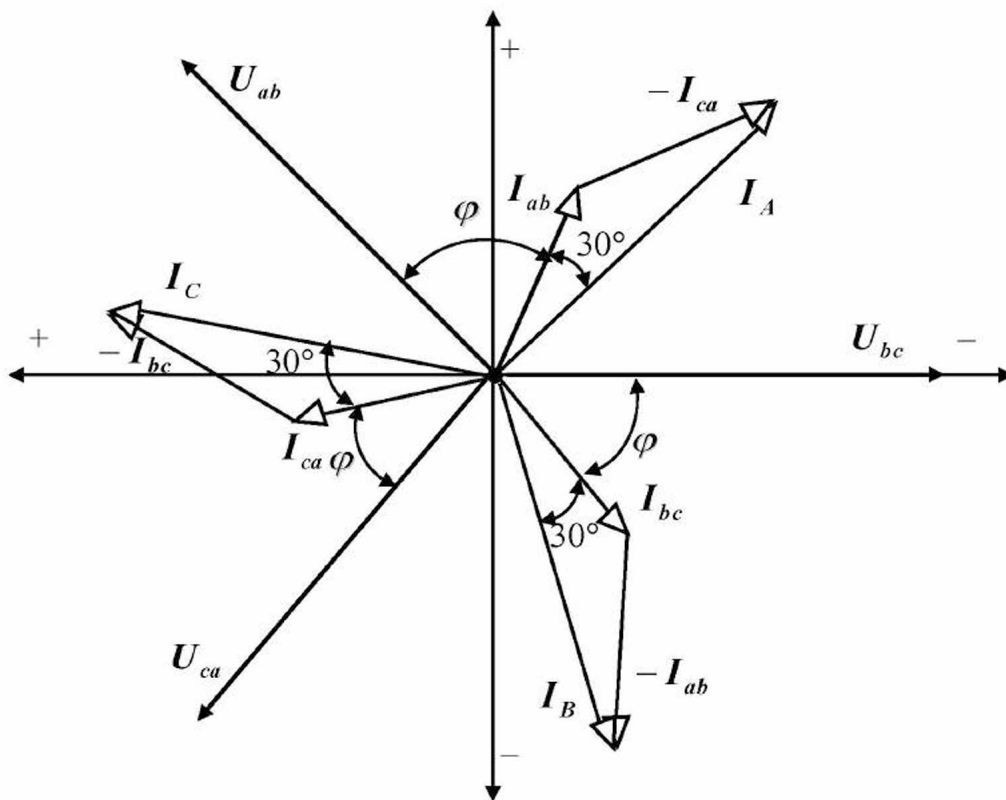


Рис.4.16

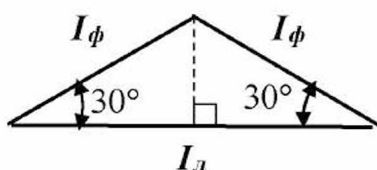


Рис.4.17

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.4.17), який одержано з векторної діаграми.

З трикутника струмів знаходимо:

$$I_L = 2 I_\phi \cos 30^\circ = 2 I_\phi \frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3} I_\phi . \quad (4.27)$$

Запитання для самоконтролю

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

6. Яке співвідношення між значеннями фазних і лінійних напруг навантаження при з'єднанні його фаз трикутником?
7. Яке співвідношення між значеннями фазних і лінійних струмів при з'єднанні навантаження трикутником?

4.5 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 можна розрахувати в такий спосіб:

$$\begin{cases} P_{\phi} = U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi ; \\ Q_{\phi} = U_{\phi} I_{\phi} \sin \varphi ; \\ S_{\phi} = U_{\phi} I_{\phi} . \end{cases} \quad (4.28)$$

Потужності, які споживають три фази навантаження, можна розрахувати, помноживши на кількість фаз навантаження (тобто на три) потужності, які споживає одна фаза:

$$\begin{cases} P = 3 U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi ; \\ Q = 3 U_{\phi} I_{\phi} \sin \varphi ; \\ S = 3 U_{\phi} I_{\phi} . \end{cases} \quad (4.29)$$

Визначимо ці потужності через лінійні напруги і струми:

$$\begin{cases} P = 3 \frac{U_{\ell}}{\sqrt{3}} I_{\ell} \cos \varphi = \sqrt{3} U_{\ell} I_{\ell} \cos \varphi ; \\ Q = 3 \frac{U_{\ell}}{\sqrt{3}} I_{\ell} \sin \varphi = \sqrt{3} U_{\ell} I_{\ell} \sin \varphi ; \\ S = 3 \frac{U_{\ell}}{\sqrt{3}} I_{\ell} = \sqrt{3} U_{\ell} I_{\ell} . \end{cases} \quad (4.30)$$

При з'єднанні фаз навантаження трикутником вирази (4.28) і (4.29) справедливі, тільки в цих виразах будуть свої фазні струми і напруги. Визначимо ці потужності через лінійні напруги і струми:

$$\begin{cases} P = 3 U_{\ell} \frac{I_{\ell}}{\sqrt{3}} \cos \varphi = \sqrt{3} U_{\ell} I_{\ell} \cos \varphi ; \\ Q = 3 U_{\ell} \frac{I_{\ell}}{\sqrt{3}} \sin \varphi = \sqrt{3} U_{\ell} I_{\ell} \sin \varphi ; \\ S = 3 U_{\ell} \frac{I_{\ell}}{\sqrt{3}} = \sqrt{3} U_{\ell} I_{\ell} . \end{cases} \quad (4.31)$$

Таким чином, потужності, які споживає трифазне навантаження (незалежно від схеми його з'єднання), можна розрахувати в такий спосіб:

$$\begin{cases} P = \sqrt{3} U_{л} I_{л} \cos \varphi; \\ Q = \sqrt{3} U_{л} I_{л} \sin \varphi; \\ S = \sqrt{3} U_{л} I_{л}. \end{cases} \quad (4.32)$$

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?

4.6 Розрахунок нерозгалужених трифазних кіл синусоїдного струму

Розглянемо розрахункову схему трифазного трипровідного електричного кола, яке складається з ідеального генератора, з'єданого зіркою, ідеальної лінії електропередачі, навантаження, з'єданого зіркою (рис.4.18).

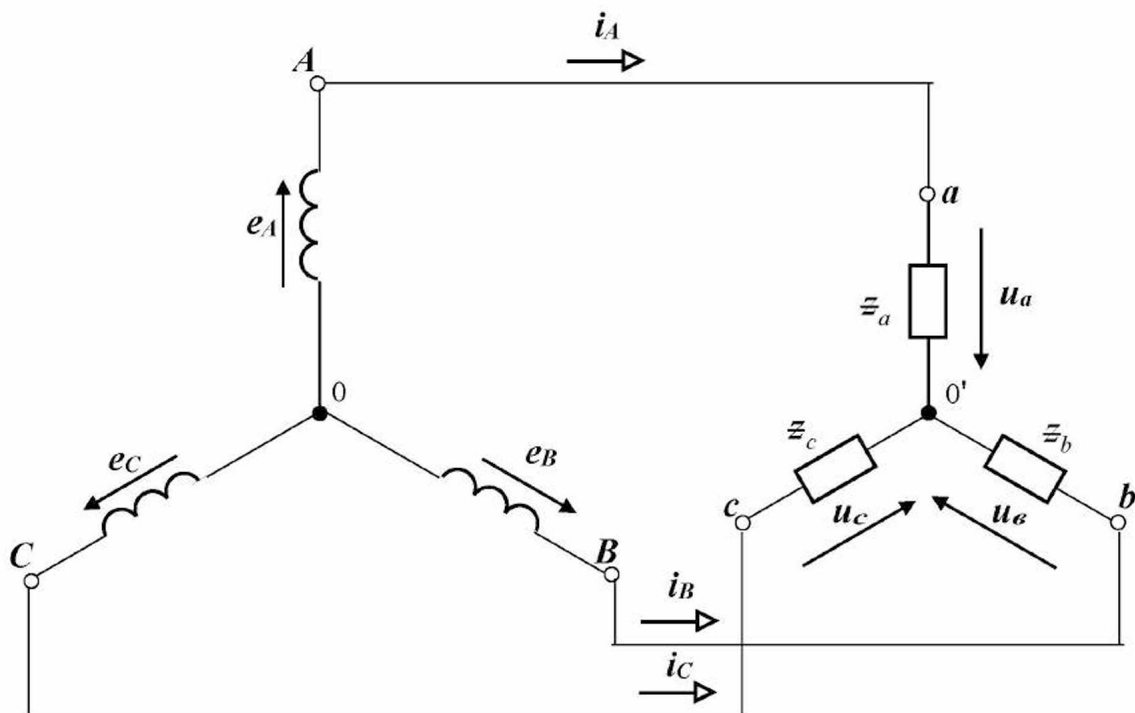


Рис.4.18

Нехай задано діюче значення електрорушійної сили E в фазі симетричного генератора і повні опори фаз навантаження

$$z_a = z_b = z_c,$$

а також коефіцієнти потужності фаз навантаження

$$\cos \varphi_a = \cos \varphi_b = \cos \varphi_c = \cos \varphi.$$

Потрібно 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. Складемо 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 можна з'єднати точки 0 і 0', від чого режим роботи кола не зміниться.

Виділяємо одну фазу кола (рис.4.19).

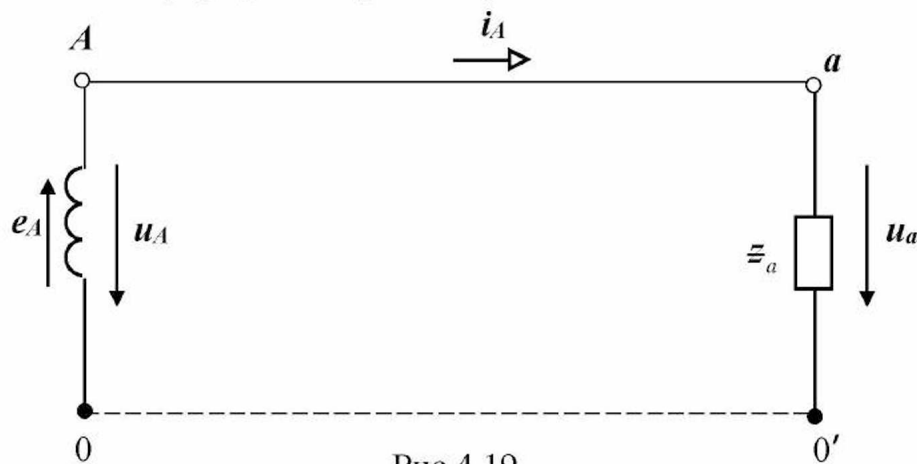


Рис.4.19

2. Визначаємо діючі значення сил струмів.

У даному випадку фазний струм генератора дорівнює лінійному струму і дорівнює фазному струму навантаження. Наприклад, для фази A він дорівнює:

$$I_A = \frac{E_A}{z_a}.$$

Інші струми I_B і I_C дорівнюють струму I_A .

3. Визначаємо діючі значення фазних напруг.

У даному випадку фазні напруги генератора дорівнюють фазним напругам навантаження. Наприклад, для фази a воно дорівнює:

$$U_a = z_a I_a.$$

Інші напруги U_A, U_B, U_C, U_b, U_c дорівнюють U_a .

4. Визначаємо діючі значення лінійних напруг.

У даному випадку лінійні напруги генератора дорівнюють лінійним напругам навантаження. Наприклад:

$$U_{ab} = \sqrt{3} U_a.$$

Інші напруги $U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}, U_{bc}, U_{ca}$ дорівнюють U_{ab} .

5. Визначаємо активну потужність.

У даному випадку активна потужність, яка віддається генератором, дорівнює активній потужності, яку споживає навантаження:

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

або

$$P = \sqrt{3} U_L I_L \cos \varphi,$$

де U_ϕ і U_L – відповідно фазна і лінійна напруги, V ;
 I_ϕ і I_L – відповідно фазний і лінійний струми, A .

6. Визначаємо реактивну потужність.

У даному випадку реактивна потужність, яка віддається генератором, дорівнює реактивній потужності, яку споживає навантаження:

$$Q = 3 U_\phi I_\phi \sin \varphi$$

або

$$Q = \sqrt{3} U_L I_L \sin \varphi.$$

7. Визначаємо повну потужність.

У даному випадку повна потужність, яка віддається генератором, дорівнює повній потужності, яку споживає навантаження:

$$S = 3 U_\phi I_\phi$$

або

$$S = \sqrt{3} U_L I_L.$$

Приклад 4.3

Трифазне симетричне навантаження одержує живлення від трифазного симетричного генератора за допомогою ідеальної лінії електропередачі. Генератор з'єднаний зіркою, навантаження з'єднане зіркою, лінія електропередачі трипровідна. 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.

Рішення.

1. Розрахункова схема кола приведена на рис.4.18, а для однієї фази – на рис.4.19.

2. Визначаємо повні опори навантаження:

$$z_{\phi} = \sqrt{r_{\phi}^2 + x_{\phi}^2} = \sqrt{12^2 + 16^2} = \sqrt{144 + 256} = \sqrt{400} = 20 \text{ Ом} .$$

3. Визначаємо діючі значення фазних і лінійних сил струмів генератора і навантаження:

$$I_{\phi} = I_{л} = \frac{E}{z_{\phi}} = \frac{300}{20} = 15 \text{ А} .$$

4. Визначаємо діючі значення фазних напруг генератора і навантаження:

$$U_{\phi} = z_{\phi} I_{\phi} = 20 \cdot 15 = 300 \text{ В} .$$

5. Визначаємо діючі значення лінійних напруг генератора і навантаження:

$$U_{л} = \sqrt{3} U_{\phi} = 1,73 \cdot 300 = 519 \text{ В} .$$

6. Визначаємо кут зсуву фаз навантаження:

$$\varphi = \arccos \frac{r_{\phi}}{z_{\phi}} = \arccos \frac{12}{20} = \arccos 0,6 = 53^{\circ} .$$

7. Визначаємо активну потужність, яка віддається генератором і споживається навантаженням:

$$P = 3 U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi = 3 \cdot 300 \cdot 15 \cdot 0,6 = 8100 \text{ Вт} .$$

8. Визначаємо реактивну потужність генератора і навантаження:

$$Q = 3 U_{\phi} I_{\phi} \sin \varphi = 3 \cdot 300 \cdot 15 \cdot 0,8 = 10800 \text{ вар} .$$

9. Визначаємо повну потужність, яка віддається генератором і споживається навантаженням:

$$S = 3 U_{\phi} I_{\phi} = 3 \cdot 300 \cdot 15 = 13500 \text{ ва} .$$

Запитання для самоконтролю

1. Складіть розрахункову схему трифазного кола, яке складається з трифазного ідеального генератора, з'єднаного зіркою, ідеальної трипровідної лінії електропередачі, навантаження, з'єднаного зіркою.
2. Приведіть алгоритм розрахунку зазначеного 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 ідеальної лінії електропередачі. Генератор з'єднаний зіркою, навантаження з'єднане зіркою, лінія електропередачі трипровідна. Активний опір фази навантаження дорівнює **6 Ом**, індуктивний опір фази навантаження дорівнює **8 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 діючі значення фазних напруг навантаження.
5. Записати вирази миттєвих значень фазних напруг навантаження, прийнявши $\psi_{u,a} = 0$.
6. Визначити діючі значення лінійних напруг навантаження.
7. Записати вирази миттєвих значень лінійних напруг навантаження.
8. Визначити повні опори фаз навантаження.
9. Визначити діючі значення сил фазних струмів навантаження.
10. Визначити діючі значення сил лінійних струмів.
11. Визначити кут зсуву фаз між фазним струмом і фазною напругою навантаження.
12. Записати вирази миттєвих сил фазних струмів навантаження.
13. Побудувати векторну діаграму напруг навантаження (для діючих значень).
14. Визначити коефіцієнт потужності навантаження.
15. Визначити активну потужність навантаження.
16. Визначити реактивну потужність навантаження.
17. Визначити повну потужність навантаження.

4.7 Переключення навантаження із зірки на трикутник

Одержимо основні співвідношення між струмами, а також між потужностями, при переключенні схеми з'єднання фаз навантаження зіркою на схему трикутника (рис.4.20).

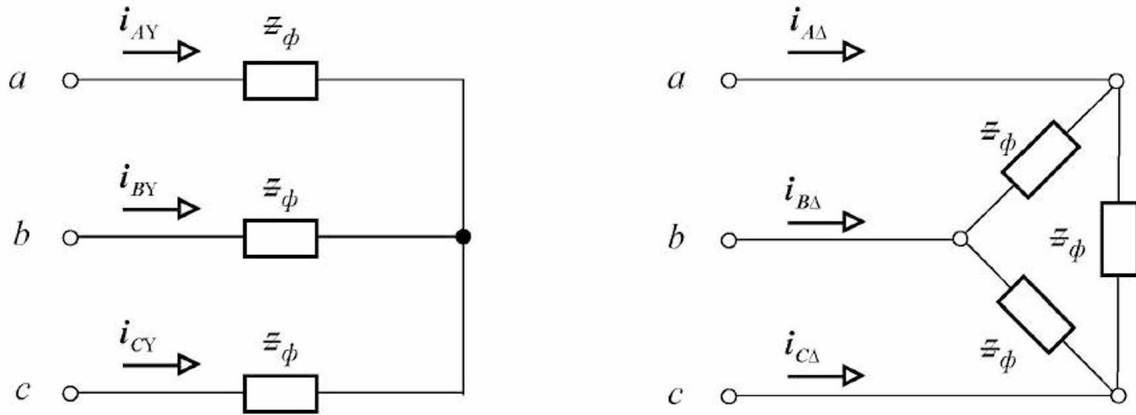


Рис.4.20

При з'єднанні фаз навантаження зіркою лінійний (фазний) струм дорівнює:

$$I_{лY} = I_{\phi Y} = \frac{U_{\phi}}{Z_{\phi}} = \frac{U_{л}}{\sqrt{3}Z_{\phi}}. \quad (4.33)$$

Знаходимо потужності при з'єднанні фаз навантаження зіркою:

$$P_Y = \sqrt{3} U_{л} I_{л} \cos \varphi = \sqrt{3} U_{л} \frac{U_{л}}{\sqrt{3}Z_{\phi}} \cos \varphi = \frac{U_{л}^2}{Z_{\phi}} \cos \varphi; \quad (4.34)$$

$$Q_Y = \frac{U_{л}^2}{Z_{\phi}} \sin \varphi; \quad (4.35)$$

$$S_Y = \frac{U_{л}^2}{Z_{\phi}}. \quad (4.36)$$

При з'єднанні фаз навантаження трикутником лінійний струм більше фазного в $\sqrt{3}$ раз:

$$I_{л\Delta} = \sqrt{3} I_{\phi\Delta} = \sqrt{3} \frac{U_{л}}{Z_{\phi}}. \quad (4.37)$$

Знаходимо потужності при з'єднанні фаз навантаження трикутником:

$$P_{\Delta} = \sqrt{3} U_{л} I_{л} \cos \varphi = \sqrt{3} U_{л} \sqrt{3} \frac{U_{л}}{z_{\phi}} \cos \varphi = 3 \frac{U_{л}^2}{z_{\phi}} \cos \varphi ; \quad (4.38)$$

$$Q_{\Delta} = 3 \frac{U_{л}^2}{z_{\phi}} \sin \varphi ; \quad (4.39)$$

$$S_{\Delta} = 3 \frac{U_{л}^2}{z_{\phi}} . \quad (4.40)$$

Співвідношення між струмами дорівнює:

$$\frac{I_{л\Delta}}{I_{лY}} = \frac{\sqrt{3} U_{л}}{z_{\phi}} : \frac{U_{л}}{\sqrt{3} z_{\phi}} = 3 . \quad (4.41)$$

Знайдемо співвідношення між потужностями:

$$\frac{P_{\Delta}}{P_Y} = \frac{3 U_{л}^2 \cos \varphi}{z_{\phi}} : \frac{U_{л}^2 \cos \varphi}{z_{\phi}} = 3 . \quad (4.42)$$

Аналогічно:

$$\frac{Q_{\Delta}}{Q_Y} = 3 ; \quad \frac{S_{\Delta}}{S_Y} = 3 . \quad (4.43)$$

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?

ТЕМАТИЧНЕ КОМПЛЕКСНЕ КВАЛІФІКАЦІЙНЕ ЗАВДАННЯ

Умова

Від симетричного трифазного ідеального генератора по ідеальній трипровідній лінії електропередачі живляться три однакові котушки індуктивності, з'єднані зіркою. Для комутації кола передбачений трьохполюсний вимикач. У колі для вимірювання сили струму у фазі a навантаження передбачений амперметр, для вимірювання активної потужності фази a навантаження передбачений ватметр, для вимірювання напруги на фазі a навантаження передбачений вольтметр. При включенні електроустановки прилади показали наступні значення: амперметр – I_a , ватметр – P_a , вольтметр – U_a .

Завдання

1. Скласти принципову електричну схему описаного електричного кола. Окремі елементи кола виділити жирними лініями, а їх з'єднуючі проводи – тонкими лініями. Позначити номери проводів.
2. Визначити активні опори катушок.
3. Визначити повні опори катушок.
4. Визначити індуктивні опори катушок.
5. Визначити коефіцієнти потужності катушок.
6. Скласти розрахункову схему електричного кола, прийнявши наступні допущення:
 - опорами проводів, що з'єднують елементи кола, знехтувати;
 - опорами амперметра і струмової обмотки ватметра знехтувати;
 - прийняти, що опори вольтметра й обмотки напруги ватметра дорівнюють нескінченності.
7. Визначити фазні (лінійні) струми трифазного навантаження.
8. Визначити фазні напруги навантаження.
9. Визначити е.р.с., які розвиваються у фазах генератора.
10. Визначити лінійні напруги навантаження.
11. Визначити лінійні напруги генератора.
12. Визначити активну потужність, яку споживає навантаження.
13. Визначити індуктивну потужність, яку споживає навантаження.
14. Визначити повну потужність, яку споживає навантаження.
15. Скласти розрахункову схему зазначеного вище кола при з'єднанні навантаження трикутником.
16. Визначити фазні струми навантаження.
17. Визначити лінійні струми навантаження.
18. Визначити активну потужність, яку споживає навантаження.
19. Визначити індуктивну потужність, яку споживає навантаження.
20. Визначити повну потужність, яку споживає навантаження.
21. Зробити висновок.

**Варіанти вихідних даних до тематичного комплексного
кваліфікаційного завдання**

Таблиця 4.1

Варіанти	Вихідні дані		
	$I_a,$ <i>A</i>	$U_a,$ <i>B</i>	$P_a,$ <i>Bm</i>
1	20	200	2400
2	10	400	3200
3	5	100	300
4	22	220	3872
5	10	370	3500
6	6	120	432
7	2	100	160
8	4	148	192
9	2	200	240
10	15	150	1350
11	25	375	7500
12	15	225	2700
13	19	380	4332
14	8	160	768
15	17	85	1156

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ 1

1. Опис експериментальної установки

Експериментальна установка містить трифазний генератор змінного струму G , у якого обмотки статора з'єднані за схемою «зірка», та переносний вольтметр зі щупами PV .

Принципова електрична схема експериментальної установки наведена на рисунку 1.

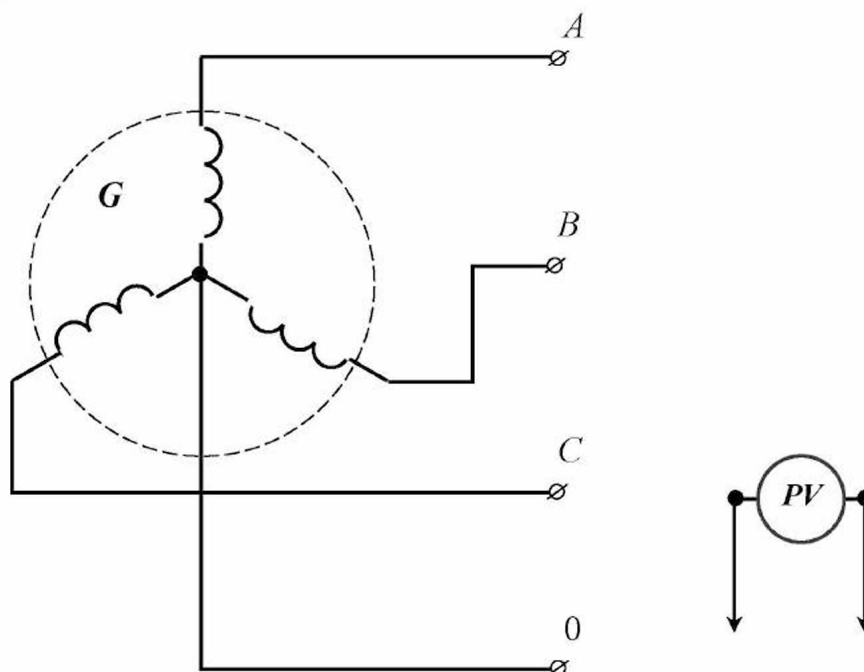


Рисунок 1 - Принципова електрична схема експериментальної установки.

2. Розрахункова схема експериментальної установки

При складанні розрахункової схеми прийняті наступні допущення:

- опори з'єднувальних проводів дорівнюють нулю;
- опір обмотки вольтметра дорівнює нескінченності.

Тоді розрахункова схема електричного кола експериментальної установки для миттєвих значень має вигляд, наведений на рисунку 2.

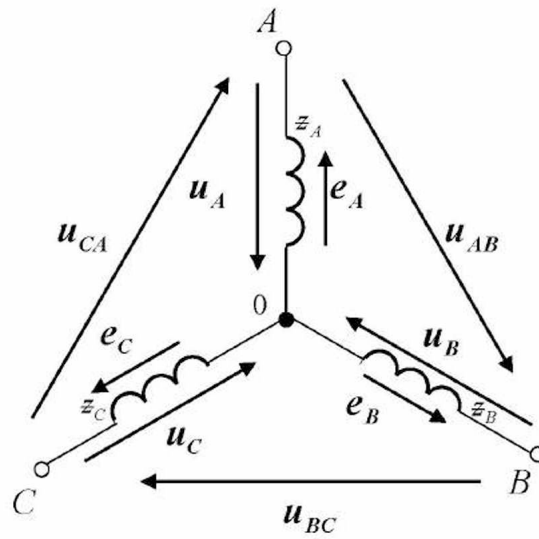


Рисунок 2 - Розрахункова схема електричного кола експериментальної установки.

На розрахунковій схемі наведені наступні умовні позначення:

e_A – миттєве значення електрорушійної сили у фазі A генератора, B ;

e_B – миттєве значення електрорушійної сили у фазі B генератора, B ;

e_C – миттєве значення електрорушійної сили у фазі C генератора, B ;

u_A – миттєве значення напруги фази A генератора, B ;

u_B – миттєве значення напруги фази B генератора, B ;

u_C – миттєве значення напруги фази C генератора, B ;

u_{AB} – миттєве значення лінійної напруги на затискачах
фаз A – B генератора, B ;

u_{BC} – миттєве значення лінійної напруги на затискачах
фаз B – C генератора, B ;

u_{CA} – миттєве значення лінійної напруги на затискачах
фаз C – A генератора, B ;

z_A – повний опір фази A генератора, Om ;

z_B – повний опір фази B генератора, Om ;

z_C – повний опір фази C генератора, Om .

3. Уміння, що здобуваються студентами в результаті виконання експериментального дослідження

- 3.1 Уміти скласти принципову електричну схему кола і зібрати її.
- 3.2 Уміти скласти розрахункову схему електричного кола для миттєвих значень та пояснити її.
- 3.3 Уміти визначити за допомогою експериментальних даних діючі значення фазних і лінійних напруг генератора.
- 3.4 Уміти визначити за допомогою експериментальних даних співвідношення між діючими значеннями фазних та лінійних напруг генератора.

4. Завдання експериментального дослідження

- 4.1 Зібрати принципову електричну схему кола.
- 4.2 Включити експериментальну установку.
- 4.3 Виміряти діючі значення лінійних і фазних напруг генератора, результати занести в таблицю 1.

Таблиця 1

U_{AB}, B	U_{BC}, B	U_{CA}, B	U_A, B	U_B, B	U_C, B

- 4.4 Визначити співвідношення між діючими значеннями фазних та лінійних напруг генератора.

5. Структура звіту

- 5.1 Назва теми експериментального дослідження.
- 5.2 Принципова електрична схема експериментальної установки.
- 5.3 Розрахункова схема електричного кола.
- 5.4 Таблиця 1.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ 2

1. Опис експериментальної установки

Експериментальна установка містить ідеальний трифазний генератор змінного струму G , у якого обмотки статора з'єднані за схемою «зірка», трипровідну ідеальну лінію електропередачі, три індуктивних котушки з однаковими параметрами $K1$, $K2$, $K3$, які з'єднані за схемою «зірка», три амперметри PA_1 , PA_2 , PA_3 та переносний вольтметр зі щупами PV .

Принципова електрична схема експериментальної установки наведена на рисунку 1.

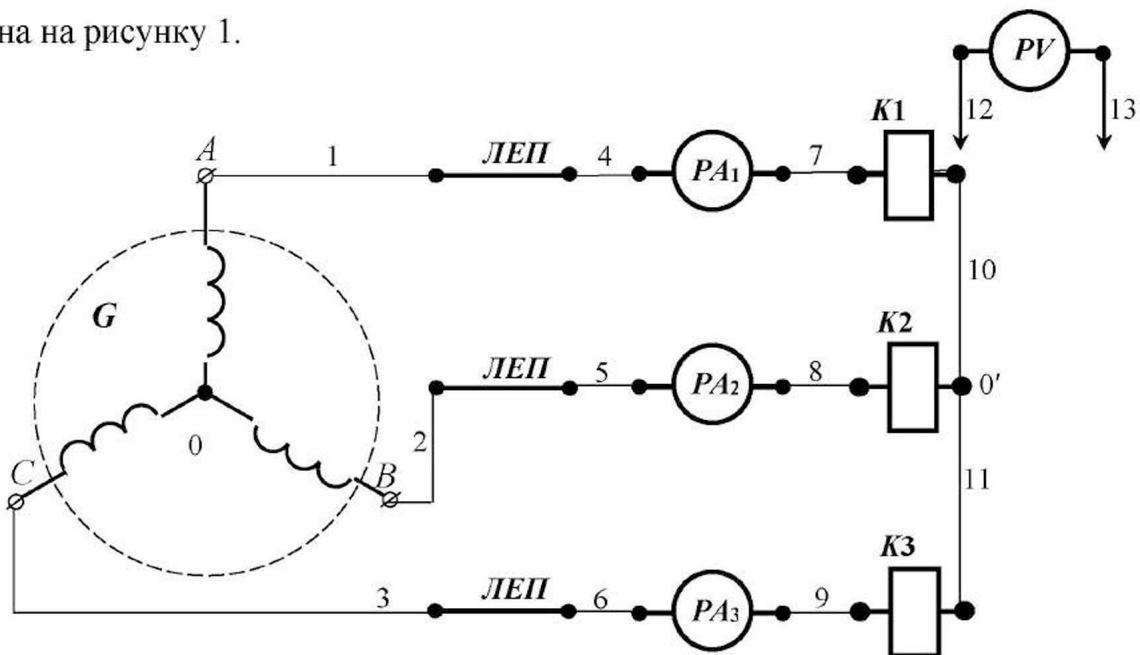


Рисунок 1 - Принципова електрична схема експериментальної установки.

Для складання схеми необхідно мати 13 провідників (на схемі позначені номерами 1-13).

2. Розрахункова схема експериментальної установки

При складанні розрахункової схеми прийняті наступні допущення:

- опори з'єднувальних проводів дорівнюють нулю;
- опори обмоток амперметрів дорівнюють нулю;
- опір обмотки вольтметра дорівнює нескінченності.

Тоді розрахункова схема електричного кола експериментальної установки для миттєвих значень має вигляд, наведений на рисунку 2.

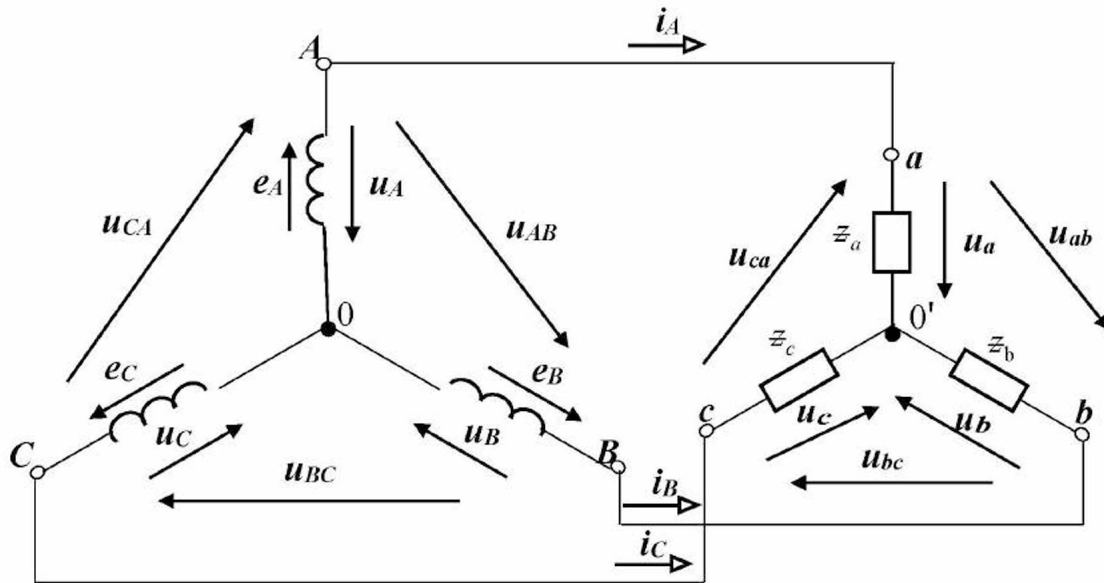


Рисунок 2 - Розрахункова схема електричного кола експериментальної установки.

На розрахунковій схемі наведені наступні умовні позначення:

e_A – миттєве значення електрорушійної сили у фазі A генератора, B ;

e_B – миттєве значення електрорушійної сили у фазі B генератора, B ;

e_C – миттєве значення електрорушійної сили у фазі C генератора, B ;

u_A – миттєве значення напруги фази A генератора, B ;

u_B – миттєве значення напруги фази B генератора, B ;

u_C – миттєве значення напруги фази C генератора, B ;

u_{AB} – миттєве значення лінійної напруги на затискачах
фаз A – B генератора, B ;

u_{BC} – миттєве значення лінійної напруги на затискачах
фаз B – C генератора, B ;

u_{CA} – миттєве значення лінійної напруги на затискачах
фаз C – A генератора, B ;

i_A – миттєве значення сили лінійного струму у фазі A , A ;

- i_B – миттєве значення сили лінійного струму у фазі B , A ;
- i_C – миттєве значення сили лінійного струму у фазі C , A ;
- u_a – миттєве значення напруги фази a навантаження, B ;
- u_b – миттєве значення напруги фази b навантаження, B ;
- u_c – миттєве значення напруги фази c навантаження, B ;
- u_{ab} – миттєве значення лінійної напруги на затискачах
фаз $a-b$ навантаження, B ;
- u_{bc} – миттєве значення лінійної напруги на затискачах
фаз $b-c$ навантаження, B ;
- u_{ca} – миттєве значення лінійної напруги на затискачах
фаз $c-a$ навантаження, B ;
- ε_a – повний опір фази a навантаження, $Ом$;
- ε_b – повний опір фази b навантаження, $Ом$;
- ε_c – повний опір фази c навантаження, $Ом$.

3. Уміння, що здобуваються студентами в результаті виконання експериментального дослідження

- 3.1 Уміти скласти принципову електричну схему кола і зібрати її.
- 3.2 Уміти скласти розрахункову схему електричного кола для миттєвих значень та пояснити її.
- 3.3 Уміти визначити за допомогою експериментальних даних діючі значення фазних і лінійних напруг генератора та навантаження.
- 3.4 Уміти визначити за допомогою експериментальних даних діючі значення лінійних (фазних) струмів навантаження.

4. Завдання експериментального дослідження

- 4.2 Зібрати принципову електричну схему кола.
- 4.2 Включити експериментальну установку.

4.3 Виміряти діючі значення лінійних і фазних напруг генератора, результати занести в таблицю 1.

4.4 Виміряти діючі значення лінійних і фазних напруг навантаження, результати занести в таблицю 1.

4.5 Виміряти діючі значення лінійних (фазних) струмів, результати занести в таблицю 1.

Таблиця 1

U_{AB}, B	U_{BC}, B	U_{CA}, B	U_A, B	U_B, B	U_C, B

Продовження таблиці 1

U_{ab}, B	U_{bc}, B	U_{ca}, B	U_a, B	U_b, B	U_c, B	I_A, A	I_B, A	I_C, A

5. Структура звіту

5.1 Назва теми експериментального дослідження.

5.2 Принципова електрична схема експериментальної установки.

5.3 Розрахункова схема електричного кола.

5.4 Таблиця 1.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ 3

1. Опис експериментальної установки

Експериментальна установка містить ідеальний трифазний генератор змінного струму G , у якого обмотки статора з'єднані за схемою «зірка», трипровідну ідеальну лінію електропередачі, три індуктивних котушки з однаковими параметрами $K1$, $K2$, $K3$, які з'єднані за схемою «трикутник», шість амперметрів PA_1 , PA_2 , PA_3 , PA_4 , PA_5 , PA_6 та переносний вольтметр зі щупами PV .

Принципова електрична схема експериментальної установки наведена на рисунку 1.

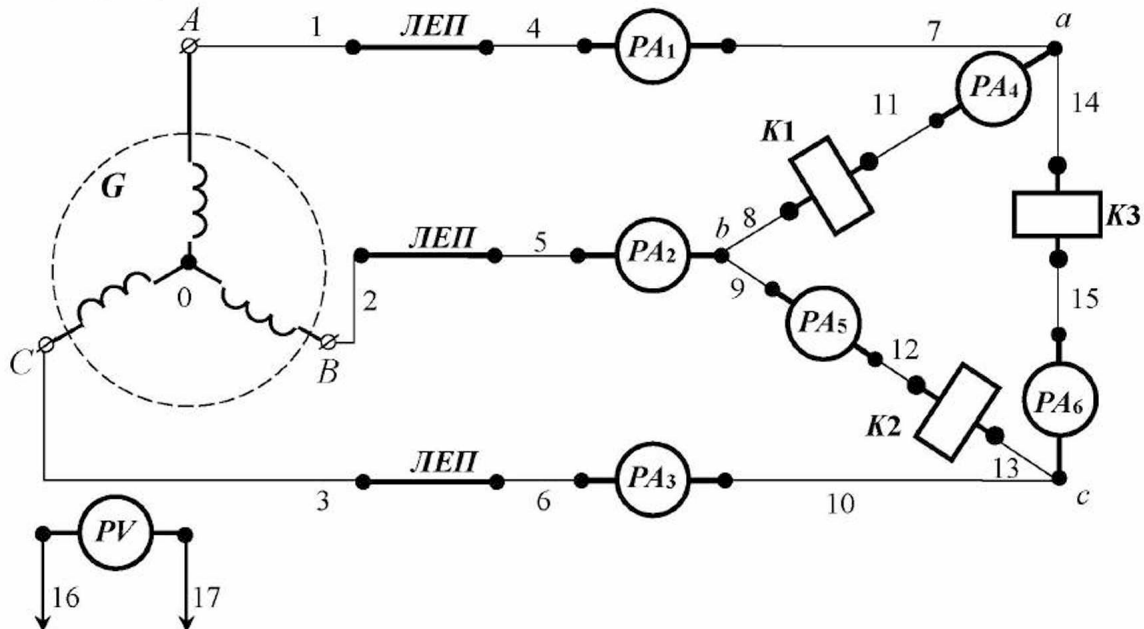


Рисунок 1 - Принципова електрична схема експериментальної установки.

Для складання схеми необхідно мати 17 провідників (на схемі позначені номерами 1-17).

2. Розрахункова схема експериментальної установки

При складанні розрахункової схеми прийняті наступні допущення:

- опори з'єднувальних проводів дорівнюють нулю;

- опори обмоток амперметрів дорівнюють нулю;
- опір обмотки вольтметра дорівнює нескінченності.

Тоді розрахункова схема електричного кола експериментальної установки для миттєвих значень має вигляд, наведений на рисунку 2.

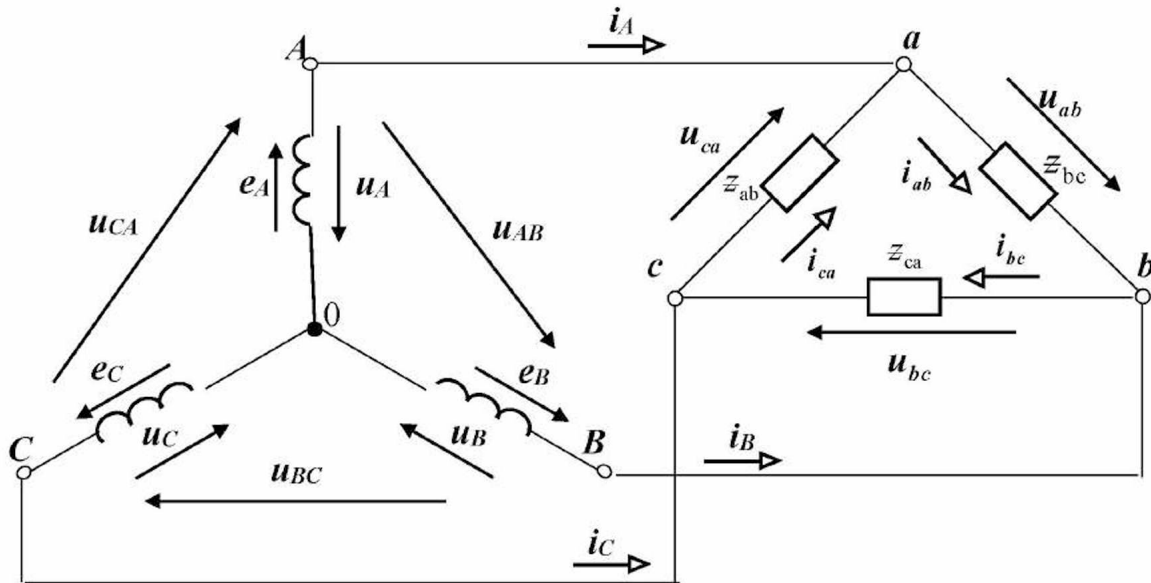


Рисунок 2 - Розрахункова схема електричного кола експериментальної установки.

На розрахунковій схемі введені наступні умовні позначення:

- e_A – миттєве значення електрорушійної сили у фазі A генератора, B ;
- e_B – миттєве значення електрорушійної сили у фазі B генератора, B ;
- e_C – миттєве значення електрорушійної сили у фазі C генератора, B ;
- u_A – миттєве значення напруги фази A генератора, B ;
- u_B – миттєве значення напруги фази B генератора, B ;
- u_C – миттєве значення напруги фази C генератора, B ;
- u_{AB} – миттєве значення лінійної напруги на затискачах фаз A – B генератора, B ;
- u_{BC} – миттєве значення лінійної напруги на затискачах фаз B – C генератора, B ;
- u_{CA} – миттєве значення лінійної напруги на затискачах фаз C – A генератора, B ;

i_A – миттєве значення сили лінійного струму у фазі A , A ;
 i_B – миттєве значення сили лінійного струму у фазі B , A ;
 i_C – миттєве значення сили лінійного струму у фазі C , A ;
 u_a – миттєве значення напруги фази a навантаження, B ;
 u_b – миттєве значення напруги фази b навантаження, B ;
 u_c – миттєве значення напруги фази c навантаження, B ;
 u_{ab} – миттєве значення лінійної напруги на затискачах
 фаз $a-b$ навантаження, B ;
 u_{bc} – миттєве значення лінійної напруги на затискачах
 фаз $b-c$ навантаження, B ;
 u_{ca} – миттєве значення лінійної напруги на затискачах
 фаз $c-a$ навантаження, B ;
 z_{ab} – повний опір фази ab навантаження, Ом ;
 z_{bc} – повний опір фази bc навантаження, Ом ;
 z_{ca} – повний опір фази ca навантаження, Ом .
 i_{ab} – миттєве значення сили струму у фазі ab навантаження, A ;
 i_{bc} – миттєве значення сили струму у фазі bc навантаження, A ;
 i_{ca} – миттєве значення сили струму у фазі ca навантаження, A .

3. Уміння, що здобуваються студентами в результаті виконання експериментального дослідження

- 3.1 Уміти скласти принципову електричну схему кола і зібрати її.
- 3.2 Уміти скласти розрахункову схему електричного кола для миттєвих значень та пояснити її.
- 3.3. Уміти визначити за допомогою експериментальних даних діюче значення фазних і лінійних напруг навантаження.
- 3.4 Уміти визначити за допомогою експериментальних даних діюче значення лінійних струмів.

3.5 Уміти визначити за допомогою експериментальних даних діюче значення фазних струмів навантаження.

3.6 Уміти визначити за допомогою експериментальних даних співвідношення між діючими значеннями фазних і лінійних сил струмів.

4. Завдання з виконання експериментального дослідження

4.1 Зібрати принципову електричну схему кола.

4.2 Включити експериментальну установку.

4.3 Виміряти діючі значення лінійних і фазних напруг генератора, результати занести в таблицю 1.

4.4 Виміряти діючі значення лінійних і фазних напруг навантаження, результати занести в таблицю 1.

4.5 Виміряти діючі значення лінійних і фазних струмів, результати занести в таблицю 1.

Таблиця 1

$U_{AB},$ B	$U_{BC},$ B	$U_{CA},$ B	$U_{ab},$ B	$U_{bc},$ B	$U_{ca},$ B	$I_A,$ A	$I_B,$ A	$I_C,$ A	$I_{ab},$ A	$I_{bc},$ A	$I_{ca},$ A

4.6 Визначити за допомогою експериментальних даних співвідношення діючими значеннями фазних і лінійних сил струмів.

5. Структура звіту

5.1 Назва теми експериментального дослідження.

5.2 Принципова електрична схема експериментальної установки.

5.3 Розрахункова схема електричного кола.

5.4 Таблиця 1.

Тема 5
МАГНІТНІ КОЛА
ПРИ ПОСТІЙНИХ НАМАГНІЧУЮЧИХ СИЛАХ

5.1 Явище і закон електромагнетизму

З курсу фізики відомо, що існує **явище електромагнетизму: навколо провідника зі струмом утворюється магнітне поле**. Магнітне поле розглядають як стан середовища, яке оточує провід з електричним струмом. Воно створюється завдяки руху заряджених часток: електронів або іонів. Напрямок силових ліній магнітного поля визначається за правилом «свердлика» або «правового гвинта»: якщо угвинчувати свердлик (правий гвинт) за напрямом електричного струму, то напрям його обертання буде збігатися з напрямом силових ліній магнітного поля (рис.5.1).

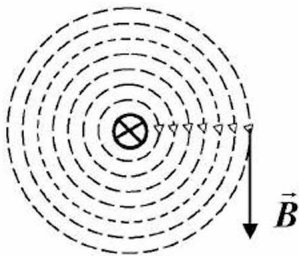


Рис.5.1

Як силова характеристика магнітного поля прийнята фізична величина – **магнітна індукція B** . Вектор магнітної індукції в будь-якій точці магнітного поля є дотичною силової лінії магнітного поля. За модулем магнітна індукція дорівнює відношенню обертаючого моменту рамки зі струмом (поміщеної в дану точку поля) до добутку площі рамки на силу струму в ній:

$$B = \frac{M}{IS}, \quad (5.1)$$

де B – магнітна індукція, $Tл$;
 M – обертаючий момент, $Н \cdot м$;
 I – сила струму, A ;
 S – площа рамки, $м^2$.

$$[B] = \frac{Н \cdot м}{A \cdot м^2} = \frac{Джс}{A \cdot м^2} = \frac{В \cdot A \cdot с}{A \cdot м^2} = \frac{В \cdot с}{м^2} = Tл.$$

Однорідне магнітне поле – це таке поле, у якого магнітна індукція в будь-якій точці поля однакова. Прикладом такого поля є магнітне поле між плоскими полюсами магнітів.

Для однорідного магнітного поля введено поняття **магнітного потоку**, під яким розуміється добуток магнітної індукції на площу, через яку проходить магнітне поле:

$$\Phi = B S, \quad (5.2)$$

де Φ – магнітний потік, $Вб$;
 B – магнітна індукція, $Tл$;
 S – площа, через яку проходить магнітне поле, $м^2$.

$$[\Phi] = Tл \cdot м^2 = \frac{В \cdot с}{м^2} \cdot м^2 = В \cdot с = Вб.$$

Приклад 5.1

У магнітному полі постійного магніту знаходиться рамка зі струмом. Сила струму в рамці дорівнює **10 А**. На рамку діє обертаючий момент **0,2 Н·м**. Площа рамки дорівнює **100 см²**. Площа поперечного перерізу кожного полюса магніту дорівнює **200 см²**. Визначити: магнітну індукцію поля; магнітний потік між полюсами.

Рішення.

1. Визначаємо магнітну індукцію поля за (5.1):

$$B = \frac{M}{I \cdot S_1} = \frac{0,2}{10 \cdot 100 \cdot 10^{-4}} = \frac{2 \cdot 10^{-1}}{10^3 \cdot 10^{-4}} = 2 \text{ Тл.}$$

2. Визначаємо магнітний потік між полюсами за (5.2):

$$\Phi = B \cdot S_2 = 2 \cdot 200 \cdot 10^{-4} = 4 \cdot 10^2 \cdot 10^{-4} = 0,04 \text{ Вб.}$$

Зв'язок між магнітним потоком, який створюється котушкою зі струмом та силою електричного струму встановлює **закон електромагнетизму: потокозчеплення (добуток кількості витків котушки на магнітний потік) прямо пропорційно добутку індуктивності котушки на силу електричного струму:**

$$\psi = w \Phi = LI, \quad (5.3)$$

де ψ – потокозчеплення, Вб;
 w – кількість витків котушки;
 Φ – магнітний потік, Вб;
 L – індуктивність котушки, Гн;
 I – сила електричного струму, А.

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

Приклад 5.2

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 котушки; індуктивність котушки.

Рішення.

1. Визначаємо потокозчеплення котушки за (5.3):

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

2. Визначаємо індуктивність котушки з (5.3):

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

Якщо провідник з електричним струмом помістити в різні середовища, то в кожному середовищі значення магнітної індукції буде різним (рис.5.2).

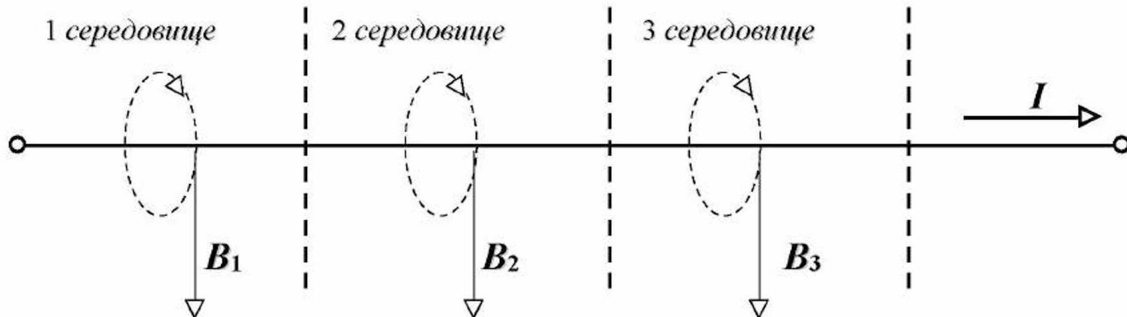


Рис.5.2

Введено поняття **напруженості магнітного поля**, під яким розуміється відношення магнітної індукції до магнітної проникності середовища:

$$H = \frac{B}{\mu_c}, \quad (5.4)$$

де H – напруженість магнітного поля, A/m ;
 B – магнітна індукція, $Tл$;
 μ_c – магнітна проникність середовища, $Гн/м$.

$$[H] = \frac{\frac{Tл}{м}}{\frac{В \cdot с}{А \cdot м}} = \frac{Тл}{Гн} = \frac{\frac{М^2}{с}}{\frac{В \cdot с}{А \cdot м}} = \frac{А}{м}.$$

Магнітна проникність середовища може бути знайдена в такий спосіб:

$$\mu_c = \mu \mu_0, \quad (5.5)$$

де μ – відносна магнітна проникність середовища;
 μ_0 – магнітна постійна, $Гн/м$.

Магнітна постійна $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$.

Запитання для самоконтролю

1. У чому суть явища електромагнетизму?
2. Сформулюйте правило «свердлика».
3. Яка фізична величина є силовою характеристикою магнітного поля?
4. Дайте визначення магнітної індукції.
5. Запишіть визначальну формулу магнітної індукції.
6. Одержіть одиницю магнітної індукції з визначальної формули.

7. Що таке однорідне магнітне поле?
8. Дайте визначення магнітного потоку для однорідного магнітного поля.
9. Запишіть визначальну формулу магнітного потоку для однорідного магнітного поля.
10. Одержіть одиницю магнітного потоку для однорідного магнітного поля з визначальної формули.
11. Сформулюйте закон електромагнетизму.
12. Запишіть математично і розшифруйте закон електромагнетизму.
13. Одержіть одиницю потокозчеплення з математичного запису закону електромагнетизму.
14. Дайте визначення напруженості магнітного поля.
15. Запишіть визначальну формулу напруженості магнітного поля.
16. Одержіть одиницю напруженості магнітного поля з визначальної формули.
17. Як визначити магнітну проникність середовища?
18. Що таке магнітна постійна? Чому вона дорівнює?
19. Що таке відносна магнітна проникність середовища?

Завдання для самоконтролю

У магнітному полі постійного магніту знаходиться рамка зі струмом. Сила струму в рамці дорівнює **10 А**. На рамку діє обертаючий момент **0,1 Н·м**. Площа рамки дорівнює **50 см²**. Площа поперечного перерізу кожного полюса магніту дорівнює **100 см²**.

1. Визначити магнітну індукцію поля.
2. Визначити магнітний потік між полюсами.

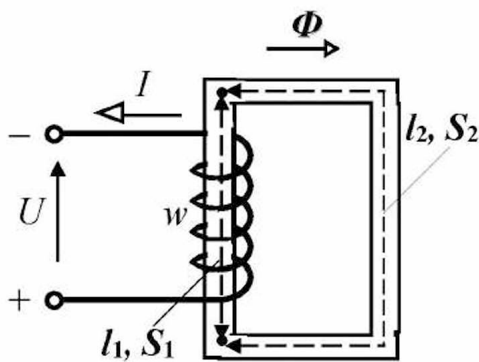
У котушці індуктивності з феромагнітним осердям протікає електричний струм. Котушка має **1000 витків**. Довжина середньої лінії магнітопроводу дорівнює **500 см**. Площа поперечного перерізу магнітопроводу дорівнює **50 см²**. Відносна магнітна проникність матеріалу магнітопроводу дорівнює **2500 / π**. Магнітна індукція в магнітопроводі дорівнює **1,2 Тл**.

3. Визначити магнітну проникність магнітопроводу.
4. Визначити напруженість магнітного поля в магнітопроводі.
5. Визначити намагнічуючу силу котушки.
6. Визначити силу струму, який протікає в котушці.
7. Визначити магнітний потік у магнітопроводі.
8. Визначити потокозчеплення котушки.
9. Визначити індуктивність котушки.
10. Визначити енергію магнітного поля котушки.

5.2 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.5.3).



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

Котушка має w витків. До котушки підведена напруга U , під дією якої протікає намагнічуючий струм I . В результаті спостерігається явище електромагнетизму: котушка з намагнічуючим струмом I створює магнітний потік Φ .

Рис.5.3

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. Приведіть приклад конструктивної схеми найпростішого магнітного кола.

5.3. Крива намагнічування

Для однорідного магнітного поля відомий **закон повного струму: намагнічуюча сила (добуток кількості витків котушки на силу струму) прямо пропорційна добутку напруженості магнітного поля на довжину магнітопроводу:**

$$F = wI = Hl, \quad (5.6)$$

де F – намагнічуюча сила котушки, A ;
 w – кількість витків котушки;
 I – сила струму, який протікає в котушці, A ;

H – напруженість магнітного поля, A/m ;
 l – довжина магнітопроводу котушки, m .

$$[F] = \frac{A}{m} \cdot m = A.$$

З (5.6) можна знайти залежність напруженості магнітного поля від намагнічуючого струму:

$$H = \frac{wI}{l}. \quad (5.7)$$

Якщо по котушці пропускати електричний струм, змінюючи силу електричного струму від нуля до певного значення, то відповідно до (5.4) буде змінюватися і магнітна індукція за законом:

$$B = \mu_c H. \quad (5.8)$$

Магнітний потік буде змінюватися за законом:

$$\Phi = \mu_c H S. \quad (5.9)$$

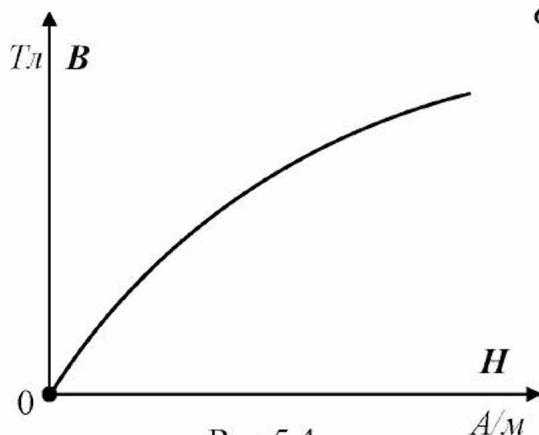


Рис.5.4

З курсу фізики відомо, що з ростом магнітного потоку у феромагнетику його магнітна проникність буде зменшуватися. Тому залежність $\Phi = f(H)$ або $B = f(H)$ буде нелінійною. Така крива називається **кривою намагнічування** (рис.5.4), яка вперше була експериментально встановлена для м'якого заліза російським фізиком *Олександром Григоровичем Столетовим* у 1871 році.

Як видно з кривої намагнічування на рис.5.4 з ростом напруженості поступово настає насичення феромагнітного матеріалу і магнітна індукція далі практично не зростає.

Запитання для самоконтролю

1. Сформулюйте закон повного струму для однорідного магнітного поля.
2. Запишіть математично і розшифруйте закон повного струму для однорідного магнітного поля.
3. Що розуміється під намагнічуючою силою?
4. Запишіть визначальну формулу намагнічуючої сили.
5. Одержіть одиницю намагнічуючої сили з визначальної формули.
6. Одержіть напруженість магнітного поля з закону повного струму.
7. Що являє собою крива намагнічування?
8. Зобразіть графічно криву намагнічування та поясните її.

5.4 Петля гістерезису

Якщо спочатку збільшувати силу струму до режиму насичення (рис.5.5), а потім його зменшувати, то залежність $B = f(H)$ уже проходить вище (відрізок 1). Для того, щоб магнітна індукція зменшилася до нуля, необхідно струм пропускати в зворотному напрямку (відрізок 2). Якщо далі в зворотному напрямку пропускати струм, то поступово настає насичення (відрізок 3). Якщо тепер струм зменшувати до нуля, то залежність $B = f(H)$ буде мати вигляд відрізка 4. Змінюємо напрям струму і при певному значенні сили струму магнітна індукція дорівнює нулю (відрізок 5). Підвищуючи силу струму далі, поступово настає насичення (відрізок 6). Таким чином, ми одержали залежність $B = f(H)$ у вигляді так званої **петлі гістерезису**.

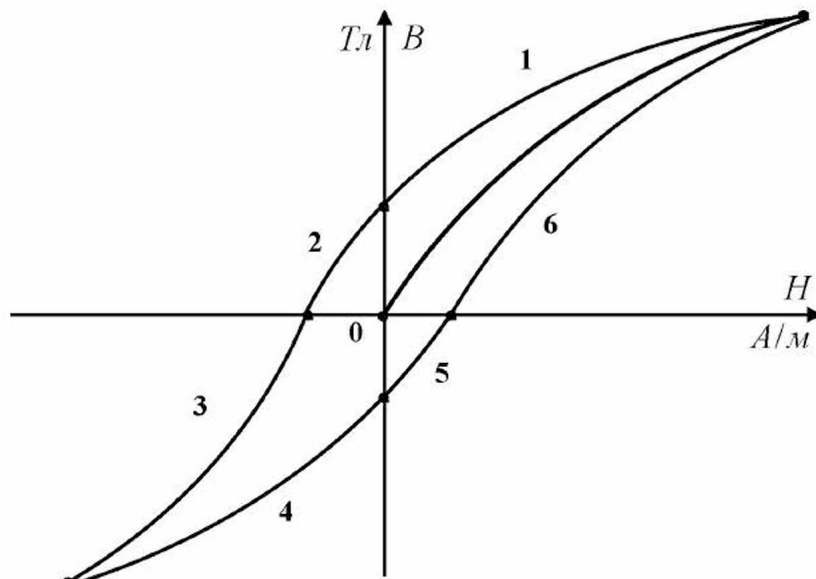


Рис.5.5

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

Запитання для самоконтролю

1. Зобразіть графічно петлю гістерезису (перемагнічування) та поясніть її.
2. Яким явищем супроводжується перемагнічування магнітопроводу?
3. Від чого залежать втрати енергії на перемагнічування.

5.5 Електромагніти та їх розрахунок

Електромагніти широко застосовуються в техніці. Вони служать для створення магнітного поля в електрогенераторах, електродвигунах, трансформаторах, електровимірювальних приладах, електричних апаратах, а також для створення стискальних зусиль. Електромагніт, призначений для стискальних зусиль, складається з нерухомого осердя (магнітопроводу), рухомого якоря (магнітопроводу) та котушок збудження (виконаних із провідників). Котушки розташовані на осерді, а осердя відділене від якоря повітряним зазором (рис.5.6).

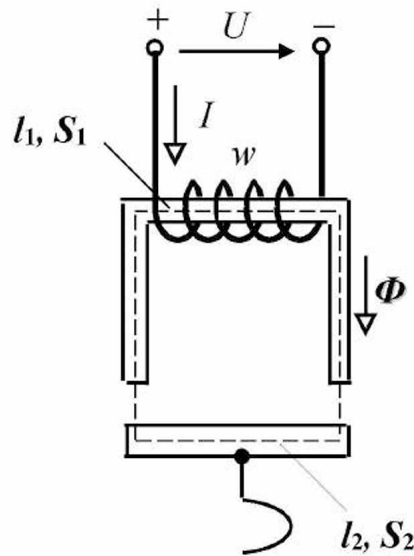


Рис.5.6

Піднімальна сила електромагніта визначається за формулою:

$$F_{EMF} = \frac{B^2 \cdot S}{2\mu_0}, \quad (5.10)$$

- де F_{EMF} – піднімальна сила електромагніта, H ;
 S – загальна площа поперечного перерізу полюсів електромагніта, 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 електромагніта для стискальних зусиль.
3. Запишіть формулу для розрахунку піднімальної сили електромагніта для стискальних зусиль.

ТЕМАТИЧНЕ КОМПЛЕКСНЕ КВАЛІФІКАЦІЙНЕ ЗАВДАННЯ

Умова

Магнітне коло складається з феромагнітного осердя з перерізом S і котушки, яка має w витків. Довжина середньої силової лінії l . Котушка споживає струм, силою I . Крива намагнічування матеріалу осердя показана на рисунку 5.7.

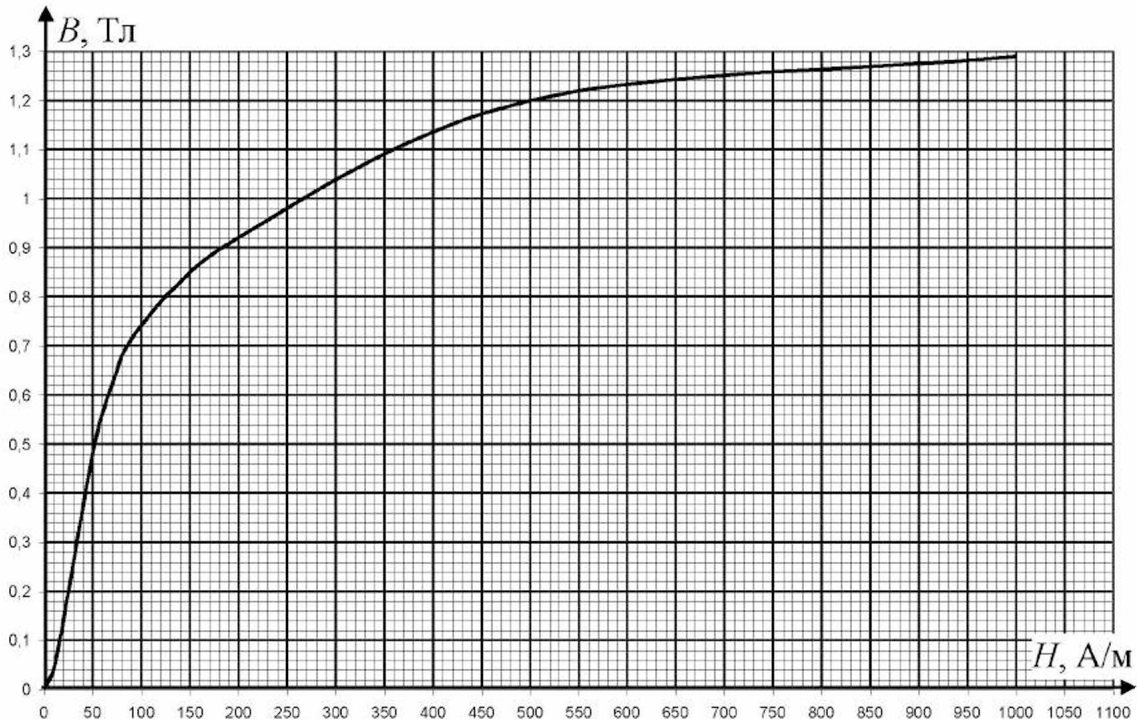


Рис.5.7. Крива намагнічування сталі марки 1572.

Завдання

1. Для заданого значення сили струму визначити напруженість магнітного поля.
2. З кривої намагнічування визначити магнітну індукцію в магнітопроводі.
3. Визначити магнітний потік у магнітопроводі.
4. Визначити магнітну проникність матеріалу магнітопроводу для заданого значення сили струму.
5. Розрахувати і побудувати $H = f(I)$, задавшись частковими значеннями сили струму від заданого.
6. Розрахувати і побудувати $B = f(I)$, задавшись частковими значеннями сили струму від заданого.
7. Розрахувати і побудувати $\mu_c = f(I)$, задавшись частковими значеннями сили струму від заданого.

**Варіанти вихідних даних до тематичного комплексного
кваліфікаційного завдання**

Таблиця 5.1

Варіанти	Вихідні дані			
	I, A	w	$l, см$	$S, см^2$
1	5	200	200	80
2	5	500	500	50
3	5	200	320	80
4	10	150	200	40
5	3	350	280	120
6	1,5	600	100	20
7	2	570	120	60
8	1,2	1000	120	80
9	10	210	240	80
10	14	135	360	100
11	10	342	360	200
12	7	476	340	200
13	10	187	340	200
14	3	884	340	500
15	3,2	884	320	500

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

1. Опис експериментальної установки

Експериментальна установка містить ідеальний генератор постійного струму G , з'єднувальні проводи та котушку індуктивності K з феромагнітним осердям, для якої відомі кількість витків w та індуктивність L . Для вимірювання сили струму передбачений амперметр PA . Для комутації кола передбачений вимикач SA .

Принципова електрична схема експериментальної установки наведена на рисунку 1.

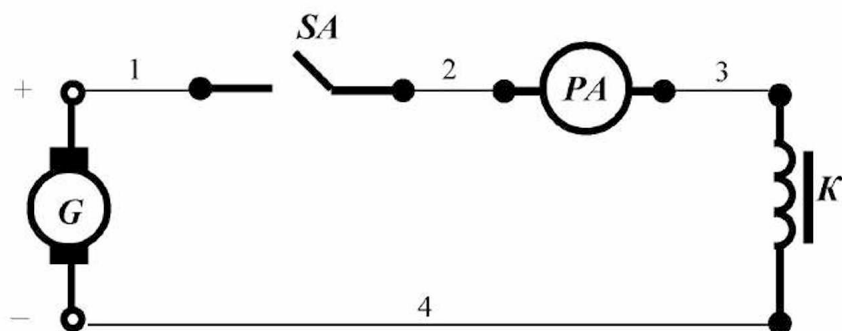


Рисунок 1 - Принципова електрична схема експериментальної установки.

Для складання схеми необхідно мати 4 провідника (на схемі позначені номерами 1-4).

2. Уміння, які здобуваються студентами в результаті виконання експериментального дослідження

- 2.1 Уміти скласти принципову електричну схему кола та зібрати її.
- 2.2 Уміти включити експериментальну установку та вимірити силу струму у колі.
- 2.3 Уміти визначити за допомогою експериментальних даних магнітний потік усередині котушки.

2.4 Уміти визначити за допомогою експериментальних і розрахункових даних потокозчеплення котушки.

2.5 Уміти визначити за допомогою експериментальних даних намагнічуючу силу котушки.

2.6 Уміти визначити за допомогою експериментальних даних енергію магнітного поля котушки.

3. Завдання з виконання експериментального дослідження

3.1 Зібрати схему експериментальної установки.

3.2 Подати напругу на затискачі експериментальної установки.

3.3 Зняти показання приладів, результати занести в таблицю 1.

Таблиця 1

№ п/п	Умови проведення експерименту	Показання приладів		
		w	L, Гн	I, А
1	Вимикач SA замкнений			

3.4 Визначити за допомогою експериментальних даних магнітний потік усередині котушки, використовуючи рівняння закону електромагнетизму:

$$w \cdot \Phi = L \cdot I .$$

3.5 Визначити за допомогою експериментальних і розрахункових даних потокозчеплення котушки, використовуючи рівняння:

$$\psi = w \cdot \Phi .$$

3.6 Визначити за допомогою експериментальних даних намагнічуючу силу котушки, використовуючи рівняння:

$$F = w \cdot I .$$

3.7 Визначити за допомогою експериментальних даних енергію магнітного поля котушки, використовуючи рівняння:

$$W = \frac{L \cdot I^2}{2}.$$

3.8 Занести отримані значення в таблицю 2.

Таблиця 2

№ п/п	Фізичні величини, що характеризують магнітне коло			
	$\Phi, \text{Вб}$	$\psi, \text{Вб}$	$F, \text{А}$	$W, \text{Дж}$
1				

4. Структура звіту

4.1 Назва теми експериментального дослідження.

4.2 Принципова електрична схема експериментальної установки.

4.3 Таблиця 1.

4.4 Таблиця 2.

Тема 6 ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

6.1 Будова та принцип дії машинного генератора

Електрична машина, у якій механічна енергія обертового вала перетворюється в електричну енергію, називається **генератором**. Робота генератора заснована на явищі електромагнетизму та явищі електромагнітної індукції.

Явище електромагнетизму полягає в тому, що навколо провідника зі струмом утворюється магнітне поле. **Закон електромагнетизму**: потік-козчеплення (добуток кількості витків котушки на пронизуючий їх магнітний потік) прямо пропорційно індуктивності котушки та силі струму, який протікає в котушці:

$$\psi = w \Phi = LI . \quad (6.1)$$

Явище електромагнітної індукції полягає в тому, що в провідному контурі, який пронизується змінним магнітним полем, наводиться е.р.с. **Закон електромагнітної індукції**: значення е.р.с., яка наводиться у контурі, прямо пропорційно кількості витків та швидкості зміни магнітного потоку, який пронизує контур:

$$e = -w \frac{d\Phi}{dt} . \quad (6.2)$$

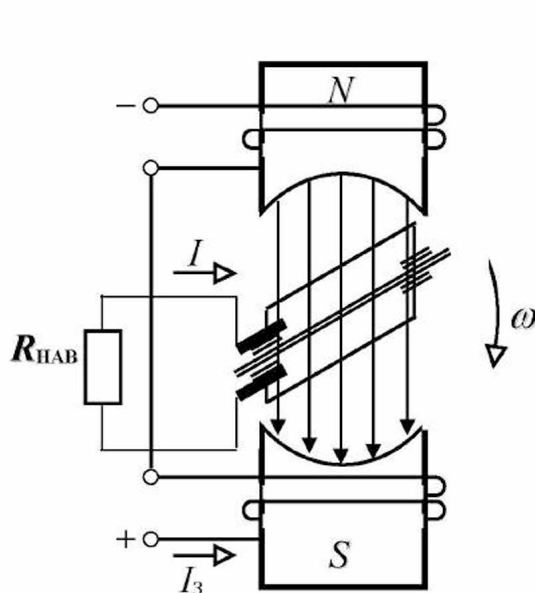


Рис.6.1

Елементами **конструкції найпростішого генератора є виток (провідний контур) та індуктор, який створює магнітне поле**. Розглянемо принцип дії генератора постійного струму на його конструктивній схемі (рис.6.1). У магнітному полі постійних магнітів ($N-S$) поміщений виток, укріплений на вісі. До двох кінців витка прикріплені металеві півкола, на які накладаються щітки (ковзні контакти, до яких підключається навантаження $R_{НАВ}$). При обертанні даного витка з кутовою швидкістю ω виникає явище електромагнітної індукції й у ньому наводиться е.р.с. При підключенні до нього навантаження у витку буде протікати електричний струм I .

Напрямок електрорушійної сили, що наводиться, визначається за **правилом «правої руки»**: якщо розташувати праву руку так, щоб силові лінії магнітного поля входили в долоню, а великий відігнутий палець збігався з напрямом руху витка, то чотири пальці будуть вказувати напрям електрорушійної сили, яка наводиться у витку. Значення електрорушійної сили, яка наводиться в сторонах витка, дорівнює:

$$e = Blv \sin \alpha, \quad (6.3)$$

де e – миттєве значення е.р.с., яка наводиться в сторонах витка, В;
 B – магнітна індукція поля, Тл;
 l – довжина однієї сторони витка, м;
 v – лінійна швидкість витка, м/с;
 α – кут повороту витка щодо горизонталі, град.

Електрорушійна сила, яка наводиться у витку, змінюється в часі за синусоїдним законом та створює різницю потенціалів на кінцях витка. Знаки потенціалів на кінцях витка (*позитивний, негативний*) через півоберти теж зміняться, тому що зміниться напрям е.р.с., яка наводиться в сторонах витка. Однак знаки потенціалів щіток змінюватися не будуть. Це пояснюється тим, що при обертанні витка вони нерухомі та завжди підключені до сторони витка, на кінці якої потенціал однакового знака (тобто е.р.с. у стороні витка спрямована в той самий бік). Завдяки ковзному контакту на одній щітці утворюється позитивний потенціал, а на іншій – негативний. Щітки кріпляться в щіткотримачі, які встановлені на корпусі генератора. До щіток генератора підключається приймач електроенергії.

Таким чином, **конструкція генератора** наступна: індуктор (нерухома частина), який створює магнітне поле та якір (обертаюча частина), у якому наводиться е.р.с. Вони відділені один від одного мінімальним повітряним зазором.

Індуктор являє собою котушку індуктивності, укріплену на полюсах генератора. Затискачі *обмотки збудження* (котушки індуктивності на індукторі) виводять на клемну коробку і позначають буквами Ш1 і Ш2. Полюси генератора виготовляють з феромагнітного матеріалу та кріплять до чавунного корпусу (який має вигляд пологого циліндра) за допомогою болтів та ізолюючих прокладок. До них кріплять полюсні наконечники у вигляді півкіл для поліпшення розподілу магнітного потоку в повітряному зазорі генератора.

Якір генератора має форму циліндра, який розташований на валу. Його магнітопровід виконують з феромагнітного матеріалу та укріплюють на валу генератора. На вал генератора встановлюють підшипники, які запресовують у підшипникові щити. Ці підшипникові щити, які служать опорою для вала генератора, кріплять до корпусу генератора. *Якірна об-*

мотка, 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 вала генератора. На колекторні пластини накладають щітки, затискачі яких виводять на клемну коробку і позначають буквами Я1 і Я2. Сукупність таких колекторних пластин, які дозволяють при наявності змінної е.р.с. у якорній обмотці отримувати постійну полярність щіток, називають *колектором*. Напряга з колектора знімається за допомогою *щіткового механізму*. Отже, призначення колектора і щіткового механізму в генератора – це спрямлення електрорушійної сили (тобто перетворення змінної е.р.с. у постійну е.р.с.).

Спрямлена електрорушійна сила є пульсуючою, тобто змінюється за подвоєним синусоїдним законом при збереженні знака (рис.6.2а). Зі збільшенням кількості колекторних пластин пульсація е.р.с. зменшується (рис.6.2б: e_{PE3} – 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):

$$e_{PE3} = e_1 + e_2. \quad (6.4)$$

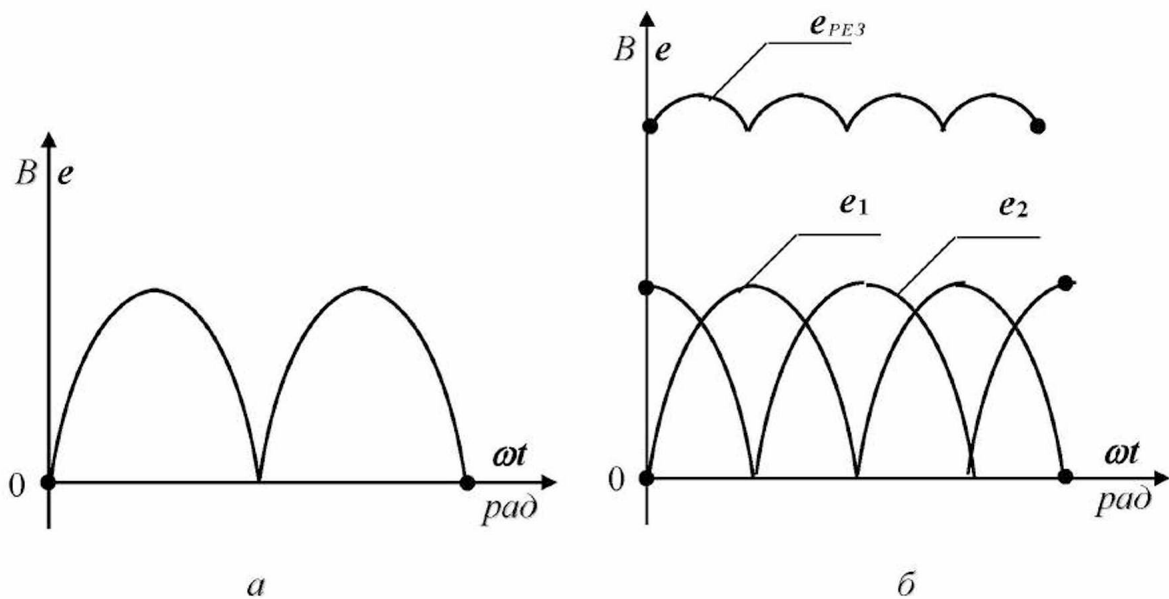


Рис.6.2

Середнє значення цієї спрямленої електрорушійної сили, яка діє між щітками, визначається наступним виразом:

$$E = k\Phi\omega, \quad (6.5)$$

- де k – коефіцієнт;
 Φ – магнітний потік полюсів генератора, Вб;
 ω – кутова швидкість обертання вала генератора, рад/с.

Обмотка збудження та обмотка якоря можуть включатися незалежно одна від одної, тоді в генератора буде *незалежне збудження* (затискачі $H1$ і $H2$ підключають до стороннього джерела постійної е.р.с., а до затискачів $Я1$ і $Я2$ підключають навантаження).

У генератора буде *самозбудження*, якщо різниця потенціалів на затискачах обмотки збудження створюється е.р.с., яка наводиться в обмотці якоря. У цьому випадку при підключенні обмотки збудження паралельно обмотці якоря в генератора буде *паралельне збудження* ($Ш1$ до $Я1$, $Ш2$ до $Я2$, при цьому до затискачів $Я1$ та $Я2$ підключають навантаження).

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 закон електромагнітної індукції.
6. Запишіть математично і розшифруйте закон електромагнітної індукції.
7. Яка електрична машина називається генератором постійного струму?
8. Складіть і опишіть конструктивну схему генератора постійного струму.
9. Опишіть принцип дії генератора постійного струму.
10. Яке призначення колектора та щіткового механізму?
11. Сформулюйте правило «правої руки».
12. Як визначити електрорушійну силу, яку розвиває генератор?
13. Що таке незалежне збудження генератора постійного струму?
14. Що таке самозбудження генератора постійного струму?

6.2 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.

6.3 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. Втрачену 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 ($\Delta P_{ПДШ}$);
- втрати на тертя між щітками та колектором ($\Delta P_{ЩІТ}$);
- втрати на вентиляцію ($\Delta P_{ВЕНТ}$).

$$\Delta P_{MX} = \Delta P_{ПДШ} + \Delta P_{ЩІТ} + \Delta P_{ВЕНТ} . \quad (6.6)$$

Електричні втрати (ΔP_{EL}):

- втрати в провідниках обмотки збудження в результаті теплової дії струму, який протікає в ній (ΔP_3);
- втрати в провідниках обмотки якоря в результаті теплової дії струму, який протікає в ній ($\Delta P_Я$);
- втрати в щітках та колекторі в результаті теплової дії струму, який протікає в них ($\Delta P_{Щ}$).

$$\Delta P_{EL} = \Delta P_3 + \Delta P_Я + \Delta P_{Щ} = R_3 I_3^2 + R_Я I_Я^2 + R_{Щ} I_Я^2, \quad (6.7)$$

- де R_3 – опір обмотки збудження, Ом;
 I_3 – 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 (ΔP_{MG}):

- втрати в магнітопроводі якоря в результаті теплової дії вихрових струмів, які протікають у ньому ($\Delta P_{ВХ.Я}$);
- втрати в магнітопроводі якоря в результаті теплової дії гістерезису ($\Delta P_{ГС.Я}$).

$$\Delta P_{MG} = \Delta P_{ВХ.Я} + \Delta P_{ГС.Я}. \quad (6.8)$$

Додаткові втрати (ΔP_D) виникають у генераторі в результаті інших не врахованих явищ.

Отже, сумарні втрати (ΔP_{Σ}) при роботі генератора дорівнюють:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{MX} + \Delta P_{EL} + \Delta P_{MG} + \Delta P_D. \quad (6.9)$$

Таким чином, **енергетична діаграма** генератора має такий вигляд (рис.6.3).

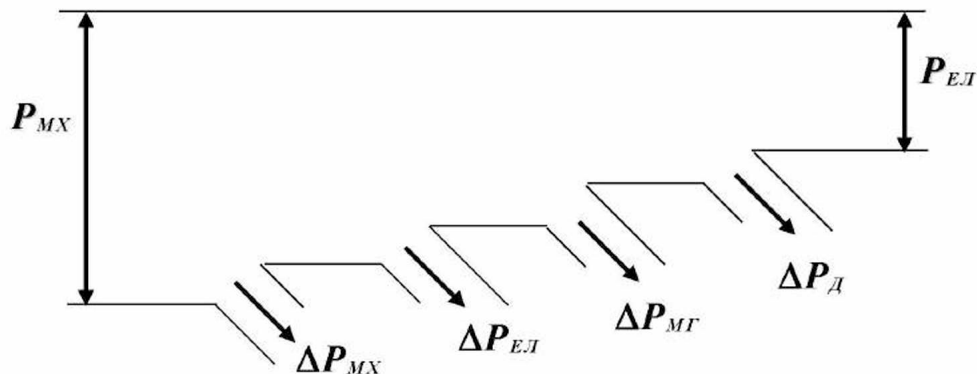


Рис.6.3

Механічна потужність на валу генератора дорівнює:

$$P_{MX} = M\omega, \quad (6.10)$$

де M – механічний момент на валу генератора, $H\cdot m$;
 ω – кутова швидкість обертання вала генератора, rad/c .

Електрична потужність, яка віддається генератором навантаженню, дорівнює:

$$P_{EЛ} = R_{HAB}I^2, \quad (6.11)$$

де R_{HAB} – еквівалентний опір навантаження, Om ;
 I – сила струму, споживаного навантаженням, A .

В іншому вигляді:

$$P_{EЛ} = P_{MX} - \Delta P_{\Sigma}. \quad (6.12)$$

Коефіцієнт корисної дії генератора дорівнює:

$$\eta = \frac{P_{EЛ}}{P_{MX}} = \frac{P_{MX} - \Delta P_{\Sigma}}{P_{MX}} = 1 - \frac{\Delta P_{\Sigma}}{P_{MX}}. \quad (6.13)$$

Запитання для самоконтролю

1. Складіть енергетичну діаграму генератора постійного струму з розшифровкою 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?

6.4 Розрахункова схема генератора

Відповідно до фізичних явищ і процесів у колі збудження та у колі якоря розрахункова схема генератора із самозбудженням (з паралельним збудженням) має такий вигляд (рис.6.4).

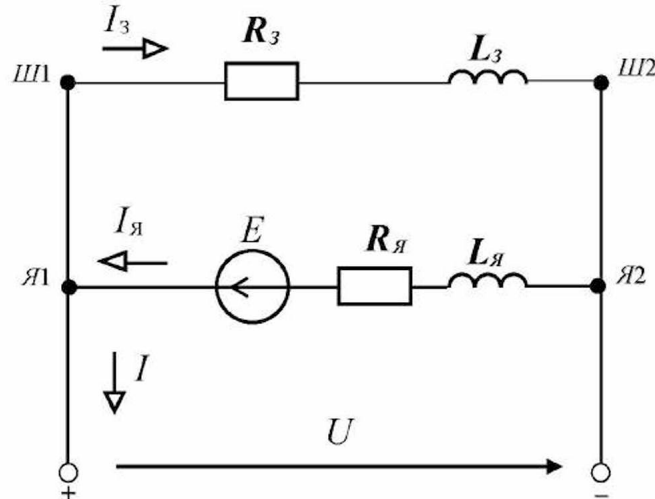


Рис.6.4

На розрахунковій схемі (рис.6.4) приведені наступні позначення:

- $R_з$ – опір кола обмотки збудження, Ом;
- $L_з$ – індуктивність обмотки збудження, Гн;
- $I_з$ – 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 – напруга на затискачах генератора, В.

Запитання для самоконтролю

1. Складіть розрахункову схему генератора постійного струму паралельного збудження і розшифруйте літерні позначення.

6.5 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, який протікає в обмотці якоря. Одержимо рівняння цієї характеристики на підставі розрахункової схеми генератора

(рис.6.4), для чого складемо рівняння електричної рівноваги якірного кола та виразимо потенціал точки Я1 ($\varphi_{Я1}$) через потенціал точки Я2 ($\varphi_{Я2}$):

$$\varphi_{Я1} = \varphi_{Я2} - R_{Я}I_{Я} + E. \quad (6.14)$$

Реактивний опір обмотки якоря дорівнює нулю ($X_{Я} = 0$), тому що струм постійний.

Перепишемо (6.14) у наступному вигляді:

$$\varphi_{Я1} - \varphi_{Я2} = E - R_{Я}I_{Я}. \quad (6.15)$$

З огляду на те, що $\varphi_{Я1} - \varphi_{Я2} = U$, одержимо наступне:

$$U = E - R_{Я}I_{Я}. \quad (6.16)$$

Отримане рівняння (6.16) являє собою **рівняння зовнішньої характеристики генератора**.

У свою чергу

$$E = k\Phi\omega. \quad (6.17)$$

Крім того, на підставі (6.1) можемо записати:

$$\Phi = \frac{L_3 I_3}{w_3}, \quad (6.18)$$

де w_3 – кількість витків обмотки збудження.

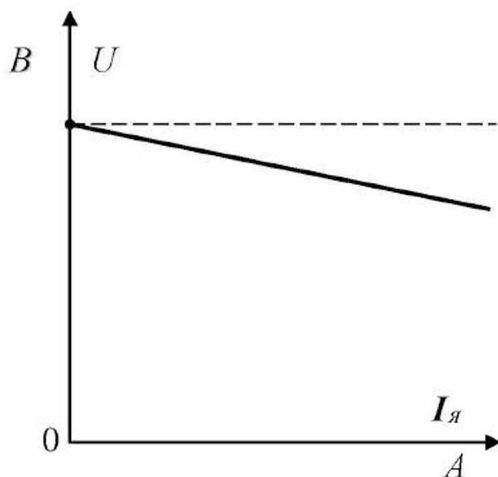


Рис.6.5

Графічно зовнішня характеристика генератора (тобто залежність $U = f(I_{Я})$) виглядає так, як показано на рис.6.5.

Пунктирною лінією на рис.6.5 показана зовнішня характеристика ідеального генератора, у якого $R_{Я} = 0$.

Запитання для самоконтролю

1. Запишіть і розшифруйте вираз зовнішньої характеристики генератора.
2. Зобразіть якісно зовнішню характеристику генератора.
3. Як поліпшити зовнішню характеристику генератора?

6.6 Регулювання напруги генератора

Напруга на затискачах генератора, як видно з (6.16), залежить від значення е.р.с., яка наводиться в якорі, та сили струму в обмотці якоря (сили струму навантаження). Е.р.с., яка наводиться в якорі, як видно з (6.17), залежить від значення магнітного потоку і швидкості обертання якоря. Магнітний потік, як видно з (6.18), залежить від сили струму в обмотці збудження. Отже, регулювати напругу на затискачах генератора можна наступним чином:

- 1) зміною сили струму в обмотці збудження (для цього використовують реостат, включений послідовно з обмоткою збудження);
- 2) зміною швидкості обертання якоря (для цього використовують приводний агрегат).

Запитання для самоконтролю

1. Перелічіть способи регулювання напруги на затискачах генератора, укажіть технічні засоби для їх реалізації.

6.7 Принципова електрична схема керування генератором

Відповідно до викладеного вище, складаємо принципову електричну схему керування генератором (рис.6.6).

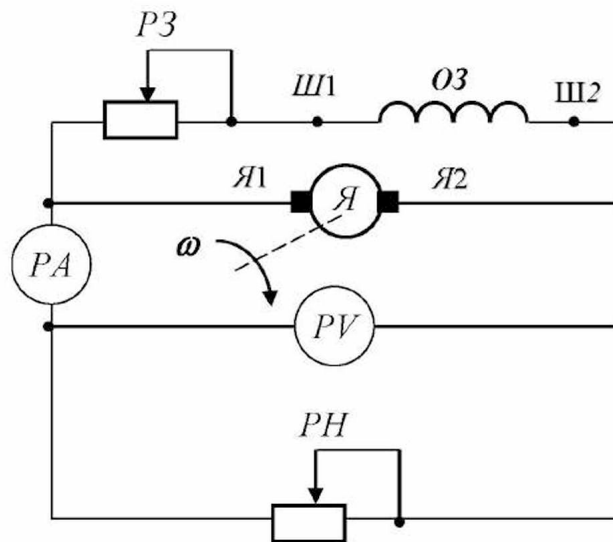


Рис.6.6

- На даній схемі (рис.6.6) приведені наступні позначення:
- $PЗ$ – регулювальний реостат у колі збудження;
 - $OЗ$ – обмотка збудження;
 - $Ш1, Ш2$ – затискачі обмотки збудження;
 - $Я1, Я2$ – затискачі обмотки якоря;

J	– якір генератора;
ω	– кутова швидкість обертання вала генератора;
PA	– амперметр, який вимірює силу струму навантаження;
PV	– вольтметр, який вимірює напругу на затискачах генератора;
RH	– реостат, який моделює навантаження.

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 вала. Втрати потужності в магнітопроводі генератора складають **3,0 %** від потужності, яка підводиться до вала. Додаткові втрати складають **0,1 %** від потужності, яка підводиться до вала.

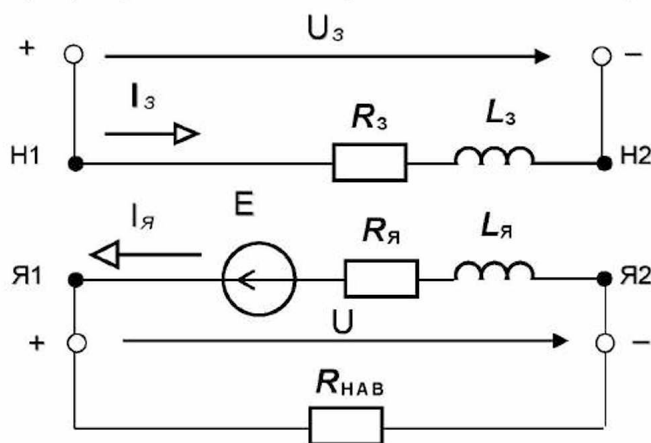
Скласти розрахункові схеми якірного кола з навантаженням і кола збудження.

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 за допомогою двох точок зовнішню характеристику генератора.

Рішення.

1. Складаємо розрахункові схеми якірного кола і кола збудження:



2. Визначаємо силу струму в якорному колі:

$$I_{\text{я}} = \frac{E}{R_{\text{я}} + R_{\text{НАВ}}} = \frac{300}{1,5 + 13,5} = \frac{300}{15} = 20 \text{ A}.$$

3. Визначаємо потужність, яка розвивається генератором:

$$P = E I = 300 \cdot 20 = 6000 \text{ Вт} = 6,0 \text{ кВт}.$$

4. Визначаємо втрати потужності в обмотці якоря:

$$\Delta P_{\text{я}} = R_{\text{я}} I_{\text{я}}^2 = 1,5 \cdot 20^2 = 1,5 \cdot 400 = 600 \text{ Вт}.$$

5. Визначаємо силу струму в колі збудження:

$$I_{\text{з}} = \frac{U_{\text{з}}}{R_{\text{з}}} = \frac{270}{270} = 1 \text{ A}.$$

6. Визначаємо втрати потужності в колі збудження:

$$\Delta P_{\text{з}} = R_{\text{з}} I_{\text{з}}^2 = 270 \cdot 1^2 = 270 \text{ Вт}.$$

7. Визначаємо втрати потужності в механічній системі:

$$\Delta P_{\text{мх}} = 0,015 \cdot P_1 = 0,015 \cdot 7000 = 105 \text{ Вт}.$$

8. Визначаємо втрати потужності в магнітопроводі:

$$\Delta P_{\text{мг}} = 0,03 \cdot P_1 = 0,03 \cdot 7000 = 210 \text{ Вт}.$$

9. Визначаємо додаткові втрати потужності в генераторі:

$$\Delta P_{\text{д}} = 0,001 \cdot P_1 = 0,001 \cdot 7000 = 7 \text{ Вт}.$$

10. Визначаємо сумарні втрати потужності в генераторі:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{\text{з}} + \Delta P_{\text{я}} + \Delta P_{\text{мх}} + \Delta P_{\text{мг}} + \Delta P_{\text{д}} = 600 + 270 + 105 + 210 + 7 = 1192 \text{ Вт}.$$

11. Визначаємо потужність, яка віддається генератором у мережу (потужність навантаження):

$$P_{\text{ЕЛ}} = R_{\text{НАВ}} I_{\text{я}}^2 = 13,5 \cdot 20^2 = 5400 \text{ Вт} = 5,4 \text{ кВт}.$$

12. Визначаємо електричний коефіцієнт корисної дії генератора:

$$\eta_{\text{ЕЛ}} = \frac{P_{\text{ЕЛ}}}{P} = \frac{5400}{6000} = 0,9.$$

13. Визначаємо коефіцієнт корисної дії генератора як електромеханічного перетворювача:

$$\eta = \frac{P_{\text{ЕЛ}}}{P_{\text{мх}}} = \frac{5400}{7000} = 0,77.$$

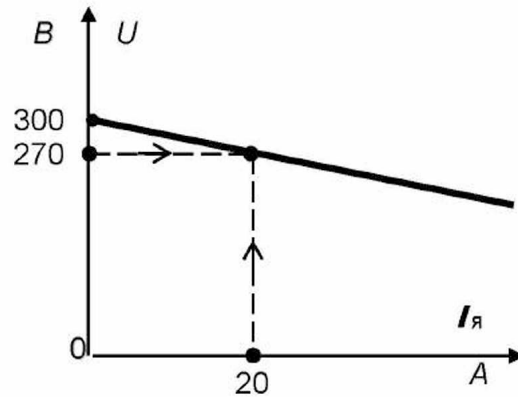
14. Визначаємо електроенергію, яку споживе навантаження за **100 год**:

$$W = P_2 t = 5,4 \cdot 100 = 540 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

15. Розраховуємо та будуємо зовнішню характеристику генератора:

$$U = E - R_{\text{я}} I_{\text{я}} = 300 - 1,5 \cdot I_{\text{я}}.$$

$U, \text{В}$	300	270
$I_{\text{я}}, \text{А}$	0	20



Запитання для самоконтролю

1. Складіть принципову електричну схему керування генератором постійного струму 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 вала. Втрати потужності в магнітопроводі генератора складають **1,0 %** від потужності, що підводиться до вала. Додаткові втрати потужності в генераторі складають **0,2 %** від потужності, що підводиться до вала.

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 якорному колі, яка дорівнює 10 А.
16. Визначити електроенергію, яку споживає навантаження за 10 год.

6.8 Явище електромагнітної сили та закон Ампера

Електрична машина, у якій електрична енергія перетворюється в механічну енергію обертового вала, називається **електродвигуном**. Робота електродвигуна заснована на явищі електромагнітної сили.

Явище електромагнітної сили полягає в тому, що на провідник зі струмом, поміщений у магнітне поле, діє механічна сила, яка виштовхує провідник зі струмом з магнітного поля. Напрямок дії цієї сили визначається за **правилом «лівої руки»**: якщо розташувати ліву руку так, щоб силові лінії магнітного поля входили в долоню, а чотири пальці показували напрям струму в провіднику, то великий відігнутий палець вкаже напрям механічної сили, яка діє на провідник зі струмом. **Закон електромагнітної сили (закон Ампера)**: сила, яка діє на провідник зі струмом, поміщений у магнітне поле, прямо пропорційна магнітній індукції поля, силі струму в провіднику і його довжині:

$$F = BIl \sin \alpha, \quad (6.19)$$

де F – сила, Н;
 B – магнітна індукція поля, Тл;
 l – довжина провідника, м;
 α – кут між напрямом струму в провіднику і вектором магнітної індукції поля, град.

Запитання для самоконтролю

1. У чому суть явища електромагнітної сили?
2. Сформулюйте закон електромагнітної сили.
3. Запишіть математично і розшифруйте закон електромагнітної сили.

6.9 Будо́ва та принцип дії електродвигуна

Будо́ва електродвигуна постійного струму аналогічна будові генератора постійного струму. Властивість електричних машин працювати як генератором, так і електродвигуном 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 наступний: індуктор (обмотка збудження, розташована на полюсах) створює основне магнітне поле. До обмотки якоря підводиться постійна напруга й у ній протікає електричний струм. При протіканні струму в обмотці якоря спостерігається явище електромагнітної сили. Сили, які діють на провідники обмотки якоря, створюють обертаючий момент і двигун приходить в обертання (його якір). При обертанні якоря електродвигуна обмотка якоря перетинає магнітне поле, тобто провідний контур (обмотка якоря) пронизується змінним магнітним полем. Тому в ній виникає явище електромагнітної індукції та в обмотці якоря наводиться е.р.с., протилежна напрямку струму (проти-е.р.с.).

Запитання для самоконтролю

1. Яка електрична машина називається двигуном постійного струму?
2. Що розуміється під оборотністю електричної машини?
3. Складіть і опишіть конструктивну схему двигуна постійного струму.
4. Опишіть принцип дії двигуна постійного струму.
5. Яке призначення колектора та щіткового механізму?
6. Сформулюйте правило «лівої руки».
7. Що таке незалежне збудження двигуна постійного струму?
8. Що таке самозбудження двигуна постійного струму?

6.10 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 провідник 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.

6.11 Енергетична діаграма двигуна

Енергетична діаграма електродвигуна аналогічна енергетичній діаграмі генератора, яка представлена в зворотному порядку (рис.6.7).

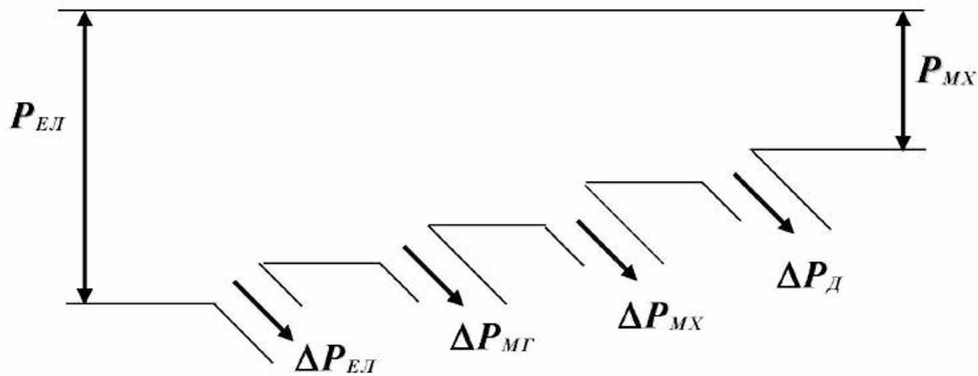


Рис.6.7

Обертаючий момент на валу двигуна (M) дорівнює моменту опору механічного навантаження ($M_{НАВ}$):

$$M = M_{НАВ} . \quad (6.20)$$

Момент, який розвивається на валу електродвигуна, дорівнює:

$$M = k\Phi I_{я} . \quad (6.21)$$

Механічна потужність на валу електродвигуна дорівнює:

$$P_{МХ} = M\omega , \quad (6.22)$$

де ω – кутова швидкість обертання вала електродвигуна, rad/c .

Електрична потужність, споживана електродвигуном з мережі, дорівнює:

$$P_{EЛ} = P_{MХ} + \Delta P_{\Sigma}. \quad (6.23)$$

Коефіцієнт корисної дії електродвигуна дорівнює:

$$\eta = \frac{P_{MХ}}{P_{EЛ}} = \frac{P_{EЛ} - \Delta P_{\Sigma}}{P_{EЛ}} = 1 - \frac{\Delta P_{\Sigma}}{P_{EЛ}}. \quad (6.24)$$

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.

Рішення.

1. Визначаємо потужність на валу електродвигуна:

$$P_{MХ} = U \cdot I \cdot \eta = 200 \cdot 5 \cdot 0,89 = 890 \text{ Вт}.$$

2. Визначаємо кутову швидкість обертання вала електродвигуна:

$$\omega = \frac{2\pi \cdot n}{60} = \frac{6,28 \cdot 1000}{60} = 105 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

3. Визначаємо обертаючий момент електродвигуна:

$$M = \frac{P_{MХ}}{\omega} = \frac{890}{105} = 8,5 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Запитання для самоконтролю

1. Складіть енергетичну діаграму двигуна постійного струму з розшифровкою 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 двигуні постійного струму?
6. Запишіть і розшифруйте вираз моменту, який розвивається електродвигуном постійного струму.
7. Запишіть і розшифруйте вираз механічної потужності на валу електродвигуна постійного струму.
8. Запишіть і розшифруйте вираз електричної потужності, яку споживає електродвигун постійного струму.
9. Як визначити коефіцієнт корисної дії двигуна постійного струму?

6.12 Розрахункова схема двигуна

Відповідно до фізичних явищ і процесів, які протікають в електродвигуні, його розрахункова схема має такий вигляд (рис.6.8).

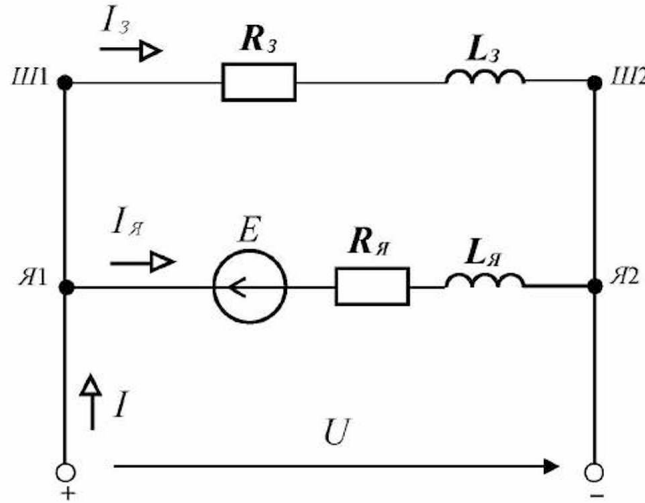


Рис.6.8

На розрахунковій схемі (рис.6.8) приведені наступні позначення:

- R_z – опір кола обмотки збудження, Ом;
- L_z – індуктивність обмотки збудження, Гн;
- I_z – сила струму в обмотці збудження, А;
- E – е.р.с., яка 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;
- U – напруга на затискачах електродвигуна, В.

Запитання для самоконтролю

1. Складіть розрахункову схему двигуна постійного струму паралельного збудження і розшифруйте літерні позначення.

6.13 Швидкісна характеристика двигуна

Одержимо рівняння швидкісної характеристики на підставі розрахункової схеми електродвигуна (рис.6.8), для чого складемо рівняння електричної рівноваги якорного кола та виразимо потенціал точки Я2 ($\varphi_{Я2}$) через потенціал точки Я1 ($\varphi_{Я1}$):

$$\varphi_{Я2} = \varphi_{Я1} - E - R_я I_я. \quad (6.25)$$

Перепишемо (6.25) у наступному вигляді:

$$E = \varphi_{Я1} - \varphi_{Я2} - R_{Я}I_{Я} . \quad (6.26)$$

З огляду на те, що $\varphi_{Я1} - \varphi_{Я2} = U$, одержимо наступне:

$$E = U - R_{Я}I_{Я} . \quad (6.27)$$

З урахуванням (6.4) одержимо:

$$k\Phi\omega = U - R_{Я}I_{Я} . \quad (6.28)$$

З (6.28) одержимо **рівняння швидкісної характеристики електродвигуна** – залежність кутової швидкості обертання якоря від сили струму в якірному колі, напруги на затискачах електродвигуна і магнітного потоку:

$$\omega = \frac{U - R_{Я}I_{Я}}{k\Phi} . \quad (6.29)$$

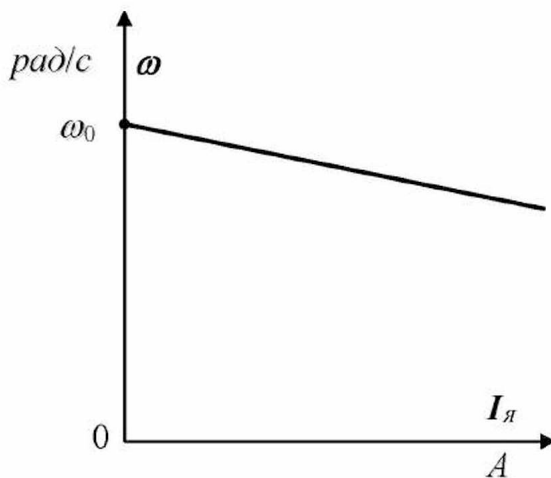


Рис.6.9

Графічно дана залежність (при $U = \text{const}$ і $\Phi = \text{const}$) виглядає наступним чином (рис.6.9).

На рис.6.9 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.

6.14 Регулювання швидкості двигуна

З рівняння швидкісної характеристики (6.29) випливає, що швидкість електродвигуна можна регулювати наступними способами:

- 1) *змінюю напруги 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) *змінюю сили 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);
- 3) *змінюю сили струму якоря* (швидкість двигуна можна регулювати вниз від швидкості ідеального холостого ходу).

Напрямок обертання вала електродвигуна можна змінити, помінявши напрям струму в обмотці якоря або в обмотці збудження (на підставі правила «лівої руки»), тобто помінявши місцями з'єднувальні проводи, які йдуть до затискачів $Я1$ і $Я2$ або до затискачів $Ш1$ 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. Як змінити напрям обертання двигуна постійного струму?

6.15 Принципова електрична схема керування двигуном

Відповідно до викладеного вище, складаємо принципову електричну схему керування двигуном (рис.6.10).

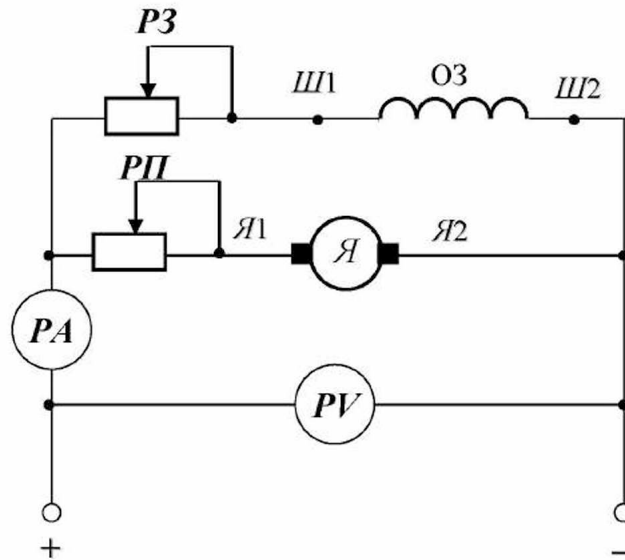


Рис.6.10

На даній схемі (рис.6.10) приведені наступні позначення:

- $P3$ – регулювальний реостат у колі збудження;
- $O3$ – обмотка збудження;
- $Ш1, Ш2$ – затискачі обмотки збудження;
- $Я1, Я2$ – затискачі обмотки якоря;
- $Я$ – якір електродвигуна;
- PP – пусковий реостат у колі якоря;
- PA – амперметр, який вимірює силу струму в обмотці якоря;
- PV – вольтметр, який вимірює напругу на затискачах електродвигуна.

У початковий момент пуску якір електродвигуна нерухомий, тому противо-е.р.с. в обмотці якоря дорівнює нулю ($E = 0$). Отже, сила струму в обмотці якоря на підставі (6.27) дорівнює:

$$I_{Я} = \frac{U}{R_{Я}}. \quad (6.31)$$

Опір обмотки якоря незначний, тому сила струму в обмотці якоря 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 PP .

При пуску регулювальний реостат у колі збудження $P3$ повинний бути виведений ($R_{P3} = 0$), а пусковий реостат 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, який дорівнює **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**.

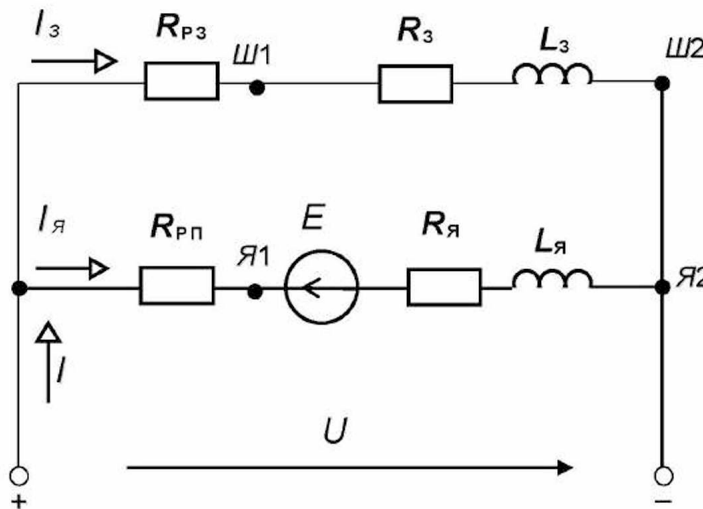
Скласти принципову електричну схему керування електродвигуном; розрахункову схему якорного кола і кола збудження.

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.

Рішення.

1. Принципова електрична схема керування електродвигуном приведена на рис.6.10.

Складаємо розрахункову схему, яка містить якорне коло і коло збудження:



2. Визначаємо потужність, споживану електродвигуном з мережі при номінальному навантаженні:

$$P_{\text{Ел.н}} = \frac{P_{\text{МХ.н}}}{\omega_{\text{н}}} = \frac{2200}{0,85} = 2588 \text{ Вт}.$$

3. Визначаємо номінальний струм електродвигуна:

$$I_{\text{н}} = \frac{P_{\text{Ел.н}}}{U_{\text{н}}} = \frac{2588}{110} = 23,5 \text{ А}.$$

4. Визначаємо струм в обмотці збудження електродвигуна:

$$I_3 = \frac{U}{R_3} = \frac{110}{55} = 2 \text{ А}.$$

5. Визначаємо номінальний струм у колі якоря електродвигуна:

$$I_H - I_{я.н} - I_3 = 0; \quad I_{я.н} = I_H - I_3 = 23,5 - 2 = 21,5 \text{ А.}$$

6. Визначаємо пусковий струм у колі якоря електродвигуна при виведеному пусковому реостаті:

$$I_{я.п} = \frac{U}{R_я} = \frac{110}{0,5} = 220 \text{ А.}$$

7. Визначаємо значення пускового опору, яке забезпечує пусковий струм у колі якоря, що дорівнює номінальному струму якоря:

$$I_{я.н} = \frac{U}{R_я + R_{рп}}; \quad R_я I_{я.н} + R_{рп} I_{я.н} = U;$$

$$R_{рп} = \frac{U - R_я I_{я.н}}{I_{я.н}} = \frac{U}{I_{я.н}} - R_я = \frac{110}{21,5} - 0,5 = 5,2 - 0,5 = 4,7 \text{ Ом.}$$

8. Визначаємо сумарні втрати потужності в електродвигуні:

$$\Delta P_{\Sigma} = P_{ел.н} - P_{мх.н} = 2588 - 2200 = 388 \text{ Вт.}$$

Запитання для самоконтролю

1. Складіть принципову електричну схему керування двигуном постійного струму паралельного збудження.
2. Поясніть, як запустити двигун постійного струму, використовуючи швидкісну характеристику двигуна та принципову схему керування.
3. Поясніть, як змінити напрям обертання вала двигуна постійного струму, використовуючи швидкісну характеристику двигуна та принципову схему керування.
4. Поясніть, як регулюється швидкість вала двигуна постійного струму, використовуючи швидкісну характеристику двигуна та принципову схему керування.

Завдання для самоконтролю

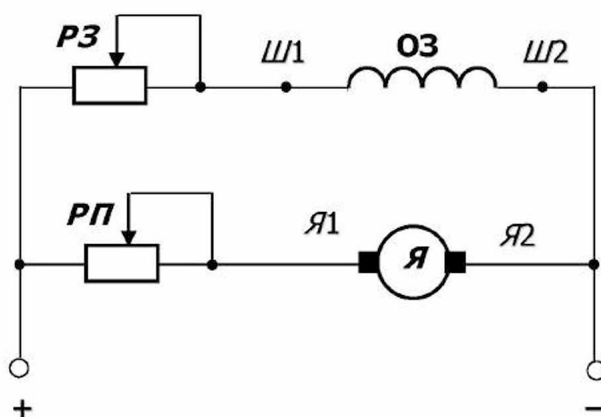
Якір електродвигуна обертається зі швидкістю **1500 об/хв**. До електродвигуна підведена напруга **220 В**. Електродвигун споживає струм силою **10 А**. Коефіцієнт корисної дії електродвигуна дорівнює **87 %**.

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.
10. Розрахувати значення пускового опору, що забезпечує пусковий струм кола якоря, який дорівнює номінальному струму якоря.
11. Визначити сумарні втрати потужності в електродвигуні.



Принципова електрична схема керування двигуном постійного струму паралельного збудження приведена на рисунку.

12. Як зміниться напрям обертання якоря електродвигуна, якщо поміняти місцями з'єднувальні проводи, які йдуть до затискачів Ш1 і Ш2?
Своє рішення обґрунтувати.
13. Як зміниться напрям обертання якоря електродвигуна, якщо поміняти місцями з'єднувальні проводи, які йдуть до затискачів Я1 і Я2?
Своє рішення обґрунтувати.
14. Як зміниться напрям обертання якоря електродвигуна, якщо одночасно поміняти місцями з'єднувальні проводи, які йдуть 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 РП?
16. Що необхідно зробити з реостатом РЗ, щоб відновити попереднє значення швидкості?
17. У якому положенні повинні знаходитися реостати РП і РЗ при пуску електродвигуна і чому?

ТЕМАТИЧНЕ КОМПЛЕКСНЕ КВАЛІФІКАЦІЙНЕ ЗАВДАННЯ

Умова 1

Генератор постійного струму паралельного збудження приводиться в обертання тепловим карбюраторним двигуном.

Передбачено регулювання струму збудження за допомогою регулювального реостата, спостереження за силою струму збудження за допомогою амперметра, спостереження за струмом і напругою генератора за допомогою амперметра й вольтметра.

Паспортні дані генератора наступні: номінальна потужність P_n , номінальна напруга U_n , номінальний к.к.д. η_n . Генератор навантажений за допомогою реостата. К.к.д. теплового двигуна при номінальному навантаженні генератора η_d . Тепломісткість пального становить $4,6 \cdot 10^7$ Дж/кг.

Завдання 1

1. Скласти принципову електричну схему керування генератором.
2. Визначити потужність, що розвивається генератором (P_G).
3. Визначити потужність, що розвивається тепловим двигуном (P_D).
4. Визначити роботу, що виконає тепловий двигун за **10 год** (A_D).
5. Визначити кількість пального, що буде витрачено тепловим двигуном на виконання цієї роботи (m_T).
6. Визначити кількість пального, що буде витрачено тепловим двигуном на виконання корисної роботи ($m_{T,п}$).
7. Визначити кількість пального, що буде витрачено тепловим двигуном на його нагрівання й віддачу в навколишнє середовище ($m_{T,с}$).
8. Визначити номінальний струм генератора (I_n)
9. Після пуску генератор не збуджується.

Укажіть і обґрунтуйте можливі причини.

**Варіанти вихідних даних до тематичного комплексного
кваліфікаційного завдання (до умови 1)**

Таблиця 6.1

Варіанти	Вихідні дані			
	P_H , кВт	U_H , В	η_H	η_D
1	0,95	115	0,675	0,3
2	0,37	115	0,645	0,35
3	0,95	230	0,680	0,4
4	0,37	230	0,645	0,32
5	2,2	115	0,675	0,38
6	0,85	115	0,645	0,4
7	2,2	230	0,680	0,39
8	0,85	230	0,645	0,3
9	3,1	115	0,675	0,35
10	1,3	115	0,645	0,4
11	3,1	230	0,680	0,32
12	1,3	230	0,645	0,38
13	1,1	160	0,645	0,4
14	1,1	230	0,680	0,39
15	5,2	115	0,645	0,4

Умова 2

Двигун постійного струму паралельного збудження приводить в обертання робочу машину. Приєднання двигуна до робочої машини пряме.

Передбачено регулювання струму збудження за допомогою регульовального реостата, спостереження за силою струму збудження за допомогою амперметра, спостереження за струмом і напругою двигуна за допомогою амперметра й вольтметра. Передбачено пусковий реостат.

Паспортні дані двигуна наступні: номінальна потужність P_n , номінальна напруга U_n , номінальний к.к.д. η_n , номінальна частота обертання n_n , номінальний струм двигуна I_n , номінальний струм збудження $I_{z.n}$, опір якорного кола $R_{я}$.

Завдання 2

1. Скласти принципову електричну схему керування двигуном.
2. Скласти розрахункову схему електричного кола двигуна.
3. Визначити кутову швидкість обертання вала робочої машини при номінальному режимі роботи (ω_n).
4. Визначити момент опору робочої машини при номінальному режимі роботи (M_n).
5. Визначити потужність, яку споживає електродвигун з мережі при номінальному режимі роботи (P_n).
6. Визначити втрати потужності на нагрівання електродвигуна й віддачу в навколишнє середовище при номінальному режимі роботи (ΔP_c).
7. Визначити силу струму в обмотці якоря при номінальному режимі роботи ($I_{я.n}$).
8. Визначити втрати потужності в обмотці якоря при номінальному режимі роботи ($\Delta P_{я}$).
9. Визначити втрати потужності в обмотці збудження при номінальному режимі роботи (ΔP_z).
10. Визначити вартість електричної енергії, що споживе двигун за **1000 год.** роботи в номінальному режимі, якщо ціна електроенергії дорівнює **1,5 грн./кВт·год**.

**Варіанти вихідних даних до тематичного комплексного
кваліфікаційного завдання (до умови 2)**

Таблиця 6.2

Варіанти	Вихідні дані						
	$P_H,$ <i>кВт</i>	$U_H,$ <i>В</i>	η_H	$n_H,$ <i>об/хв</i>	$I_H,$ <i>А</i>	$I_{з.н.},$ <i>А</i>	$R_{я},$ <i>Ом</i>
1	0,95	110	0,675	2820	12,8	1	1
2	0,37	110	0,645	1420	5,21	2	1
3	0,95	220	0,680	2820	6,35	1,5	1,2
4	0,37	220	0,645	1420	2,61	1	1,2
5	2,2	110	0,675	2860	29,63	3	1
6	0,85	110	0,645	1430	12,0	2	1
7	2,2	220	0,680	2860	14,7	2	1,2
8	0,85	220	0,645	1430	6,0	1,5	1,2
9	3,1	110	0,675	2860	41,75	1	1
10	1,3	110	0,645	1430	26,26	1	1
11	3,1	220	0,680	2860	20,72	3	1,2
12	1,3	220	0,645	1430	9,16	2	1,2
13	1,1	180	0,645	1430	9,47	1,5	1
14	1,1	220	0,680	1430	7,35	2	1
15	5,2	110	0,645	2860	73,3	3	1,2

Умова 3

Генератор постійного струму незалежного збудження по ідеальній лінії електропередачі живить електричною енергією коло якоря електродвигуна постійного струму незалежного збудження.

Завдання 3

Провести порівняльний аналіз режимів роботи генератора і приймача за наступним алгоритмом (таблиця 6.3), вибравши відповіді з таблиці 6.4:

Таблиця 6.3

Номери питань і завдань	Питання і завдання	Номери вірних відповідей
1.	Яким загальним поняттям можна об'єднати генератор і двигун?	
2.	Приведіть вісімнадцять ознак подібності режимів роботи генератора і двигуна.	
3.	Приведіть чотири ознаки розходження режимів роботи генератора і двигуна.	
4.	Виділіть головну ознаку подібності режимів роботи генератора і двигуна.	
5.	Обґрунтуйте головну ознаку подібності режимів роботи генератора і двигуна.	
6.	Виділіть головну ознаку розходження режимів роботи генератора і двигуна.	
7.	Обґрунтуйте головну ознаку розходження режимів роботи генератора і двигуна.	
8.	Виділіть чотири шляхи взаємодії генератора і двигуна між собою.	
9.	Встановіть причинно-наслідковий зв'язок режимів роботи генератора і двигуна.	

Таблиця 6.4

Номери вірних відповідей	Варіанти відповідей
1.	За допомогою електричного поля.
2.	Зміною струму збудження генератора.
3.	Одинакові струми в якірному колі.
4.	Однакові напруги на затискачах якорів.
5.	Зміною моменту опору на валу двигуна.
6.	Зміною струму збудження двигуна.
7.	Різні перетворення енергії.
8.	Причиною зміни режиму роботи може бути як генератор, так і двигун.
9.	Функціональне призначення.
10.	Елемент електричного кола.
11.	Є вільні заряди.
12.	Електро механічні перетворювачі енергії.
13.	В якірних колах наводяться електрорушійні сили.
14.	Електрорушійні сили, які наводяться в обмотках якорів, мають різні напрями відносно напрямів струмів у цих обмотках.
15.	В обмотках збудження спостерігається явище електричного струму.

Таблиця 6.4 (продовження)

Номери вірних відповідей	Варіанти відповідей
16.	В обмотках збудження спостерігається теплова дія струму та ці обмотки нагріваються.
17.	В обмотках збудження спостерігається явище електромагнетизму та виникає магнітне поле.
18.	В обмотках якорів спостерігається теплова дія струму та ці обмотки нагріваються.
19.	На провідники обмоток якорів діють електромагнітні сили.
20.	Якорі обертаються.
21.	Магнітне поле регулюється.
22.	Різна частота обертання якорів.
23.	Електромагнітні сили, які діють на провідники обмоток якорів, мають різний напрям відносно напрямку обертання.
24.	У магнітопроводах якорів виникають вихрові струми.
25.	Вихрові струми в магнітному полі спричиняють електромагнітні сили, які створюють момент опору обертанню якорів.
26.	В магнітопроводах якорів спостерігається явище теплової дії вихрових струмів та магнітопроводи нагріваються.
27.	Магнітопроводи якорів перемагнічуються з виділенням тепла та магнітопроводи нагріваються.
28.	У механічних системах перетворювачів протікають процеси тертя, які створюють гальмові моменти.
29.	Механічні системи нагріваються.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ 1

1. Опис експериментальної установки

Експериментальна установка містить генератор постійного струму паралельного збудження, який приводиться в обертання тепловим карбюраторним двигуном. Передбачено регулювання струму збудження за допомогою регулювального реостата $PЗ$, спостереження за силою струму збудження за допомогою амперметра PA_1 , спостереження за струмом і напругою генератора за допомогою амперметра PA_2 і вольтметра PV . Паспортні дані генератора наступні: номінальна потужність **4 кВт**, номінальна напруга **220 В**, номінальний к.к.д. **85 %**. Генератор навантажений за допомогою реостата PH . К.к.д. теплового двигуна при номінальному навантаженні генератора дорівнює **28 %**. Тепломісткість пального становить $4,6 \cdot 10^7$ Дж/кг. Час роботи генератора становить **1000 год**.

Принципова електрична схема експериментальної установки наведена на рисунку 1.

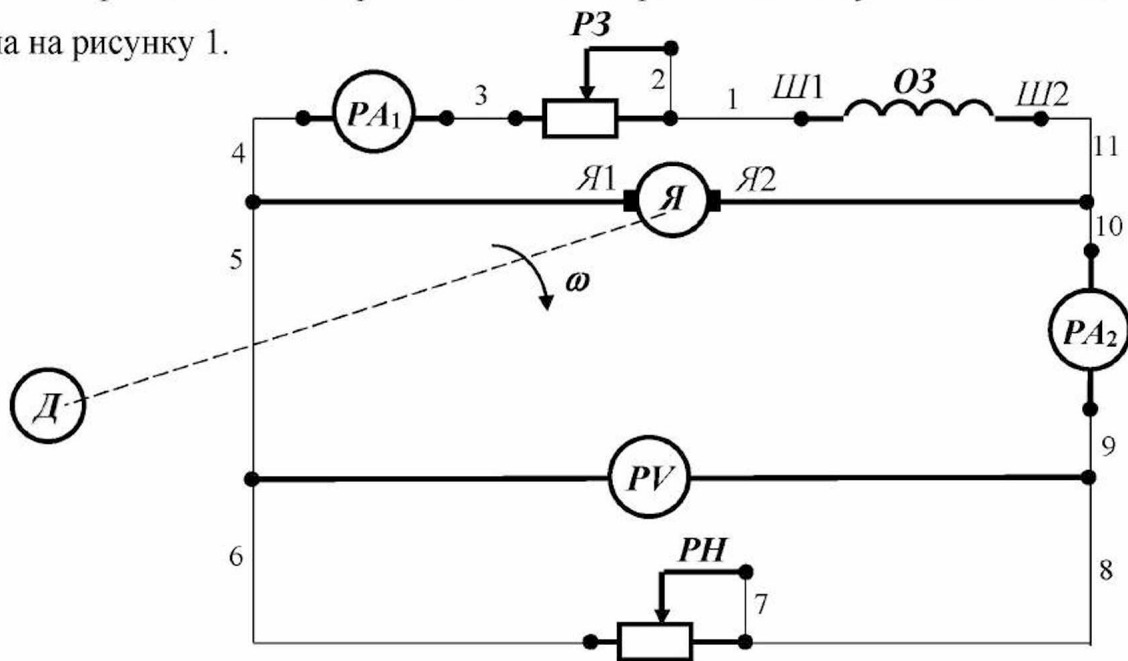


Рисунок 1 - Принципова електрична схема експериментальної установки.

Для складання схеми необхідно мати 11 провідників (на схемі позначені номерами 1-11).

2. Розрахункова схема експериментальної установки

При складанні розрахункової схеми прийняті наступні допущення:

- опори з'єднувальних проводів, обмоток амперметрів дорівнюють нулю;

- опір обмотки вольтметра дорівнює нескінченності.

Тоді розрахункова схема електричного кола експериментальної установки має вигляд, наведений на рисунку 2.

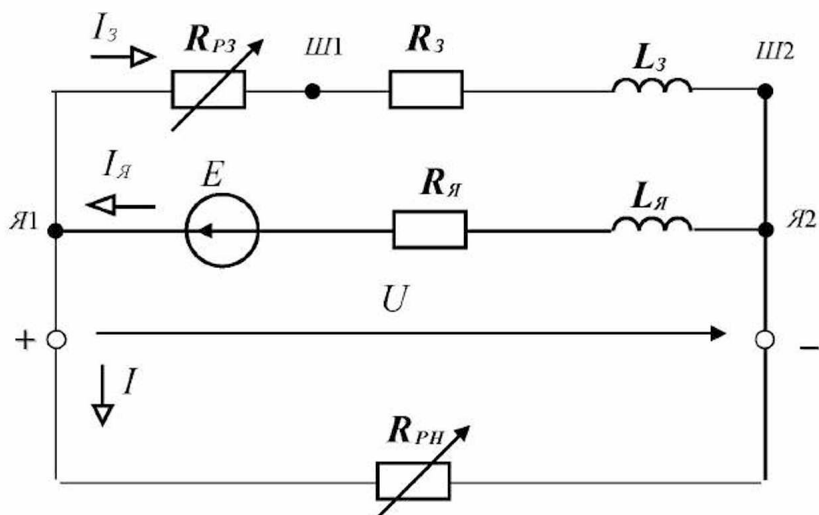


Рисунок 2 - Розрахункова схема електричного кола експериментальної установки.

На розрахунковій схемі введені наступні умовні позначення:

- R_3 – опір обмотки збудження, Ом;
- R_{P3} – опір реостата в колі 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, A ;
 U – напруга на затискачах генератора, B .
 R_{PH} – опір реостата навантаження, Om .

3. Уміння, які здобуваються студентами в результаті виконання експериментального дослідження

- 3.1 Уміти скласти принципову електричну схему кола та зібрати її.
3.2 Уміти скласти розрахункову схему електричного кола та пояснити її.
3.3 Уміти визначити номінальне значення потужності, яку генератор споживає від карбюраторного двигуна, за допомогою паспортних даних.
3.4 Уміти визначити номінальне значення сили струму, який генератор віддає навантаженню, за допомогою паспортних даних.
3.5 Уміти визначити номінальне значення опору реостата навантаження за допомогою паспортних і розрахункових даних.
3.6 Уміти вибрати амперметр для вимірювань сили струму навантаження.
3.7 Уміти виводити генератор на номінальний режим роботи.
3.8 Уміти визначити номінальний струм збудження генератора за допомогою експериментальних даних.
3.9 Уміти указати і обґрунтувати можливі причини відсутності збудження генератора при пуску.
3.10 Уміти визначити величину роботи, яку виконає тепловий двигун за час роботи генератора в номінальному режимі за допомогою експериментальних даних.
3.11 Уміти визначити кількість пального, яку витратить тепловий двигун за час роботи генератора в номінальному режимі за допомогою експериментальних даних.

4. Завдання з виконання експериментального дослідження

- 4.1 Занести відомі значення паспортних і експериментальних даних в таблицю 1.

Таблиця 1

№ п/п	Паспортні і експериментальні дані					
	$U_H,$ <i>B</i>	$P_{Г.Н.},$ <i>Bm</i>	$\eta_{Г.Н.}$	$\eta_{д.Н.}$	$c,$ <i>Дж/кг</i>	$t,$ <i>год.</i>
1						

4.2 Визначити за допомогою паспортних даних номінальне значення потужності, яку генератор споживає від карбюраторного двигуна.

$$\eta_{Г.Н.} = \frac{P_{Г.Н.}}{P_{д.Н.}}$$

4.3 Визначити за допомогою паспортних даних номінальне значення сили струму, який генератор віддає навантаженню, використовуючи рівняння:

$$P_{Г.Н.} = U_H \cdot I_H.$$

4.4 Визначити за допомогою паспортних і розрахункових даних номінальне значення опору реостата навантаження, використовуючи рівняння:

$$P_{Г.Н.} = R_{PH} \cdot I_H^2.$$

4.5 Вибрати амперметр для вимірювань сили струму навантаження, дотримуючись умови, щоб межа вимірювань амперметра була більшою за номінальний струм навантаження.

4.6 Зібрати схему експериментальної установки та виставити опір реостата навантаження у необхідне положення (відповідно до пункту 4.4).

4.7 Запустити генератор та вивести його на номінальний режим роботи.

4.8 Визначити за допомогою експериментальних даних струм збудження генератора при номінальному навантаженні.

4.9 Вказати і обґрунтувати можливі причини відсутності збудження генератора при пуску.

4.10 Визначити величину роботи, яку виконає тепловий двигун за час роботи генератора в номінальному режимі за допомогою експериментальних даних, використовуючи рівняння:

$$A = \frac{P_{\text{д.н.}}}{\eta_{\text{д.н.}}} \cdot t$$

4.11 Визначити кількість пального, яку витратить тепловий двигун за час роботи генератора в номінальному режимі за допомогою експериментальних даних, використовуючи рівняння:

$$A = m_{\text{п}} \cdot c$$

4.12 Занести отримані значення в таблицю 2.

Таблиця 2

№ п/п	Фізичні величини, що характеризують установку					
	$P_{\text{д.н.}}, \text{Вт}$	$I_{\text{н.}}, \text{А}$	$R_{\text{рн.}}, \text{Ом}$	$I_{\text{з.н.}}, \text{А}$	$A, \text{Дж}$	$m_{\text{п}}, \text{кг}$
1						

5. Структура звіту

5.1 Назва теми експериментального дослідження.

5.2 Принципова електрична схема експериментальної установки.

5.3 Розрахункова схема експериментальної установки.

5.4 Таблиця 1.

5.5 Таблиця 2.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ 2

1. Опис експериментальної установки

Експериментальна установка містить електродвигун постійного струму паралельного збудження, який приводить в обертання робочу машину *РМ*. Передбачено регулювання струму збудження за допомогою регулювального реостата *РЗ*, спостереження за силою струму збудження за допомогою амперметра *РА₁*, спостереження за струмом і напругою двигуна за допомогою амперметра *РА₂* і вольтметра *РВ*. Передбачено пусковий реостат *РП*. Паспортні дані двигуна наступні: номінальна потужність **4 кВт**, номінальна напруга **220 В**, номінальний к.к.д. **80 %**. Номінальна частота обертання **1500 об/хв**. Робоча частота обертання **1000 об/хв**. Номінальний струм двигуна дорівнює **22,2 А**. Номінальний струм збудження дорівнює **1 А**. Опір обмотки якоря дорівнює **0,5 Ом**. Час роботи електродвигуна становить **1000 год**.

Принципова електрична схема експериментальної установки наведена на рисунку 1.

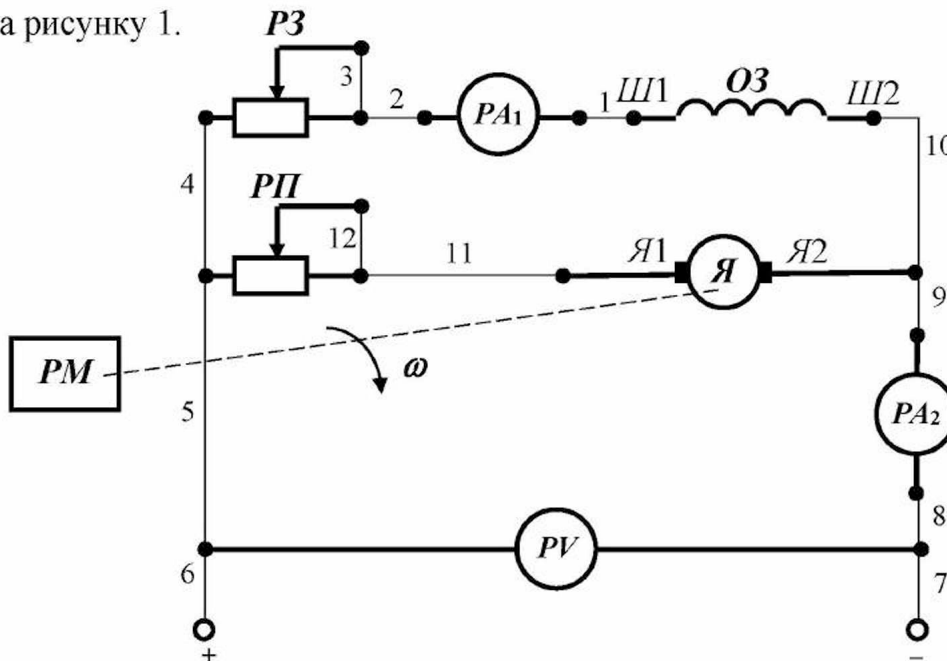


Рисунок 1 - Принципова електрична схема експериментальної установки.

Для складання схеми необхідно мати 12 провідників (на схемі позначені номерами 1-12).

2. Розрахункова схема експериментальної установки

При складанні розрахункової схеми прийняті наступні допущення:

- опори з'єднувальних проводів, обмоток амперметрів дорівнюють нулю;

- опір обмотки вольтметра дорівнює нескінченності.

Тоді розрахункова схема електричного кола експериментальної установки має вигляд, наведений на рисунку 2.

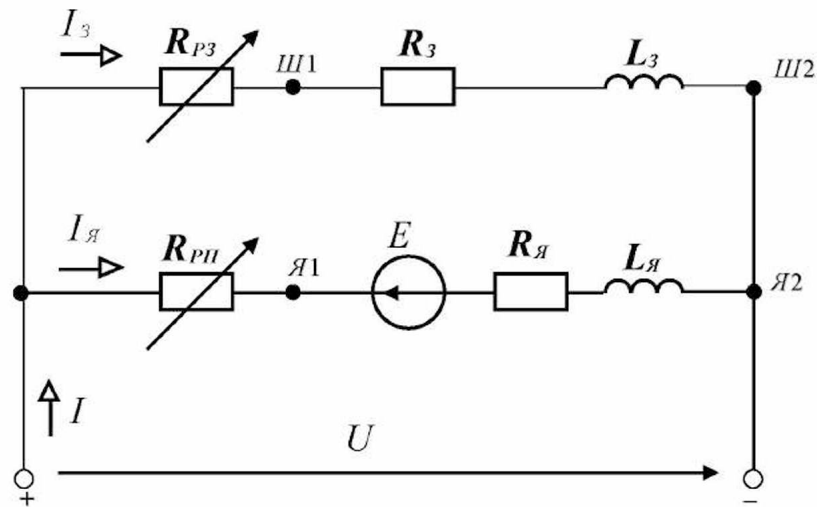


Рисунок 2 - Розрахункова схема електричного кола експериментальної установки.

$R_з$	– опір обмотки збудження, Ом;
$L_з$	– індуктивність обмотки збудження, Гн;
$R_{PЗ}$	– опір реостата збудження, Ом;
$I_з$	– сила струму збудження, А;
$R_я$	– опір обмотки якоря, Ом;
$L_я$	– індуктивність обмотки якоря, Гн;
E	– противо-е.р.с. обмотки якоря, В;
$R_{PЯ}$	– опір пускового реостата, Ом;
$I_я$	– сила струму обмотки якоря, А;
I	– сила струму, що споживає двигун з мережі, А;
U	– напруга на затискачах двигуна, В.

3. Уміння, які здобуваються студентами в результаті виконання експериментального дослідження

- 3.1 Уміти скласти принципову електричну схему кола та зібрати її.
- 3.2 Уміти скласти розрахункову схему електричного кола та пояснити її.
- 3.3 Уміти вибрати амперметр для вимірювання сили струму, який споживає електродвигун.
- 3.4 Уміти вибрати амперметр для вимірювання сили струму збудження.
- 3.5 Уміти вибрати вольтметр для вимірювання напруги на затискачах електродвигуна.
- 3.6 Уміти визначити номінальне значення сили струму у колі якоря за допомогою паспортних даних.
- 3.7 Уміти визначити номінальне значення опору пускового реостата за допомогою паспортних і розрахункових даних.
- 3.8 Уміти запустити електродвигун та вивести його на заданий режим роботи.
- 3.9 Уміти змінити напрям обертання двигуна двома способами та пояснити їх.
- 3.10 Уміти визначити робочу кутову швидкість обертання електродвигуна за паспортними даними.
- 3.11 Уміти визначити магнітний потік електродвигуна за паспортними та розрахунковими даними.
- 3.12 Уміти визначити величину опору реостата, яку необхідно ввести в коло якоря, щоб добитися робочої частоти обертання за паспортними та розрахунковими даними.
- 3.13 Уміти визначити потужність, яку споживає електродвигун з мережі в номінальному режимі, за паспортними даними.

3.14 Уміти визначити кількість електроенергії, яку споживає електродвигун за час роботи, за паспортними та експериментальними даними.

4. Завдання з виконання експериментального дослідження

4.1 Занести відомі значення паспортних і експериментальних даних в таблицю 1.

Таблиця 1

№ п/п	Паспортні і експериментальні дані								
	$U_{н},$ <i>B</i>	$P_{н},$ <i>Bm</i>	$\eta_{н}$	$n_{н},$ <i>об/хв</i>	$n,$ <i>об/хв</i>	$I_{н},$ <i>A</i>	$I_{з.н},$ <i>A</i>	$R_{я},$ <i>Ом</i>	$t,$ <i>год.</i>
1									

4.2 Вибрати амперметр PA_2 для вимірювань сили струму, який споживає електродвигун, дотримуючись умови, щоб межа вимірювань амперметра була більшою за номінальний струм електродвигуна.

4.3 Вибрати амперметр PA_1 для вимірювань сили струму збудження, дотримуючись умови, щоб межа вимірювань амперметра була більшою за номінальне значення струму збудження електродвигуна.

4.4 Вибрати вольтметр PV для вимірювання напруги на затискачах електродвигуна, дотримуючись умови, щоб межа вимірювань вольтметра була більшою за номінальне значення напруги електродвигуна.

4.5 Визначити номінальне значення сили струму у колі якоря за допомогою паспортних даних, користуючись першим законом Кірхгофа:

$$I_{н} - I_{з.н} - I_{я.н} = 0.$$

4.6 Визначити номінальне значення опору пускового реостата за допомогою паспортних і розрахункових даних, користуючись другим законом Кірхгофа для якірного кола:

$$U_{\text{H}} - R_{\text{Я}} \cdot I_{\text{Я.Н}} - R_{\text{РП}} \cdot I_{\text{Я.Н}} = 0.$$

4.7 Зібрати схему експериментальної установки та виставити опір пускового реостата у необхідне положення (відповідно до пункту 4.6).

4.8 Запустити електродвигун та вивести його на номінальний режим роботи.

4.9 Змінити напрям обертання двигуна двома способами та пояснити їх

4.10 Визначити робочу кутову швидкість обертання електродвигуна за паспортними даними, користуючись рівнянням:

$$\omega = \frac{2\pi \cdot n}{60}.$$

4.11 Визначити магнітний потік електродвигуна за паспортними та розрахунковими даними, користуючись рівнянням:

$$\omega_{\text{H}} = \frac{U_{\text{H}} - R_{\text{Я}} \cdot I_{\text{Я.Н}}}{k\Phi}.$$

4.12 Визначити опір реостата, який необхідно ввести в коло якоря, щоб добитися робочої частоти обертання, за паспортними та розрахунковими даними, користуючись рівнянням:

$$\omega = \frac{U_{\text{H}} - (R_{\text{Я}} + R'_{\text{РП}}) \cdot I_{\text{Я.Н}}}{k\Phi}.$$

4.13 Визначити потужність, яку споживає електродвигун з мережі в номінальному режимі, за паспортними даними, користуючись рівнянням:

$$\eta_{\text{H}} = \frac{P_{\text{H}}}{P_{1\text{H}}}$$

4.14 Визначити кількість електроенергії, яку споживе електродвигун за час роботи, за паспортними та експериментальними даними, користуючись рівнянням:

$$W_{\text{H}} = P_{1\text{H}} \cdot t$$

4.15 Занести отримані значення в таблицю 2.

Таблиця 2

№ п/п	Фізичні величини, що характеризують установку						
	$I_{\text{я.н}}, A$	$R_{\text{рп}}, \text{Ом}$	$\omega, \text{рад/с}$	$k\Phi, \text{Вб}$	$R'_{\text{рп}}, \text{Ом}$	$P_{1\text{H}}, \text{Вт}$	$W_{\text{H}}, \text{кВт}\cdot\text{год}$
1							

5. Структура звіту

5.1 Назва теми експериментального дослідження.

5.2 Принципова електрична схема експериментальної установки.

5.3 Розрахункова схема експериментальної установки.

5.4 Таблиця 1.

5.5 Таблиця 2.

Тема 7 ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ ЗМІННОГО СТРУМУ

7.1 Трифазний асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором

Будова та принцип дії

Трифазний асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором має дві основні частини – статор і ротор, які відділені одна від одної мінімальним повітряним зазором.

Статор (*нерухома частина*) електродвигуна являє собою порожній коаксіальний циліндр, набраний з листів електротехнічної сталі. В його пази укладені три обмотки, виконані з проводу одного перерізу й однакового матеріалу (як правило, міді) та зсунуті в просторі на кут 120° (тобто є симетричними). Вони називаються **фазними обмотками** або **фазами електродвигуна**. Початки ($C1, C2, C3$) та кінці ($C4, C5, C6$) фаз електродвигуна (тобто обмотки статора) виводять на клемну коробку. Призначення статора – створення магнітного поля в асинхронному електродвигуні.

Ротор (*обертюва частина*) являє собою циліндр, набраний з листів електротехнічної сталі, у пази якого залита обмотка. Провідники (стрижні) обмотки ротора мають однаковий переріз, виконані з однакового матеріалу (як правило, алюмінію) та замкнені накоротко за допомогою кільця. Магнітопровід ротора кріпиться на валу з вентилятором (для охолодження) та підшипниками, які запресовують у підшипникові щити, які кріпляться до корпусу електродвигуна. Призначення ротора – надавання руху робочій машині.

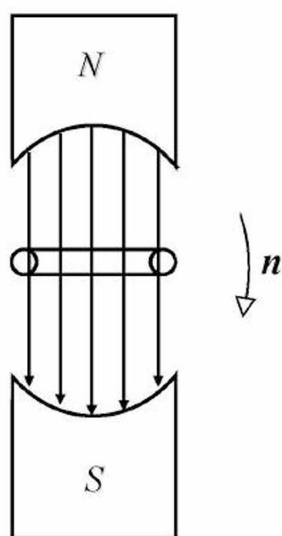


Рис. 7.1

Принцип дії асинхронного електродвигуна розглянемо на наступному прикладі (рис. 7.1): між полюсами постійного магніту на осі розташована короткозамкнена рамка. Якщо обернути магніти навколо осі рамки зі швидкістю n , 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 е.р.с. у рамці буде протікати електричний струм, а через те, що рамка знаходиться в магнітному полі, буде спостерігатися явище електромагнітної сили та виникне обертаючий момент, який буде діяти на рамку. В результаті рамка почне обертатися.

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 електрорушійна сила, яка наводиться в рамці, сила струму в рамці та обертаючий момент. Якщо цей момент буде менше моменту опору обертання рамки, то рамка почне пригальмовуватися. В результаті чого 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**).

В асинхронному електродвигуні з короткозамкненим ротором обертове магнітне поле створюють три обмотки статора. Для одержання обертового магнітного поля необхідно, щоб ці обмотки на колі статора були розташовані під кутом 120° по відношенню одна до одної та одержували живлення електричним струмом від симетричного трифазного джерела. В двигуні дана умова виконується, в результаті чого при підключенні його до джерела виникає обертове магнітне поле. Це 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 механічна сила, в результаті чого виникає обертаючий момент і ротор починає рухатися. Всі процеси надалі протікають аналогічно прикладу на рис.7.1.

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.

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.

Рішення.

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):

$$p = \frac{60f}{n_0} = \frac{60 \cdot 50}{1500} = \frac{3000}{1500} = 2.$$

Ротор електродвигуна завжди обертається повільніше магнітного поля, тобто магнітне поле як би «ковзає» відносно ротора (у тому випадку, якщо магнітне поле і ротор обертаються одночасно, то зміни магнітного поля відносно обмотки ротора не буде й у цій обмотці не буде наводитися е.р.с. і протікати 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**:

$$s = \frac{\Delta n}{n_0} = \frac{n_0 - n}{n_0}, \quad (7.3)$$

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, яка дорівнює **1450 об/хв**, одержуючи живлення від мережі з частотою **50 Гц**.

Визначити абсолютне та відносне ковзання електродвигуна.

Рішення.

1. Визначаємо абсолютне ковзання електродвигуна за (7.2):

$$\Delta n = n_0 - n = 1500 - 1450 = 50 \text{ об/хв.}$$

2. Визначаємо відносне ковзання електродвигуна за (7.3):

$$s = \frac{\Delta n}{n_0} = \frac{50}{1500} = 0,033.$$

Запитання для самоконтролю

1. Для чого призначений трифазний асинхронний електродвигун?
2. На якому явищі заснована робота трифазного асинхронного електродвигуна?
3. Опишіть будову трифазного асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором.
4. Що розуміється під обертовим магнітним полем?
5. Як визначити кутову швидкість обертання магнітного поля?
6. Опишіть принцип дії трифазного асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором.
7. Що розуміється під абсолютним ковзанням трифазного асинхронного електродвигуна?
8. Як визначити відносне ковзання трифазного асинхронного 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 гістерезису;
- явище теплової дії гістерезису;
- 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.7.2).

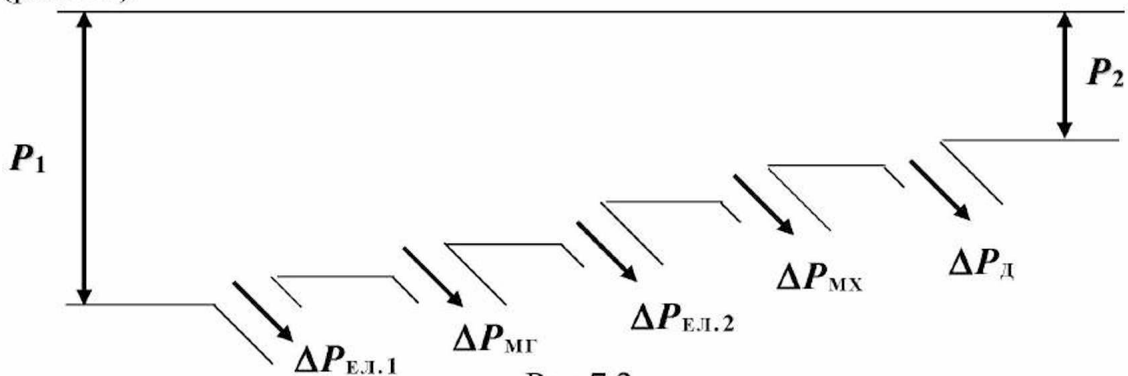


Рис.7.2

На енергетичній діаграмі (рис.7.2) позначено:

P_1 – електрична потужність,
яку споживає електродвигун, *Вт*;

$\Delta P_{\text{ЕЛ.1}}$ – електричні втрати в обмотці статора
(в результаті теплової дії струму, який в ній протікає), *Вт*;

$\Delta P_{\text{МГ}}$ – втрати в магнітопроводі електродвигуна
(в результаті теплової дії вихрових струмів та гістерезису), *Вт*;

$\Delta P_{\text{ЕЛ.2}}$ – електричні втрати в обмотці ротора
(в результаті теплової дії струму, який в ній протікає), *Вт*;

$\Delta P_{\text{МХ}}$ – механічні втрати
(в результаті тертя в підшипниках і ротора об повітря), *Вт*;

$\Delta P_{\text{Д}}$ – 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:

$$\begin{aligned}\Delta P_{\Sigma} = P_1 - P_2 &= \Delta P_{\text{ЕЛ.1}} + \Delta P_{\text{МГ}} + \Delta P_{\text{ЕЛ.2}} + \Delta P_{\text{МХ}} + \Delta P_{\text{Д}} = \\ &= \Delta P_{\text{CONST}} + \Delta P_{\text{VAR}} ;\end{aligned}\quad (7.5)$$

$$\Delta P_{\text{CONST}} = \Delta P_{\text{МГ}} + \Delta P_{\text{МХ}} ;\quad (7.6)$$

$$\Delta P_{\text{VAR}} = \Delta P_{\text{ЕЛ.1}} + \Delta P_{\text{ЕЛ.2}} + \Delta P_{\text{Д}} ,\quad (7.7)$$

де ΔP_{CONST} – постійні втрати в електродвигуні,
які прямо пропорційні квадрату напруги (U^2),
що підводиться до обмоток статора, *Вт*;

ΔP_{VAR} – змінні втрати в електродвигуні,
які прямо пропорційні квадрату сили струму (I^2) в обмотках, *Вт*.

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 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, $В\cdot А$.

Приклад 7.3

Асинхронний електродвигун, номінальна потужність якого дорівнює **3 кВт**, має номінальний к.к.д., який дорівнює **0,91**.
Визначити сумарні втрати потужності в електродвигуні.

Рішення.

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 сумарні втрати потужності в електродвигуні за (7.5):

$$\Delta P_{\Sigma} = P_1 - P_2 = 3296,7 - 3000 = 296,7 \text{ Вт}.$$

Запитання для самоконтролю

1. Складіть енергетичну діаграму трифазного асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором, розшифруйте літерні позначення.
2. Що таке постійні втрати потужності в трифазному асинхронному електродвигуні?
3. Що таке змінні втрати потужності в трифазному асинхронному електродвигуні?
4. Запишіть і розшифруйте вирази втрат потужності в обмотках трифазного асинхронного електродвигуна.
5. Як визначити коефіцієнт корисної дії трифазного асинхронного електродвигуна?
6. Як визначити коефіцієнт потужності трифазного асинхронного електродвигуна?
7. Як впливають втрати потужності в елементах конструкції асинхронного електродвигуна на його роботу?

Підключення, пуск, регулювання швидкості обертання, реверсування і гальмування

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 (C_4 , C_5 , C_6 поєднують у загальний вузол) або за схемою трикутника (C_4 із C_2 , C_5 із C_3 , C_6 із C_1).

Момент, який розвивається на валу електродвигуна, залежить від магнітного потоку, сили струму в обмотці ротора та коефіцієнта потужності обмотки ротора:

$$M = k\Phi I_2 \cos \psi_2, \quad (7.10)$$

де M – обертаючий момент, $H \cdot m$;
 Φ – діюче значення магнітного потоку, $B\phi$;
 I_2 – діюче значення сили струму в обмотці ротора, A ;
 ψ_2 – кут зсуву фаз е.р.с. і струму ротора, rad .

В результаті того, що магнітний потік пропорційний прикладеній напрузі, то можна довести, що момент, який розвивається двигуном, пропорційний квадрату прикладеної напруги, тобто

$$M \equiv U^2, \quad (7.11)$$

де U – діюче значення прикладеної напруги, B .

Отже, при зниженій напрузі на затискачах обмоток статора електродвигуна момент на валу буде дорівнювати:

$$M' = M_H \left(\frac{U'}{U_H} \right)^2, \quad (7.12)$$

де M' – момент на валу електродвигуна при зниженій напрузі, $H \cdot m$;
 M_H – момент на валу електродвигуна при номінальній напрузі, $H \cdot m$;
 U' – знижена напруга на затискачах обмоток статора, B ;
 U_H – номінальна напруга на затискачах обмоток статора, B .

У початковий момент пуску ротор електродвигуна нерухомий і відносно ковзання дорівнює одиниці, тому сила струму в обмотках електродвигуна при пуску більше номінального значення в 5 – 7 разів. **Пуск** асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором здійснюють при номінальній напрузі (прямий пуск) та при зниженій напрузі:

1. *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 силового трансформатора. При такому способі пуску струм, споживаний електродвигуном при пуску, не спричиняє значного перегріву двигуна і спадання напруги мережі (тобто не порушить роботу інших пристроїв, включених в мережу).

2. *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 з зірки на трикутник (тобто в початковий момент пуску обмотки статора з'єднані за схемою зірки, а після короткотермінового процесу пуску переключаються на схему трикутника).

Запишемо **рівняння швидкості обертання ротора** електродвигуна:

$$n = n_0(1 - s). \quad (7.13)$$

З виразу (7.13) випливає, що **регулювати частоту обертання** асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором можна такими способами:

1. *Зміною частоти струму в обмотці статора електродвигуна (f)*. Для цього застосовують регулятор частоти, який дозволяє виконувати плавне регулювання швидкості в широких межах.
2. *Зміною кількості пар полюсів електродвигуна (p)*. Для цього застосовують 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 ковзання (s)*. Для цього змінюють напругу, яка підводиться до обмоток статора, за допомогою регулятора напруги.

Для зміни напрямку обертання ротора (**реверсування**) асинхронного електродвигуна треба поміняти місцями два будь-яких проводи з трьох, 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 електродвигуна та його відключенні від живильної мережі при зупинці ротора.
3. *Динамічне гальмування* полягає у відключенні електродвигуна від живильної мережі та наступній подачі на обмотки статора постійної напруги.

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. Як визначити момент на валу трифазного асинхронного електродвигуна за заданими потужністю на валу та кутовою швидкістю обертання вала?
3. Як змінюється момент на валу трифазного асинхронного електродвигуна при відхиленні напруги на затискачах електродвигуна?
4. Як змінюється момент на валу трифазного асинхронного електродвигуна при переключенні обмоток статора зі схеми зірки на схему трикутника?
5. Запишіть і розшифруйте рівняння швидкості обертання ротора трифазного асинхронного електродвигуна.
6. Запишіть і розшифруйте рівняння кутової швидкості трифазного асинхронного електродвигуна.
7. Перелічіть і поясніть способи регулювання швидкості обертання трифазного асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором.
8. Як змінити напрям обертання трифазного асинхронного електродвигуна?
9. Перелічіть і поясніть способи гальмування трифазного асинхронного електродвигуна.

Технічні параметри

Трифазні асинхронні електродвигуни з короткозамкненим ротором, що випускаються для виробничих цілей, призначені для роботи в заданих умовах з визначеними параметрами, які називають **номінальними**. До номінальних параметрів цих електродвигунів, які вказуються на заводській таблиці, укріпленій на корпусі електродвигуна, відносяться:

- механічна потужність електродвигуна, kW ;
- частота живильної мережі, $Гц$;
- діюче значення лінійної напруги обмоток статора, V ;
- схеми з'єднання обмоток статора;
- діюче значення лінійного струму обмоток статора, A ;
- швидкість обертання вала 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 довгостроково працювати при температурі $130^{\circ}C$, ізоляція класу F – при температурі $155^{\circ}C$).

На сьогодні випускаються асинхронні електродвигуни від $0,06 kW$ до $400 kW$ при частотах обертання $500 - 3000 об/хв$ у вигляді єдиних серій AI , $5A$, $5AM$ та інших. Крім основного виконання кожна серія має ряд електричних модифікацій, які мають особливості конструкції (наприклад, подвійну обмотку на роторі, глибокі пази в магнітопроводі ротора і так далі):

- з підвищеним пусковим моментом
(для приводу робочих машин: компресорів, дробарок та інших, які мають велике навантаження у момент пуску);
- 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);
- багатшвидкісні;
- 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.7.3).

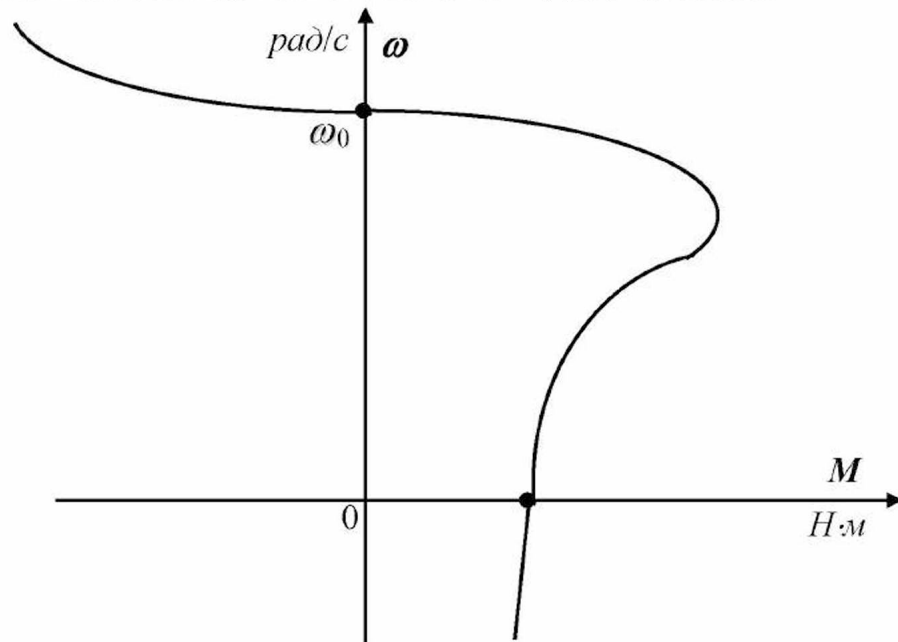


Рис.7.3

Режиму двигуна відповідає ділянка механічної характеристики від $\omega = \omega_0$ до $\omega = 0$ (пуск електродвигуна починається в точці $\omega = 0$), генераторному режиму – ділянка від $\omega > \omega_0$, гальмівному режиму – ділянка від $\omega < 0$.

Механічна характеристика робочої машини являє собою залежність моменту опору робочої машини від кутової швидкості обертання вала $M_{оп} = f(\omega)$:

$$M_{оп} = M_0 + (M_{оп.н} - M_0) \left(\frac{\omega_{оп}}{\omega_{оп.н}} \right)^x, \quad (7.14)$$

- де $M_{оп}$ – момент опору робочої машини, $H \cdot м$;
 M_0 – момент зрушення робочої машини, $H \cdot м$;
 $M_{оп.н}$ – номінальний момент опору робочої машини, $H \cdot м$;
 $\omega_{оп}$ – кутова швидкість робочої машини, $рад/с$;
 $\omega_{оп.н}$ – номінальна кутова швидкість робочої машини, $рад/с$;
 x – показник, що характеризує робочу машину.

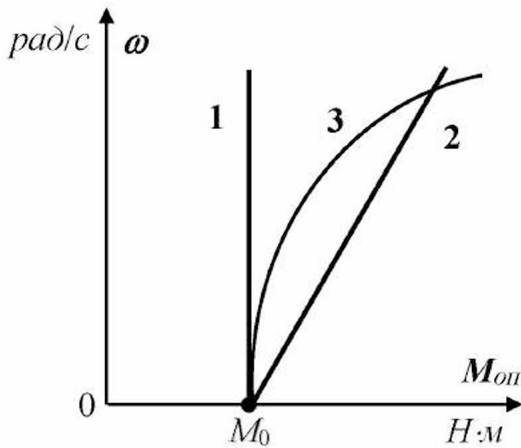


Рис.7.4

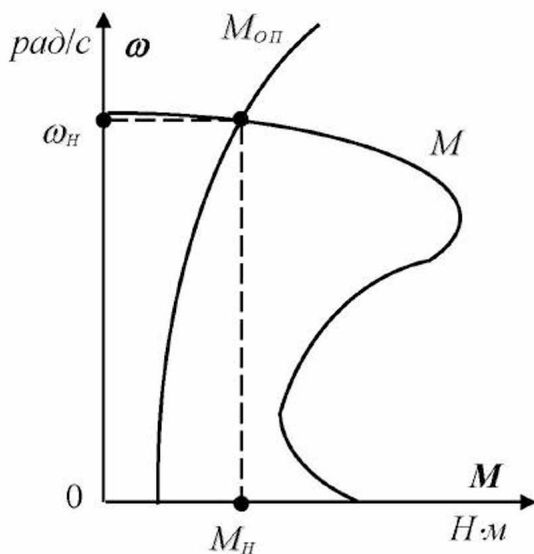


Рис.7.5

Графічно механічні характеристики робочих машин показані на рис.7.4.

Механічні характеристики робочих машин підрозділяються наступним чином:

1. *Не залежна від швидкості* ($x = 0$), тобто момент опору не змінюється при зміні швидкості (транспортери, піднімальні крани та інші).
2. *Лінійно-зростаюча* ($x = 1$).
3. *Параболічна* ($x = 2$), тобто момент опору залежить від квадрата швидкості (відцентрові насоси, вентилятори та інші).

Якщо на одній площині нанести механічні характеристики асинхронного електродвигуна і робочої машини, то точка перетинання цих характеристик буде **робочою точкою** (точкою, у якій буде працювати система «електродвигун – робоча машина»).

На рис.7.5 як приклад показані механічна характеристика асинхронного електродвигуна і параболічна механічна характеристика робочої машини.

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 кутової швидкості робочої машини на **10 %** відносно номінального значення.

Рішення.

1. Визначаємо момент опору робочої машини за (7.14):

$$M_{оп} = M_0 + (M_{оп,н} - M_0) \left(\frac{\omega_{оп}}{\omega_{оп,н}} \right)^x = 10 + (50 - 10) (0,9)^2 = 10 + 40 \cdot 0,81 = 10 + 32,4 = 42,4 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

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 режиму двигуна, генераторному і гальмовому режимам.
3. Запишіть і розшифруйте рівняння механічної характеристики робочої машини.
4. Зобразіть якісно механічні характеристики робочої машини.
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?

Розрахунок механічної характеристики

Розглянемо основні точки механічної характеристики асинхронного електродвигуна (рис.7.6):

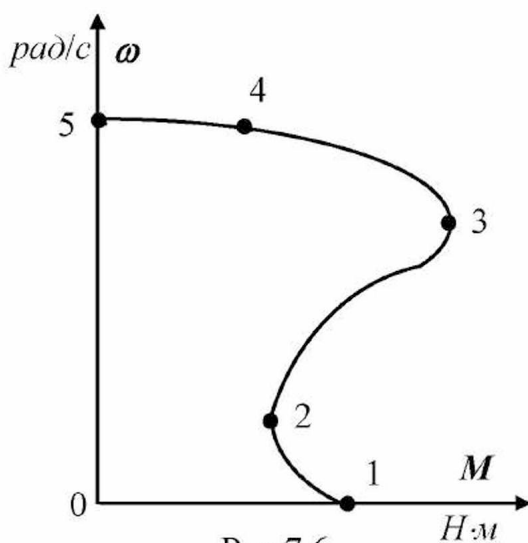


Рис.7.6

- 1) точка пуску електродвигуна:
 $\omega = 0$; $M = M_{п}$;
- 2) точка мінімального моменту при пуску електродвигуна:
 $\omega = \omega_{\text{MIN}}$; $M = M_{\text{MIN}}$;
- 3) точка критичної роботи електродвигуна:
 $\omega = \omega_{\text{КР}}$; $M = M_{\text{КР}}$;
- 4) точка номінальної роботи електродвигуна:
 $\omega = \omega_{\text{Н}}$; $M = M_{\text{Н}}$;
- 5) точка ідеального холостого ходу електродвигуна:
 $\omega = \omega_0$; $M = 0$.

Ці точки механічної характеристики можна розрахувати за паспортними та каталожними даними електродвигуна, для чого необхідні:

- номінальна потужність (P_{2H});
- кількість пар полюсів (p);
- частота струму в живильній мережі (f);
- номінальна швидкість обертання (n_H);
- критичне ковзання (s_{KP});
- мінімальне ковзання (s_{MIN});
- кратність критичного моменту (m_{KP});
- кратність мінімального моменту (m_{MIN});
- кратність пускового моменту (m_{II}).

Кратності критичного, мінімального і пускового моментів – це відношення зазначених моментів до номінального моменту.

Алгоритм розрахунку наступний:

1. Визначаємо синхронну кутову швидкість обертання:

$$\omega_0 = 2\pi n_0 / 60 .$$

2. Визначаємо номінальну кутову швидкість обертання:

$$\omega_H = \omega_0 (1 - s_H) .$$

3. Визначаємо критичну кутову швидкість обертання:

$$\omega_{KP} = \omega_0 (1 - s_{KP}) .$$

4. Визначаємо мінімальну кутову швидкість обертання:

$$\omega_{MIN} = \omega_0 (1 - s_{MIN}) .$$

5. Визначаємо номінальний момент:

$$M_H = P_{2H} / \omega_H .$$

6. Визначаємо критичний момент:

$$M_{KP} = m_{KP} M_H .$$

7. Визначається мінімальний момент:

$$M_{MIN} = m_{MIN} M_H .$$

8. Визначаємо пусковий момент:

$$M_{II} = m_{II} M_H .$$

Приклад 7.5

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 механічну характеристику електродвигуна.

Рішення.

1. Визначаємо синхронну швидкість обертання:

$$n_0 = \frac{60f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{2} = \frac{3000}{2} = 1500 \text{ об/хв.}$$

2. Визначаємо синхронну кутову швидкість обертання:

$$\omega_0 = \frac{2\pi \cdot n_0}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1500}{60} = 157 \text{ рад/с.}$$

3. Визначаємо номінальне ковзання:

$$s_H = \frac{n_0 - n_H}{n_0} = \frac{1500 - 1450}{1500} = \frac{50}{1500} = 0,033.$$

4. Визначаємо номінальну кутову швидкість обертання:

$$\omega_H = \omega_0 (1 - s_H) = 157 (1 - 0,033) = 151,8 \text{ рад/с.}$$

5. Визначаємо критичну кутову швидкість обертання:

$$\omega_{KP} = \omega_0 (1 - s_{KP}) = 157 (1 - 0,33) = 105,2 \text{ рад/с.}$$

6. Визначаємо мінімальну кутову швидкість обертання:

$$\omega_{MIN} = \omega_0 (1 - s_{MIN}) = 157 (1 - 0,85) = 23,6 \text{ рад/с.}$$

7. Визначаємо номінальний момент:

$$M_H = \frac{P_{2H}}{\omega_H} = \frac{3000}{151,8} = 19,8 \text{ Н·м.}$$

8. Визначаємо критичний момент:

$$M_{KP} = m_{KP} M_H = 2,3 \cdot 19,8 = 45,5 \text{ Н·м.}$$

9. Визначаємо мінімальний момент:

$$M_{MIN} = m_{MIN} M_H = 1,1 \cdot 19,8 = 21,8 \text{ Н·м.}$$

10. Визначаємо пусковий момент:

$$M_P = m_P M_H = 2,1 \cdot 19,8 = 41,6 \text{ Н·м.}$$

Запитання для самоконтролю

1. Зобразіть якісно механічну характеристику трифазного асинхронного електродвигуна, покажіть на ній п'ять основних точок, укажіть їх координати.
2. Перелічіть паспортні та каталожні дані, які необхідні для розрахунку механічної характеристики.
3. Що розуміється під кратностями моментів трифазного асинхронного електродвигуна?
4. Приведіть алгоритм розрахунку механічної характеристики трифазного асинхронного електродвигуна за паспортними і каталожними даними.

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 від струму, що споживає електродвигун. Літерне позначення на принципових електричних схемах – *KK*.

Магнітний пускач призначений для включення, вимикання, реверсування, переключення схеми з'єднання обмоток статора електродвигуна. Основні елементи: магнітопровід з нерухомою і рухомою частинами, котушка, 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 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.7.7.

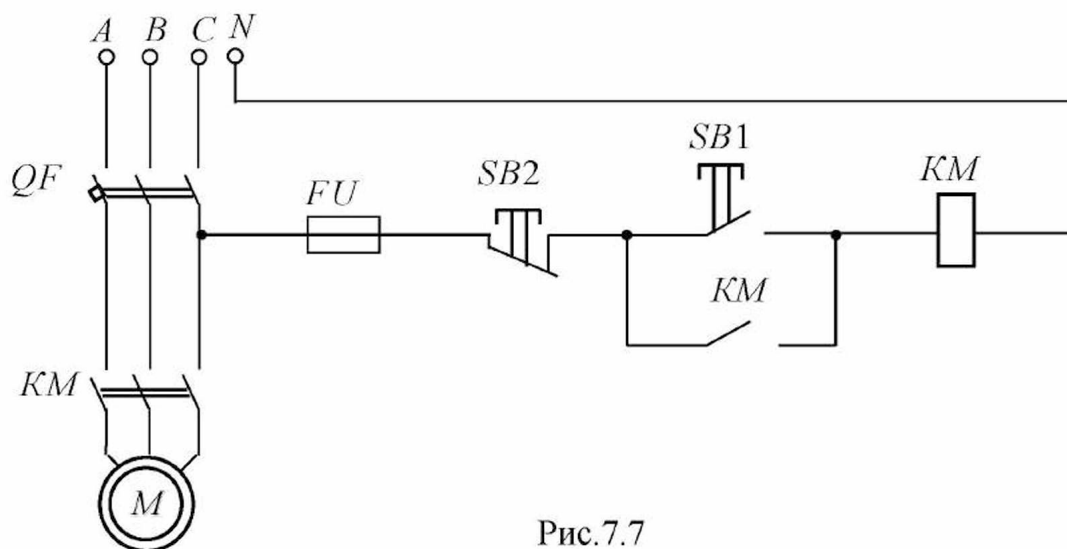


Рис.7.7

Пуск електродвигуна (при замкненому автоматичному вимикачі 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).

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).

Запитання для самоконтролю

1. Що розуміється під силовим колом і колом керування принципової електричної схеми керування трифазного асинхронного електродвигуна?
2. Складіть принципову електричну схему керування трифазним асинхронним електродвигуном з короткозамкненим ротором, розшифруйте літерні позначення.
3. Опишіть пуск трифазного асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором, використовуючи складену принципову електричну схему керування.
4. Опишіть відключення трифазного асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором, використовуючи складену принципову електричну схему керування.

Завдання для самоконтролю

Трифазний асинхронний електродвигун типу **4A100S4У3** має наступні паспортні та каталожні дані:

– номінальна потужність	–	3,0 кВт,
– номінальний к.к.д.	–	82,0 %;
– номінальний коефіцієнт потужності	–	0,83;
– номінальна фазна напруга	–	220 В;
– номінальна швидкість	–	1435 об/хв;
– кратність критичного моменту	–	2,4;
– кратність мінімального моменту	–	1,6;
– кратність пускового моменту	–	2,0;
– критичне ковзання	–	0,13;
– ковзання при мінімальному моменті	–	0,80.

Асинхронний електродвигун надає руху робочій машині з лінійно-зростаючою механічною характеристикою. Момент зрушення (M_0) складає **20 %** від номінального моменту електродвигуна (M_H), номінальний момент опору робочої машини ($M_{оп.н}$) дорівнює номінальному моменту електродвигуна (M_H). Номінальна швидкість робочої машини ($\omega_{оп.н}$) дорівнює номінальній швидкості електродвигуна (ω_H).

1. Розрахувати номінальне значення сили фазного струму трифазного асинхронного електродвигуна.
2. Розрахувати номінальні сумарні втрати активної потужності трифазного асинхронного електродвигуна.
3. Розрахувати механічну характеристику трифазного асинхронного електродвигуна по п'ятьох точках. Результати розрахунку звести в таблицю.
4. Побудувати дану механічну характеристику трифазного асинхронного електродвигуна по п'ятьох точках.
5. Перерахувати механічну характеристику трифазного асинхронного електродвигуна при зниженні напруги живлячої мережі на 20 %.
6. Побудувати дану механічну характеристику трифазного асинхронного електродвигуна по п'ятьох точках на тій же площині (пункт 4).
7. Розрахувати механічну характеристику робочої машини. Результати розрахунку звести в таблицю.
8. Побудувати дану механічну характеристику робочої машини на тій же площині (пункт 4). Показати робочі точки при номінальній та зниженій напругах.

7.2 Однофазні двигуни змінного струму

Ротор однофазного асинхронного електродвигуна побудований так само, як і в трифазного двигуна з короткозамкненим ротором. На статорі електродвигуна (у пазах магнітопроводу) укладена однофазна робоча обмотка, яка займає $2/3$ пазів статора. В іншій частині ($1/3$ пазів) статора укладена пускова обмотка, яка зсунута в просторі щодо робочої на кут 90° .

Пускова обмотка включається тільки на період пуску і після досягнення двигуном усталеної швидкості обертання вона відключається, а електродвигун продовжує працювати з однією робочою обмоткою, тому пускова обмотка виконується з проводу меншого перерізу, ніж робоча обмотка. Обмотки статора підключаються до однофазної мережі, причому пускова обмотка підключається через *фазозсувний елемент* (як правило, конденсатор або резистор). Це необхідно, щоб створити в момент пуску фазовий зсув між струмами в обмотках статора на кут 90° .

В результаті того, що обмотки статора зсунуті в просторі на кут 90° , а струми в обмотках статора зсунуті за фазою на кут 90° , в однофазному електродвигуні створюється обертове магнітне поле. Фізичні явища і процеси в роторі аналогічні трифазному двигуну з короткозамкненим ротором.

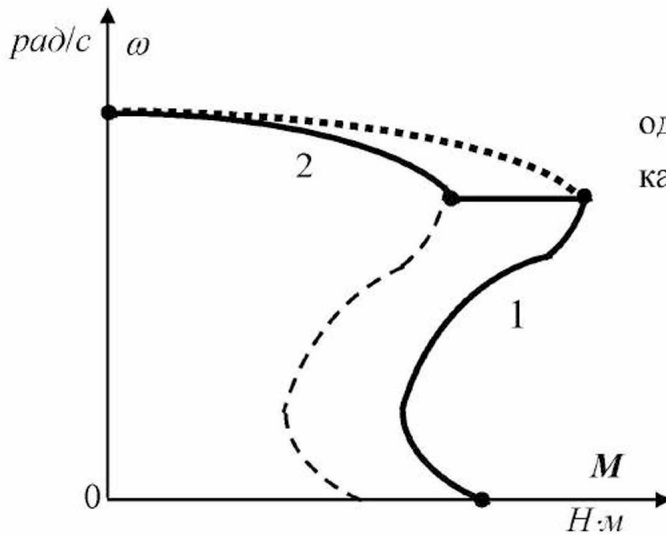


Рис.7.8

Механічна характеристика однофазного електродвигуна показана на рис.7.8:

- ✓ ділянка 1 – робота електродвигуна з пусковою обмоткою;
- ✓ ділянка 2 – робота електродвигуна без пускової обмотки;

Серійно випускаються однофазні асинхронні електродвигуни потужністю від 18 Вт до 600 Вт з пусковим резистором (АОЛБ) і пусковим конденсатором (АОЛГ), причому вартість конденсатора вище вартості резистора. Двигуни АОЛБ використовуються в пральних машинах, холодильниках, центрифугах та інших установках, у яких не висуваються вимоги до високого пускового моменту. Двигуни АОЛГ використовуються при підвищених вимогах до пускового моменту.

Як однофазний електродвигун при необхідності може бути застосований трифазний двигун. Обмотки статора такого електродвигуна, як правило, з'єднують у такий спосіб. Кінці двох фазних обмоток статора з'єднують у загальний вузол, а на початки цих фаз подають фазну напругу. Третю обмотку статора теж підключають на фазну напругу, але через фазозсувний елемент (наприклад, конденсатор). Ємність конденсатора при частоті струму 50 Гц визначають так:

$$C_P = 2740 \frac{I_H}{U_H}, \quad (7.15)$$

де C_P – ємність робочого конденсатора, мкФ;
 I_H – номінальний струм електродвигуна, А.

Номінальний струм електродвигуна визначають за паспортними даними:

$$I_H = \frac{P_{2H}}{3U_H \cos \varphi_H \eta_H}. \quad (7.16)$$

Якщо пуск електродвигуна здійснюється з великим навантаженням на валу, то паралельно робочому конденсатору включають пусковий конденсатор (на період пуску). При ємності пускового конденсатора $C_{II} = (6 \dots 8) \cdot C_P$ пусковий момент електродвигуна наближається до максимального.

При використанні трифазного електродвигуна в зазначеному вище однофазному режимі його потужність на валу знижується до 75 % від номінальної потужності.

Запитання для самоконтролю

1. Опишіть будову однофазного асинхронного електродвигуна.
2. Опишіть принцип дії однофазного асинхронного електродвигуна.
3. Яке призначення фазозсувного елемента?
4. Зобразіть якісно механічну характеристику однофазного асинхронного електродвигуна.
5. Приведіть схеми включення в мережу однофазного асинхронного електродвигуна.
6. Як включити в мережу однофазного струму трифазний асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором?

7.3 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 має три фазні обмотки, з'єднані між собою за схемою зірки. Кінці фазних обмоток ротора приєднують до трьох мідних кілець, які укріплені на валу електродвигуна та ізольовані одне від одного та від вала 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 замкнутого контуру при виготовленні, а в двигуна з фазним ротором обмотка ротора замикається через щітки на додаткові резистори. **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 ті 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 пускового реостата,

включеного в обмотки ротора через щітки і кільця. При такому способі пуску реостат цілком вводять, збільшуючи активний опір обмоток ротора. В результаті відбувається зниження пускового струму і збільшення пускового моменту. *Механічні характеристики електродвигуна при зміні опору обмоток ротора показані на рис.7.9.*

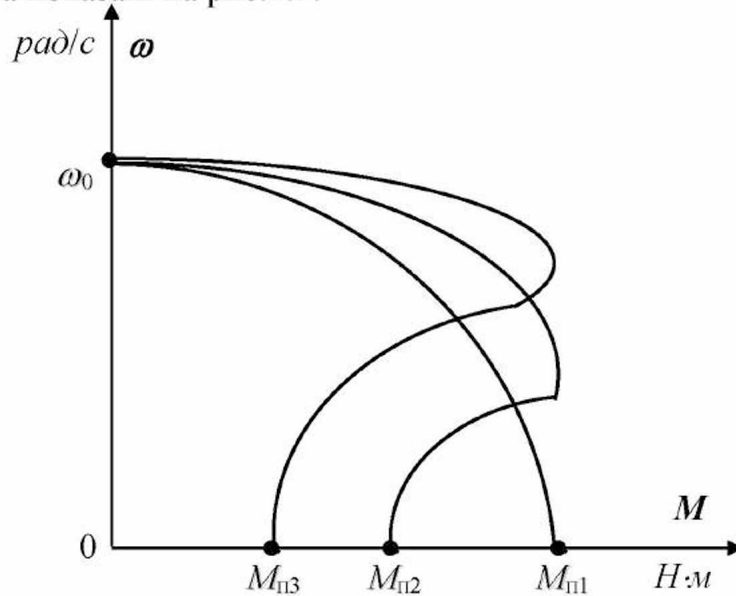


Рис.7.9

Регулювати частоту обертання асинхронного електродвигуна з фазним ротором можна за допомогою реостата, включеного в обмотки ротора, у бік зниження щодо номінального значення. Регулювання плавне аж до повної зупинки двигуна. Однак к.к.д. електродвигуна знижується через втрати активної потужності в реостаті.

Реверсування асинхронного електродвигуна з фазним ротором виконують так само, як і двигуна з короткозамкненим ротором: змінюють місцями два будь-яких проводи з трьох, якими до обмоток статора підводиться напруга.

Гальмування асинхронного електродвигуна з фазним ротором виконують так само, як і двигуна з короткозамкненим ротором.

Застосовують електродвигуни з фазним ротором в установках, де необхідне плавне регулювання швидкості, наприклад, у стендах обкатування двигунів внутрішнього згорання.

Запитання для самоконтролю

1. Опишіть будову трифазного асинхронного електродвигуна з фазним ротором.
2. Опишіть принцип дії трифазного асинхронного електродвигуна з фазним ротором.
3. Перелічіть фізичні явища, які спостерігаються в обмотці статора трифазного асинхронного електродвигуна з фазним ротором.
4. Перелічіть фізичні явища, які спостерігаються в обмотці ротора трифазного асинхронного електродвигуна з фазним ротором.
5. Перелічіть фізичні явища, які спостерігаються в магнітопроводі трифазного асинхронного електродвигуна з фазним ротором.
6. Перелічіть фізичні явища, які спостерігаються в механічній системі трифазного асинхронного електродвигуна з фазним ротором.
7. Складіть енергетичну діаграму трифазного асинхронного електродвигуна з фазним ротором, розшифруйте літерні позначення.
8. Зобразіть якісно сімейство механічних характеристик трифазного асинхронного електродвигуна з фазним ротором та поясніть їх.
9. Перелічіть і поясніть способи регулювання швидкості обертання трифазного асинхронного електродвигуна з фазним ротором.
10. Складіть принципову електричну схему керування трифазним асинхронним електродвигуном з фазним ротором, розшифруйте літерні позначення.

7.4 Трифазний синхронний двигун

Синхронний електродвигун складається зі статора і ротора, розділених мінімальним повітряним зазором. Статор електродвигуна улаштований так само, як і в асинхронного електродвигуна. Ротор являє собою вал з підшипниками і вентилятором (для охолодження), на якому розташовані полюси з обмоткою збудження (робочою обмоткою). Початок і кінець обмотки збудження з'єднуються з кільцями і щітками. Крім цього на роторі укладена пускова короткозамкнена обмотка з мідних стрижнів, які замкнені накоротко мідними шинами.

Принцип дії синхронного електродвигуна наступний. До обмоток статора підводиться напруга, зсунута за фазою на 120° , в результаті чого в електродвигуні створюється обертове магнітне поле. Це поле в пусковій обмотці ротора наводить е.р.с. і в обмотці протікає електричний струм.

Взаємодія провідників зі струмом пускової обмотки і магнітного поля призводить до того, що ротор електродвигуна починає обертатися. У той момент, коли швидкість обертання ротора буде близька до швидкості обертання магнітного поля (90 – 95 %), на затискачі обмотки збудження подається постійна напруга, в результаті чого в цій обмотці буде протікати постійний електричний струм. Взаємодія цього струму й обертового магнітного поля приведе до того, що ротор електродвигуна буде обертатися одночасно (синхронно) з магнітним полем (тобто електродвигун «ввійде в синхронізм»).

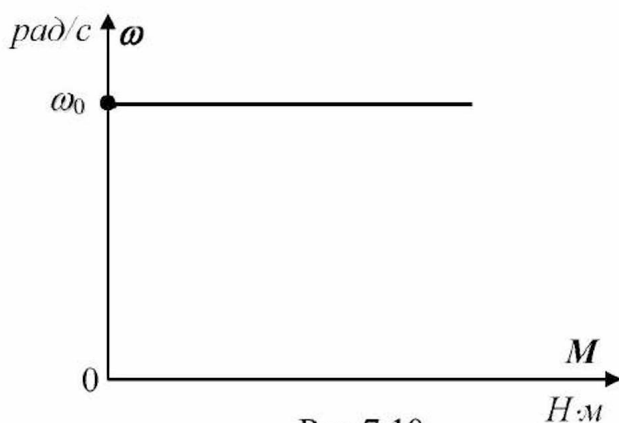


Рис.7.10

Отже, ротор синхронного електродвигуна обертається з постійною швидкістю, яка дорівнює швидкості обертання магнітного поля. Таким чином, *синхронний двигун працює з незмінною швидкістю обертання, яка не залежить від навантаження на валу*. Механічна характеристика такого електродвигуна показана на рис.7.10.

Пуск синхронного двигуна виконують з мінімальним навантаженням на валу, а після входження в синхронізм номінально навантажують.

Синхронні електродвигуни для промислових цілей випускають в основному великої потужності (100 кВт і більше). Вони застосовуються для приводу установок, де не потрібно регулювання швидкості або необхідна постійність швидкості обертання (вентилятори, компресори, насоси, млини, генератори постійного струму і так далі).

Запитання для самоконтролю

1. Опишіть будову синхронного електродвигуна.
2. Опишіть принцип дії синхронного електродвигуна.
3. Зобразіть якісно механічну характеристику синхронного електродвигуна.

ТЕМАТИЧНЕ КОМПЛЕКСНЕ КВАЛІФІКАЦІЙНЕ ЗАВДАННЯ

Умова

Асинхронний електродвигун має наступні технічні дані: номінальна потужність $P_{2н}$, номінальна частота обертання n_n . Електродвигун приводить в обертання робочу машину з наступними технічними даними: момент зрушення M_0 , момент опору номінальний $M_{с.н}$, номінальна швидкість обертання робочої машини $n_{с.н}$, механічна характеристика – лінійно-зростаюча.

Завдання

1. Визначити номінальну кутову швидкість електродвигуна.
2. Визначити номінальний момент електродвигуна.
3. Побудувати графічно механічну характеристику електродвигуна на робочій ділянці при номінальній напрузі.
4. Одержати рівняння цієї механічної характеристики.
5. Записати рівняння механічної характеристики робочої машини.
6. Побудувати графічно механічну характеристику робочої машини на одній площині з механічною характеристикою електродвигуна й указати робочу точку.
7. Скласти рівняння руху системи «електродвигун – робоча машина». Вирішити отримане рівняння щодо кутової швидкості.
8. Визначити значення кутової швидкості системи «електродвигун – робоча машина».
9. Визначити потужність, яку передає електродвигун робочій машині.

**Варіанти вихідних даних до тематичного комплексного
кваліфікаційного завдання**

Таблиця 7.1

Варіанти	Вихідні дані				
	P_n , кВт	n_n , об/хв.	M_0 , Н·м	$M_{оп.н}$, Н·м	$n_{оп.н}$, об/хв.
1	0,75	2850	0,51	2,53	2850
2	1,1	2850	0,56	3,71	2850
3	0,55	1350	0,78	3,89	1350
4	0,75	1350	1,06	5,31	1350
5	0,37	910	0,78	3,88	910
6	0,55	910	1,15	5,77	910
7	1,5	2860	1,0	5,01	2860
8	2,2	2860	1,47	7,35	2860
9	1,1	1400	1,5	7,51	1400
10	1,5	1400	2,05	10,24	1400
11	0,75	930	1,54	7,07	930
12	1,1	930	2,26	11,3	930
13	3	2880	2,0	9,95	2880
14	2,2	1430	2,94	14,7	1430
15	1,5	930	3,08	15,4	930

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

1. Опис експериментальної установки

Експериментальна установка містить трифазний асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором M з двома парами полюсів, який отримує живлення від симетричного трифазного джерела електричної енергії частотою 50 Гц. У силовому колі передбачені: трифазний автоматичний вимикач QF і магнітний пускач KM (для комутації). У колі керування передбачені: плавкий запобіжник FU (для захисту), кнопки «Пуск» $SB1$ і «Стоп» $SB2$ (для керування). Для вимірювання частоти обертання електродвигуна передбачений тахометр.

Принципова електрична схема експериментальної установки наведена на рисунку 1.

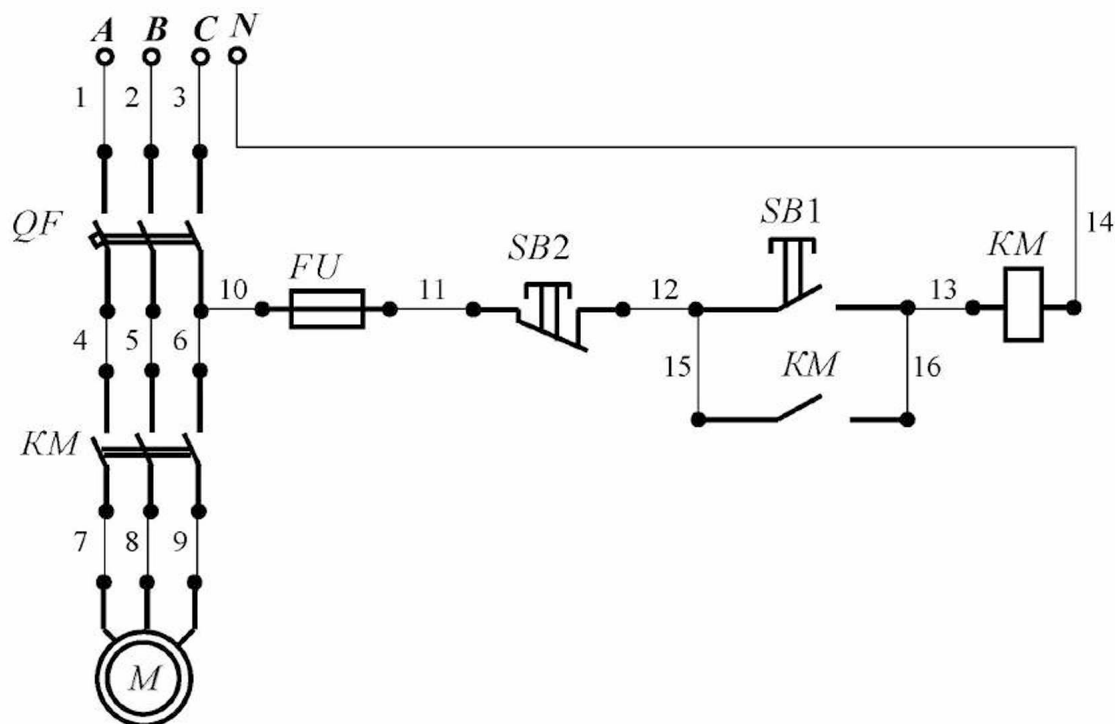


Рисунок 1 - Принципова електрична схема експериментальної установки.

Для складання схеми необхідно мати 16 провідників (на схемі позначені номерами 1-16).

2. Уміння, які здобуваються студентами в результаті виконання експериментального дослідження

- 2.1 Уміти скласти принципову електричну схему кола та зібрати її.
- 2.2 Уміти запустити електродвигун.
- 2.3 Уміти виміряти швидкість обертання електродвигуна за допомогою тахометра.
- 2.4 Уміти зупинити електродвигун, виконати переключення в силовому колі для зміни напрямку обертання електродвигуна.
- 2.5 Уміти визначити абсолютне і відносне ковзання електродвигуна.

3. Завдання з виконання експериментального дослідження

- 3.1 Зібрати схему експериментальної установки.
- 3.2 Визначити синхронну частоту обертання електродвигуна, використовуючи рівняння:

$$n_0 = \frac{60f}{p} .$$

- 3.3 Запустити електродвигун.
- 3.4 Виміряти швидкість обертання n_1 електродвигуна за допомогою тахометра.
- 3.5 Зупинити електродвигун.
- 3.6 Визначити абсолютне ковзання електродвигуна, використовуючи рівняння:

$$\Delta n_1 = n_0 - n_1 .$$

- 3.7 Визначити відносне ковзання електродвигуна, використовуючи рівняння:

$$s_1 = \frac{\Delta n_1}{n_0} .$$

3.8 Виконати переключення в силовому колі для зміни напрямку обертання електродвигуна.

3.9 Запустити електродвигун.

3.10 Виміряти швидкість обертання n_2 електродвигуна за допомогою тахометра.

3.11 Зупинити електродвигун.

3.12 Визначити абсолютне ковзання електродвигуна, використовуючи рівняння:

$$\Delta n_2 = n_0 - n_2 .$$

3.13 Визначити відносне ковзання електродвигуна, використовуючи рівняння:

$$s_2 = \frac{\Delta n_2}{n_0} .$$

3.14 Занести отримані значення в таблицю 1.

Таблиця 1

№ п/п	Фізичні величини, що характеризують установку						
	n_0 , об/хв	n_1 , об/хв	Δn_1 , об/хв	s_1	n_2 , об/хв	Δn_2 , об/хв	s_2
1							

3.15 Порівняти значення ковзання для обох випадків та зробити висновок щодо ковзання у разі зміни напрямку обертання електродвигуна.

4. Структура звіту

4.1 Назва теми експериментального дослідження.

4.2 Принципова електрична схема експериментальної установки.

4.3 Таблиця 1.

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.

Найпростіший трансформатор має наступну конструкцію (рис.8.1):

- магнітопровід з електротехнічної сталі;
- дві обмотки з міді, які розміщуються на магнітопроводі (ізольовані від магнітопроводу та одна від одної).

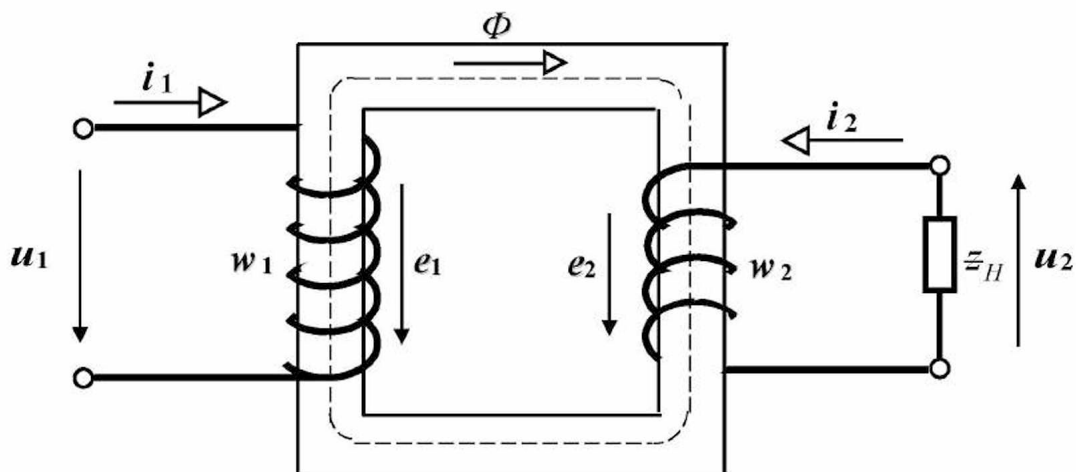


Рис.8.1

Обмотка трансформатора, яка підключається до джерела електроенергії (тобто до мережі), називається *первинною*. Обмотка, до якої підключаються споживачі електроенергії або лінії електропередачі, які ведуть до споживачів, називається *вторинною*.

Частини магнітопроводу, на яких розміщуються обмотки, називаються *стрижнями*, а частини, що замикають стрижні, називаються *ярмами*. Магнітопроводи трансформаторів виконуються двох видів: *стрижневий* та *броньовий*. У стрижневому однофазному трансформаторі первинна і вторинна обмотки розміщуються на двох стрижнях, зв'язаних ярмами. В однофазному броньовому трансформаторі первинна і вторинна обмотки розміщуються на одному стрижні, а магнітопровід охоплює обмотки з двох сторін (як би «бронюючи» їх).

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 трансформаторним маслом, вводи, ізоляція обмоток і магнітопроводу та інше.

Принцип дії трансформатора наступний: до первинної обмотки підводиться змінна напруга u_1 , в результаті чого 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 буде протікати 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 визначити приблизно 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 напругу **660 В**, а вольтметр, включений на затискачі вторинної обмотки, показав напругу **220 В**. Кількість витків первинної обмотки дорівнює **330**.

Визначити коефіцієнт трансформації трансформатора та кількість витків вторинної обмотки.

Рішення.

1. Визначаємо коефіцієнт трансформації трансформатора за (8.2):

$$k_T = \frac{U_1}{U_2} = \frac{660}{220} = 3.$$

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 більше, ніж напруга на затискачах вторинної обмотки, то трансформатор є *понижувальним*, а якщо навпаки, то *підвищувальним*. У понижувальних трансформаторів $w_1 > w_2$ і $k_T > 1$, у підвищувальних трансформаторів $w_1 < w_2$ 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 напругу **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.

Рішення.

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 його вторинна обмотка розімкнена, а на затискачі первинної обмотки подана номінальна напруга, 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 почне 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. Опишіть принцип дії однофазного трансформатора.
6. Що таке коефіцієнт трансформації однофазного трансформатора?
7. Як визначити коефіцієнт трансформації однофазного трансформатора дослідним шляхом?
8. Який однофазний трансформатор називають понижувальним?
9. Який однофазний трансформатор називають підвищувальним?
10. Перелічіть режими роботи однофазного трансформатора.

Завдання для самоконтролю

Однофазний трансформатор має **2200 витків** у первинній обмотці.
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.

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* 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 в первинній обмотці однофазного трансформатора.
2. Перелічіть фізичні явища, які спостерігаються у вторинній обмотці однофазного трансформатора.
3. Перелічіть фізичні явища, які спостерігаються в 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.8.2).

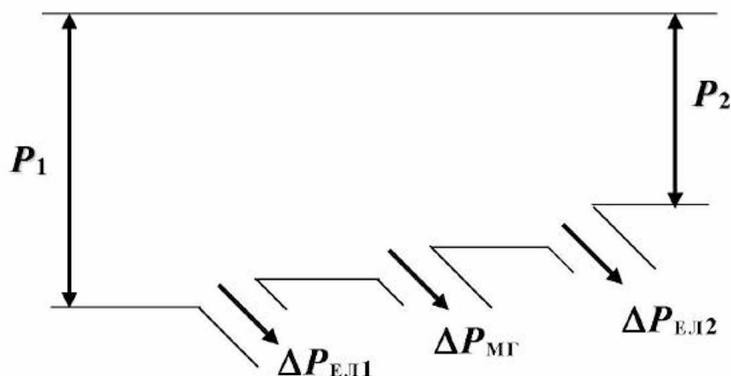


Рис.8.2

На енергетичній діаграмі (рис.8.2) позначено:

P_1 – активна потужність, яку споживає трансформатор, Вт;

$\Delta P_{\text{ЕЛ1}}$ – 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 0,35 – 0,5 мм при частоті струму 50 Гц, листи ізолюють один від одного;

$\Delta P_{\text{эл.2}}$ – 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:

$$\Delta P_{\Sigma} = P_1 - P_2 = \Delta P_{\text{эл.1}} + \Delta P_{\text{мг}} + \Delta P_{\text{эл.2}} . \quad (8.3)$$

Втрати в обмотках трансформатора:

$$\Delta P_{\text{эл.1}} = r_1 I_1^2 , \quad (8.4)$$

$$\Delta P_{\text{эл.2}} = r_2 I_2^2 , \quad (8.5)$$

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:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Delta P_{\Sigma}}{P_1} = 1 - \frac{\Delta P_{\Sigma}}{P_1} . \quad (8.6)$$

Коефіцієнт потужності трансформатора дорівнює:

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{S_1} , \quad (8.7)$$

де P_1 – активна потужність,
яку споживає трансформатор з мережі, *Вт*;
 S_1 – повна потужність,
яку споживає трансформатор з мережі, *В·А*.

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 потужність **4600 Вт**. Вольтметр, включений на затискачі вторинної обмотки, показав напругу **220 В**, а амперметр, включений у вторинне коло, показав силу струму **20 А**.

Визначити коефіцієнт корисної дії трансформатора.

Рішення.

1. Визначаємо коефіцієнт корисної дії трансформатора за (8.6):

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2 I_2}{P_1} = \frac{220 \cdot 20}{4600} = 0,95.$$

Запитання для самоконтролю

1. Складіть енергетичну діаграму однофазного трансформатора з розшифровкою літерних позначень.
2. Як визначити втрати потужності в обмотках однофазного трансформатора?
3. Як визначити сумарні втрати потужності в однофазному трансформаторі?
4. Як впливають втрати потужності в елементах конструкції однофазного трансформатора на його роботу?
5. Як визначити коефіцієнт корисної дії однофазного трансформатора?
6. Як визначити коефіцієнт потужності однофазного трансформатора?

Завдання для самоконтролю

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 В·Ар** і має к.к.д. **90 %**.

1. Визначити коефіцієнт трансформації трансформатора.
2. Визначити напругу на затискачах вторинної обмотки трансформатора.
3. Визначити активну потужність, яку споживає навантаження.
4. Визначити активну потужність, яку споживає трансформатор.
5. Визначити повну потужність, яку споживає трансформатор.
6. Визначити силу струму, який споживає трансформатор з мережі.

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 обмоток, A .

Основним технічним параметром трансформатора є його номінальна повна потужність:

$$S_H = U_{2H} I_{2H} , \quad (8.8)$$

де U_{2H} – номінальна напруга вторинної обмотки, B ;
 I_{2H} – номінальний струм вторинної обмотки, A .

Запитання для самоконтролю

1. Перелічіть номінальні параметри однофазного трансформатора.

8.2 Трифазний силовий трансформатор

Трифазний силовий трансформатор має магнітопровід, який складається з трьох стрижнів, об'єднаних зверху та знизу ярмами. На кожному стрижні розміщені первинна і вторинна обмотки однієї фази. 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 , зсунуті в часі на третину періоду або за фазою на кут 120° . В результаті в первинних обмотках будуть протікати змінні електричні струми i_A, i_B, i_C , зсунуті за фазою на кут 120° . Ці струми приведуть до виникнення магнітних потоків Φ_A, Φ_B, Φ_C , зсунутих за фазою на кут 120° . В іншому принцип дії трифазного трансформатора аналогічний однофазному трансформатору. Тому можна одержати аналогічний результат при використанні трьох однофазних трансформаторів, сумарні габарити і вага яких більше, ніж у трифазного 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, тобто різницю потенціалів між початками фаз відповідних обмоток.

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 в однофазного трансформатора.

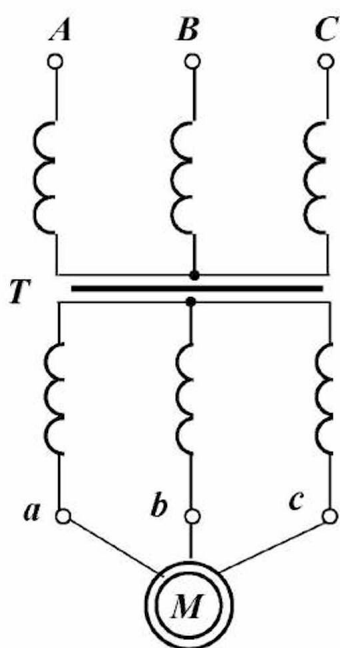


Рис.8.3

Технічні параметри трифазних трансформаторів аналогічні однофазним трансформаторам. Тип трансформатора, наприклад, *ТМ-100/10/0,4* розшифровується в такий спосіб: трансформатор трифазний масляний потужністю 100 *кВ·А* з номінальною первинною напругою 10 *кВ* і номінальною вторинною напругою 0,4 *кВ* (напруги лінійні).

Принципова електрична схема підключення електродвигуна до трифазного силового трансформатора показана на рис.8.3.

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. Перелічіть фізичні явища, які спостерігаються в елементах конструкції трифазного силового трансформатора при його роботі.
5. Складіть енергетичну діаграму трифазного силового трансформатора з розшифровкою літерних позначень.
6. Перелічіть номінальні параметри трифазного силового трансформатора.
7. Приведіть зображення трифазного силового трансформатора на принциповій електричній схемі.

8.3 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. Будова цього трансформатора не відрізняється від будови силового трансформатора. Вимірювальні трансформатори напруги вико-

нуються 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 дорівнює:

$$k_{Т.Н} = \frac{U_{1Н}}{U_{2Н}}, \quad (8.9)$$

де $U_{1Н}$ – номінальна напруга первинної обмотки, В;
 $U_{2Н}$ – номінальна напруга вторинної обмотки, В.

Показання вимірювальних приладів, включених у вторинне коло трансформатора, необхідно множити на коефіцієнт трансформації. При підключенні цих приладів треба враховувати, що їх сумарна потужність не повинна перевищувати 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 В·А до 2000 В·А.

Для безпечного обслуговування вторинна обмотка і корпус вимірювального трансформатора напруги заземлюються, щоб охоронити персонал при пробі ізоляції первинної обмотки (обмотки високої напруги).

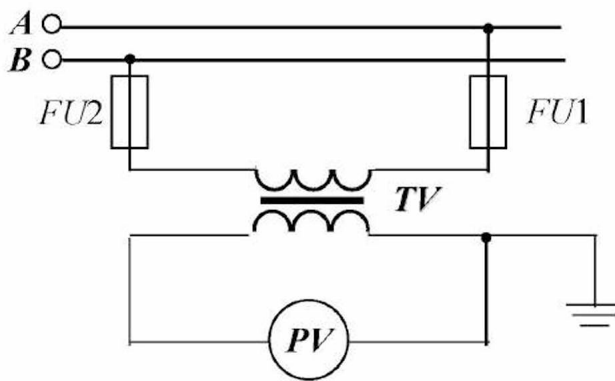


Рис.8.4

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.8.4.

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?

8.4 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. 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 A до 15 kA , а вторинна обмотка – на струм 5 A , тобто у вторинній обмотці завжди протікає струм силою 5 A . Первинна обмотка трансформатора включається послідовно в коло, у якому протікає вимірюваний струм, а вторинна обмотка замикається через вимірювальні прилади. Отже, трансформатор працює фактично в режимі короткого замикання, тому що струмові обмотки вимірювальних приладів мають незначні опори.

Коефіцієнт трансформації вимірювального трансформатора струму дорівнює:

$$k_{\text{т.с}} = \frac{I_{1\text{H}}}{I_{2\text{H}}}, \quad (8.10)$$

де $I_{1\text{H}}$ – номінальний струм первинної обмотки, A ;
 $I_{2\text{H}}$ – номінальний струм вторинної обмотки, A .

Показання вимірювальних приладів, включених у вторинне коло трансформатора, необхідно множити на коефіцієнт трансформації.

Магнітопровід трансформатора розрахований на незначний магнітний потік, тому велике збільшення потоку приведе до перегріву магнітопроводу і виходу його з ладу. При холостому ході трансформатора (тобто при розмиканні вторинної обмотки) магнітопровід буде недопустимо 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.

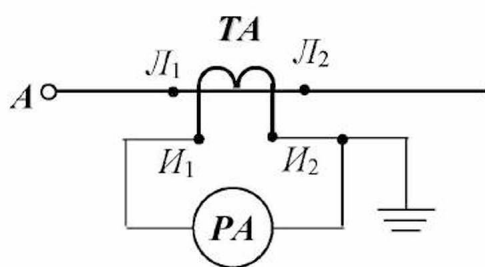


Рис.8.5

Принципова електрична схема включення амперметра у високовольтну мережу за допомогою вимірювального трансформатора струму показана на рис.8.5. Позначення на принциповій електричній схемі: затискачі первинної обмотки $L_1 - L_2$, затискачі вторинної обмотки: $I_1 - I_2$.

Приклад 8.4

Лічильник враховує споживання електроенергії цехом переробки молока, він включений через вимірювальні трансформатори напруги і струму. Коефіцієнт трансформації трансформатора напруги дорівнює **20**, а трансформатора струму дорівнює **5**. Показання лічильника за місяць склали **500 кВт·год**.

Визначити кількість електроенергії, яку спожив цех за місяць.

Рішення.

1. Визначаємо кількість електроенергії, яку спожив цех за місяць:

$$W = \Delta W \cdot k_{Т.Н} \cdot k_{Т.С} = 500 \cdot 20 \cdot 5 = 50000 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

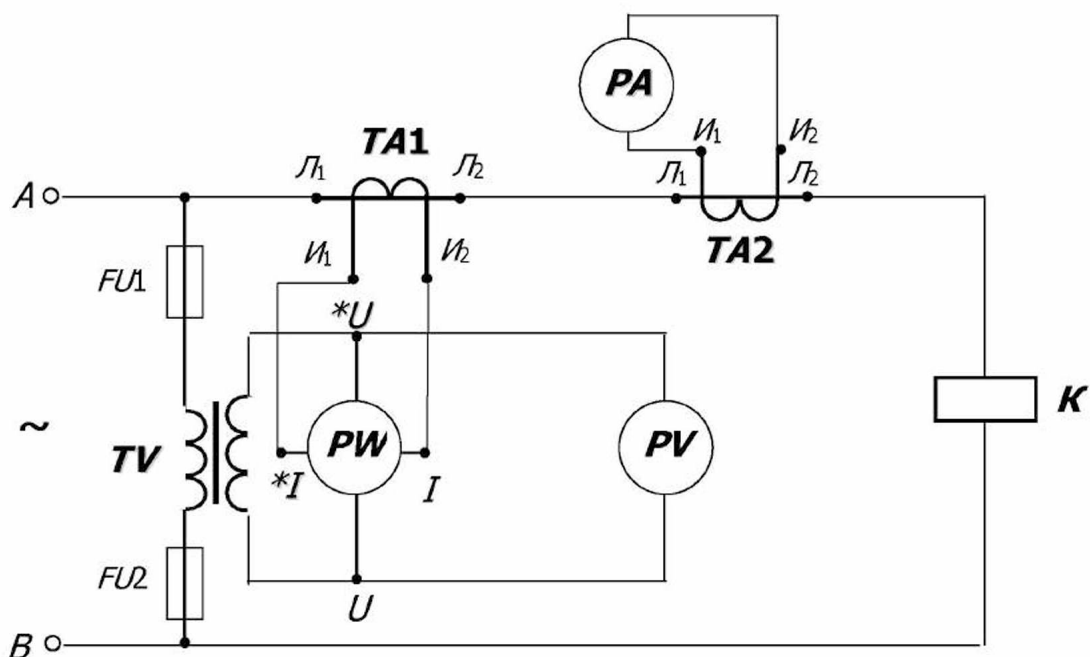
Запитання для самоконтролю

1. Для чого призначений вимірювальний трансформатор струму?
2. У якому режимі працює вимірювальний трансформатор струму?
3. Як визначити коефіцієнт трансформації вимірювального трансформатора струму?
4. Складіть і опишіть принципову електричну схему включення амперметра у високовольтну мережу за допомогою вимірювального трансформатора струму.
5. Як враховується коефіцієнт трансформації вимірювального трансформатора струму при вимірюваннях?

Завдання для самоконтролю

Принципова електрична схема включення високовольтного навантаження в мережу показана на рисунку. 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 відхилилася на **80 поділок**, стрілка вольтметра відхилилася на **90 поділок**, стрілка ватметра відхилилася на **40 поділок**.



1. Визначити ціну поділки амперметра.
2. Визначити ціну поділки вольтметра.
3. Визначити ціну поділки ватметра.
4. Визначити коефіцієнти трансформації вимірювальних трансформаторів струму.
5. Визначити коефіцієнт трансформації вимірювального трансформатора напруги.
6. Визначити силу струму, який споживає навантаження.
7. Визначити напругу на затискачах навантаження.
8. Визначити повну потужність, яку споживає навантаження.
9. Визначити активну потужність, яку споживає навантаження.
10. Визначити реактивну потужність, яку споживає навантаження.
11. Визначити коефіцієнт потужності навантаження.

8.5 Автотрансформатор

Автотрансформатор складається з магнітопроводу, на якому розміщена одна фазна обмотка, 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 (з кількістю витків w_2). Розглянемо принцип дії автотрансформатора на його конструктивній схемі (рис.8.6).

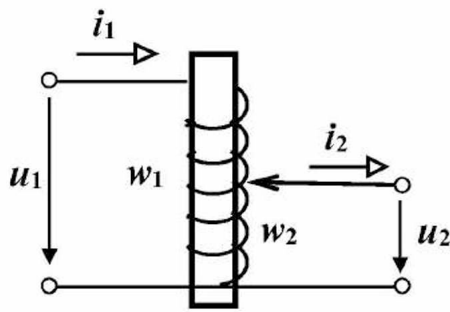


Рис.8.6

До первинного кола трансформатора підводиться змінна напруга u_1 , причому на один виток обмотки приходится напруга u_1/w_1 . Тоді напруга, яка знімається з затискачів вторинного кола трансформатора, буде дорівнювати:

$$U_2 = \frac{U_1}{w_1} w_2. \quad (8.11)$$

Таким чином, чим більше витків буде у вторинній обмотці, тим більше буде напруга на її затискачах, і навпаки. Плавне регулювання напруги на затискачах вторинної напруги здійснюється шляхом переміщення повзунка, приєднаного до затискача вторинної обмотки.

Перетворивши вираз (8.11), знаходимо коефіцієнт трансформації автотрансформатора:

$$k_T = \frac{w_1}{w_2} = \frac{U_{1H}}{U_{2H}}, \quad (8.12)$$

де U_{1H} – номінальна напруга первинного кола, В;
 U_{2H} – номінальна напруга вторинного кола, В.

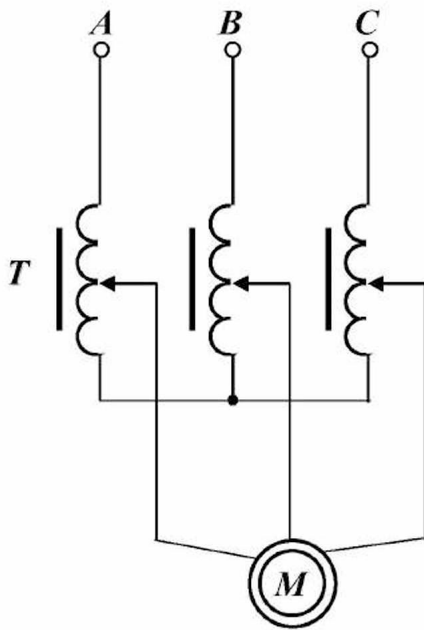


Рис.8.7

Автотрансформатори випускають однофазні та трифазні, підвищувальні та понижувальні. Коефіцієнт трансформації автотрансформаторів знаходиться в межах від 0,5 до 2, при іншому коефіцієнті трансформації автотрансформатор не має переваги в порівнянні із силовим трансформатором. Автотрансформатори використовуються для зниження напруги на затискачах електродвигуна при пуску, для східчастого регулювання напруги електричних печей, у лабораторній практиці та для інших цілей. Принципова електрична схема підключення електродвигуна до живильної мережі через автотрансформатор показана на рис.8.7.

Приклад 8.5

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.

Рішення.

1. Визначаємо пусковий момент електродвигуна при пуску за допомогою автотрансформатора у відповідності до (7.12) і (8.12):

$$M'_n = \frac{M_n}{k_T^2} = \frac{40}{2^2} = \frac{40}{4} = 10 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Запитання для самоконтролю

1. Складіть і опишіть конструктивну схему автотрансформатора.
2. Опишіть принцип дії автотрансформатора.
3. Для чого використовуються автотрансформатори?
4. Приведіть зображення автотрансформатора на принциповій електричній схемі.

Завдання для самоконтролю

Пуск асинхронного електродвигуна здійснюють за допомогою автотрансформатора, у якого коефіцієнт трансформації для даного випадку дорівнює **1,5**. При прямому пуску електродвигуна його пусковий момент дорівнює **20 Н·м**.

1. Визначити пусковий момент електродвигуна при пуску за допомогою автотрансформатора.

8.6 Зварювальний трансформатор

Зварювальний трансформатор призначений для електродугового зварювання і являє собою понижувальний трансформатор, 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 стійкого горіння електричної дуги. Зварювальний трансформатор працює в режимі, близькому до короткого замикання, тому що опір електричної дуги незначний. Тому у вторинне коло трансформатора послідовно включають індукційний регулятор струму (дросьель), який має великий індуктивний опір. Він складається з розсувного магнітопроводу та обмотки, яка може розмі-

щуватися 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 (рис.8.8).

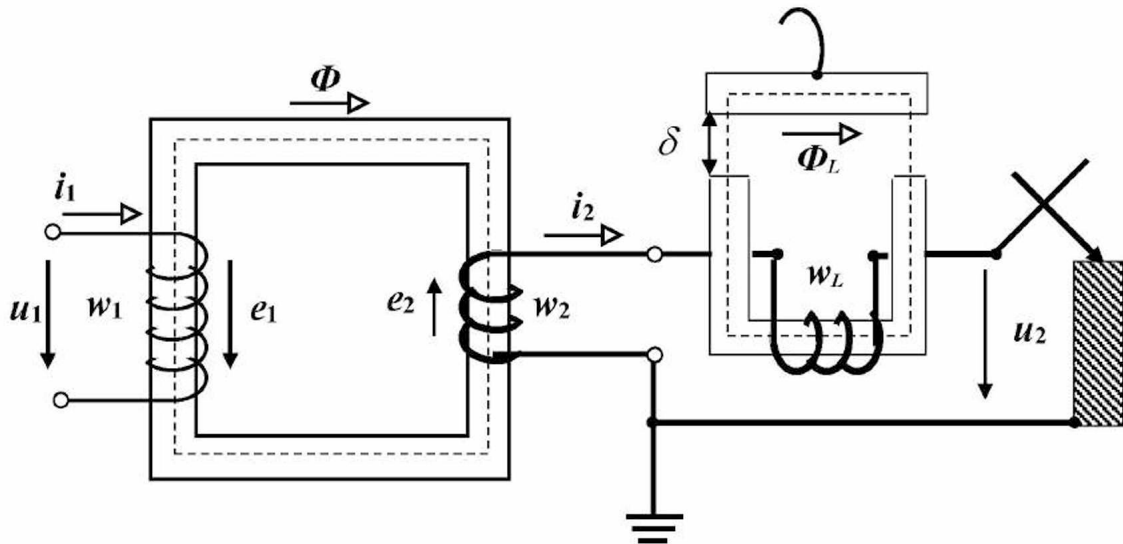


Рис.8.8

Якщо на затискачі первинного кола подана змінна напруга u_1 , а електрод не торкається деталі, то трансформатор працює в режимі холостого ходу (тобто на затискачах вторинного кола напруга дорівнює $65\text{ В} - 70\text{ В}$). 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 зварений шов. Для безпечного обслуговування трансформатора його вторинне коло заземлюється.

Залежність напруги на затискачах вторинного кола від сили струму в ній називають *зовнішньою характеристикою трансформатора*. Сімейство зовнішніх характеристик зварювального трансформатора при зміні індуктивного опору дроселя показані на рис.8.9. Якщо в 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).

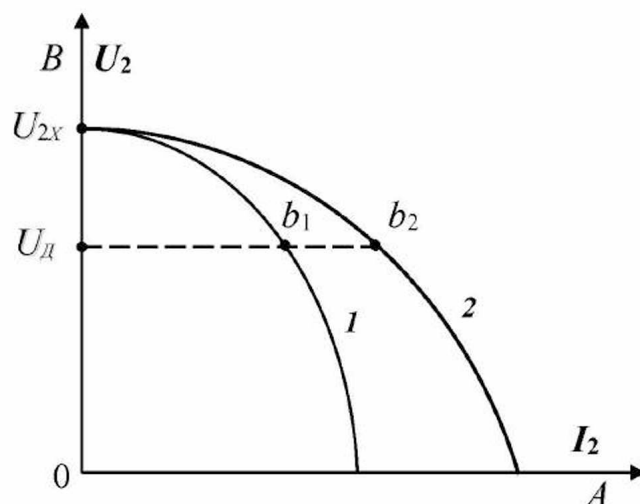


Рис.8.9

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 встановити силу зварювального струму.

Запитання для самоконтролю

1. Складіть і опишіть конструктивну схему зварювального трансформатора.
2. Опишіть принцип дії зварювального трансформатора.

8.7 Основи електропостачання

Основні елементи системи 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: генератори електроста-

нцій, розподільчі пристрої, трансформаторні підстанції, лінії електропередачі та споживачі електроенергії. 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:

$$\Delta P_{\text{л}} = r_{\text{л}} I_{\text{л}}^2, \quad (8.13)$$

де $\Delta P_{\text{л}}$ – втрати потужності в одному проводі лінії електропередачі, *Вт*;

$r_{\text{л}}$ – активний опір одного проводу лінії електропередачі, *Ом*;

$I_{\text{л}}$ – діюче значення сили струму, який протікає в одному проводі лінії електропередачі, *А*.

Активний опір проводу лінії дорівнює:

$$r_{\text{л}} = \rho \frac{l}{S}, \quad (8.14)$$

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:

$$I_{\text{л}} = \frac{P}{U}, \quad (8.15)$$

де P – активна потужність однієї фази еквівалентного споживача, *Вт*;

U – діюче значення фазної напруги еквівалентного споживача, *В*.

Підставивши (8.14) і (8.15) у (8.13), одержимо:

$$\Delta P_{\text{л}} = \rho \frac{l}{S} \cdot \frac{P^2}{U^2}. \quad (8.16)$$

З виразу (8.16) випливає, що знизити втрати потужності в проводах лінії електропередачі можна трьома способами:

- 1) використанням проводів, виготовлених з матеріалу з низьким питомим опором (алюміній, мідь), що призводить до подорожчання лінії;

- 2) використанням проводів більшого перерізу, що призводить до подорожчання лінії;
- 3) збільшенням напруги – призводить до значного зниження втрат потужності, тому що вони обернено пропорційні квадрату напруги.

Приклад 8.6

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 в скільки разів знизилися втрати активної потужності в лінії.

Рішення.

1. Визначаємо в скільки разів знизилися втрати активної потужності в лінії на підставі (8.16):

$$\frac{\Delta P_{п2}}{\Delta P_{п1}} = \left(\frac{U_2}{U_1} \right)^2 = \left(\frac{380}{220} \right)^2 = 3 \text{ рази.}$$

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 живильних 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 в складі: генератор – підвищувальна трансформаторна підстанція – високовольтна лінія електропередачі – живильна трансформаторна підстанція – високовольтна лінія 330 кВ – районна трансформаторна підстанція – високовольтна лінія 10 кВ – споживча трансформаторна підстанція – лінія електропередачі 0,4 кВ – споживачі електричної енергії (двигун *M*, нагрівальна установка *HV*, освітлювальна установка *OV*), представлена на рис.8.10.

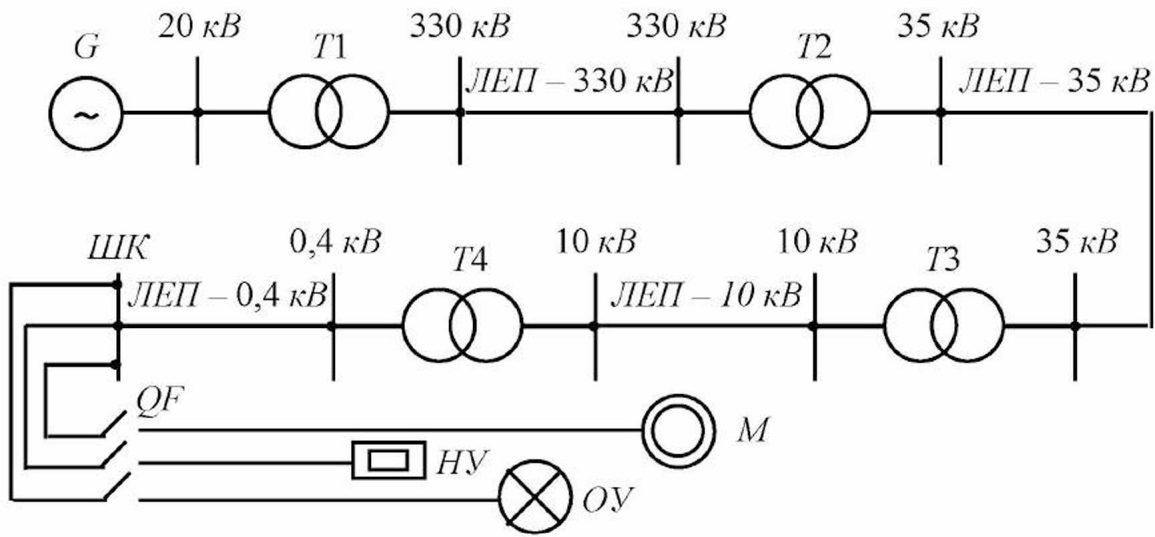


Рис.8.10

Для з'єднання внутрішньої проводки з зовнішньою лінією електропередачі використовують повітряне введення, яке представляє собою відгалуження від лінії електропередачі низької напруги. Виконується голим проводом і підходить до стіни, де закріплюється за допомогою ізоляторів. Від повітряного введення крізь стіну усередину приміщення прокладається введення з ізолюваного проводу. Усередині приміщення в місці уведення встановлюють розподільчий щит, до якого підключають внутрішню електропроводку. Цей щит містить апаратуру захисту, лічильники електроенергії та інше.

Усередині приміщень електричну проводку виконують 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. Як визначити втрати потужності в лінії електропередачі?
4. Від чого залежать втрати потужності в лінії електропередачі?
5. Як знизити втрати потужності в лінії електропередачі?
6. Яке призначення підвищуючих трансформаторних підстанцій?
7. Яке призначення понижуючих трансформаторних підстанцій?
8. Приведіть приклад однолінійної схеми трифазної енергосистеми в складі: генератор – трансформатор 20/330 кВ – лінія електропередачі 330 кВ – трансформатор 330/35 кВ – лінія електропередачі 35 кВ – трансформатор 35/10 кВ – лінія електропередачі 10 кВ – трансформатор 10/0,4 кВ – лінія 0,4 кВ – споживач електричної енергії, опишіть її роботу.
9. Як знизити втрати потужності в низьковольтній лінії електропередачі?

Типи електростанцій

Відповідно до джерел первинної енергії електростанції класифікуються наступним чином:

1. *Теплові електростанції* – енергія палива, яка 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 %). *Теплоелектроцентралі* – поєднані процеси вироблення теплової та електричної енергії, використовуються для тепло та електропостачання (к.к.д. досягає 70 %).

2. *Атомні електростанції* – енергія, яка виділяється при ланцюговій реакції розподілу ядер урану в реакторі, перетворюється в пару і далі процес відбувається аналогічно тепловим електростанціям.

3. *Гідравлічні електростанції* – енергія потоку води перетворюється в механічну енергію обертання турбіни генератора, яка у генераторі перетворюється в електричну енергію (к.к.д. досягає 90 %). Для одержання 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* – енергія дизельного пального, яке згоряє в циліндрах двигуна, перетворюється в механічну енергію на його валу. У генераторі, який знаходиться на тому же валу, механічна енергія перетворюється в електричну енергію (к.к.д. становить близько 35 %).

5. *Вітрові електростанції* – енергія вітрового потоку перетворюється за допомогою вітроколеса в механічну енергію обертання вала генератора, яка у генераторі перетворюється в електричну енергію.

6. *Сонячні електростанції* – 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. Деякі інші види енергії поки ще не використовуються, наприклад, енергії блискавок, потужність яких одноразово становить 10¹⁰ кВт.

Запитання для самоконтролю

1. Перелічіть типи електростанцій, указавши види енергії, які вони перетворюють.

ТЕМАТИЧНЕ КОМПЛЕКСНЕ КВАЛІФІКАЦІЙНЕ ЗАВДАННЯ

Умова

Споживча трансформаторна підстанція живиться лінійною напругою **10 кВ**. Схема з'єднання первинних обмоток трифазного трансформатора – «зірка». Схема з'єднання вторинних обмоток трифазного трансформатора – «зірка з виведеним нулем». Лінійна напруга на вторинній стороні трансформатора **380 В**. Первинні обмотки трансформатора живляться через роз'єднувач і плавкі запобіжники. На вторинній стороні трансформатора встановлені автоматичний вимикач і три трансформатори струму. Напруга подається на збірні шини. Через автоматичний вимикач і магнітний пускач живиться трифазний електродвигун насосної станції. Через інший автоматичний вимикач живиться шість освітлювальних ламп насосної станції – по дві лампи на кожну фазу. Технічні дані електродвигуна: номінальна потужність $P_{2н}$, номінальний к.к.д. η_n , номінальний коефіцієнт потужності $\cos \varphi_n$, номінальна фазна напруга **220 В**, схема з'єднання – **У**. Технічні дані освітлювальної лампи: номінальна потужність P_n , номінальна напруга **220 В**. Для вимірювання сил струмів передбачені амперметри, включені у вторинні обмотки трансформаторів струму. Для вимірювання фазних напруг передбачені три вольтметри.

Завдання

1. Скласти принципову електричну схему описаного трифазного кола.
2. Визначити активну потужність, споживану електродвигуном.
3. Визначити реактивну потужність, споживану електродвигуном.
4. Визначити активну потужність, споживану освітлювальними лампами.
5. Визначити сумарну активну потужність, споживану електродвигуном і лампами.
6. Визначити повну потужність, споживану електродвигуном і лампами.
7. Визначити коефіцієнт потужності всього навантаження.
8. Вибрати потужність трансформатора.
9. Визначити лінійний (фазний) струм трансформатора на вторинній стороні.

**Варіанти вихідних даних до тематичного комплексного
кваліфікаційного завдання**

Таблиця 8.1

Варіанти	Вихідні дані			
	$P_{2H},$ кВт	$\cos \varphi_H$	η_H	$P_H,$ кВт
1	0,75	0,88	0,79	1,5
2	1,1	0,87	0,815	1,0
3	0,55	0,88	0,84	0,8
4	0,75	0,88	0,855	0,4
5	0,37	0,89	0,870	0,6
6	0,55	0,89	0,875	0,8
7	1,5	0,9	0,875	1,0
8	2,2	0,76	0,885	1,2
9	1,1	0,79	0,740	1,5
10	1,5	0,82	0,785	1,0
11	0,75	0,84	0,815	0,8
12	1,1	0,86	0,835	0,6
13	3	0,88	0,855	0,4
14	2,2	0,88	0,870	0,5
15	1,5	0,72	0,870	0,8

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

1. Опис експериментальної установки

Експериментальна установка містить однофазний трансформатор T , для якого відома кількість витків первинної обмотки w_1 , джерело однофазної змінної напруги частотою 50 Гц і реостат навантаження PH . У первинному колі трансформатора для захисту і комутації передбачений однофазний автоматичний вимикач SF . У вторинному колі трансформатора для комутації передбачений вимикач SA . Для вимірювання напруги передбачений вольтметр зі щупами PV .

Принципова електрична схема експериментальної установки наведена на рисунку 1.

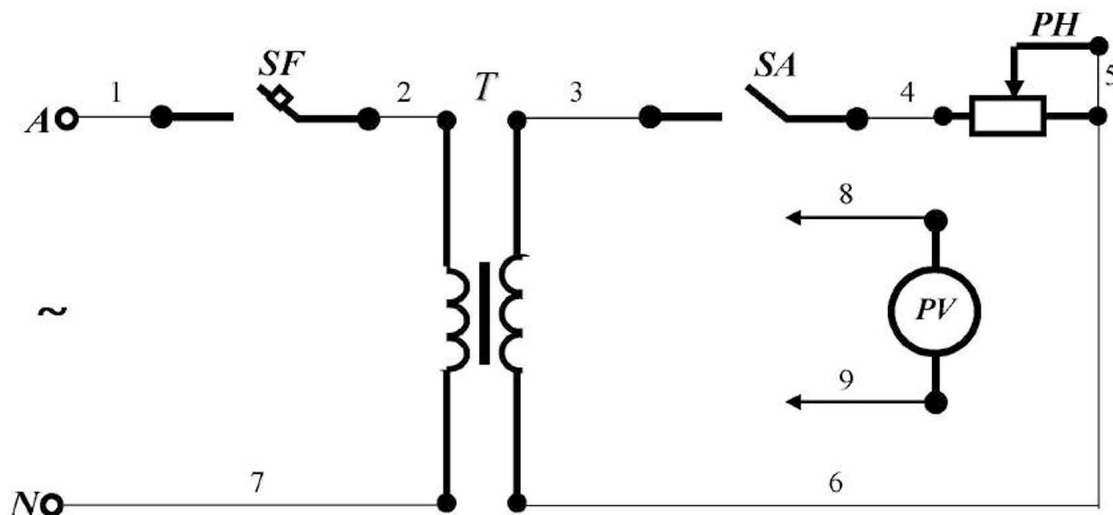


Рисунок 1 - Принципова електрична схема експериментальної установки.

Для складання схеми необхідно мати 9 провідників (на схемі позначені номерами 1-9).

2. Уміння, які здобуваються студентами в результаті виконання експериментального дослідження

2.1 Уміти скласти принципову електричну схему кола та зібрати її.

- 2.2 Уміти включити трансформатор на холостому ході.
- 2.3 Уміти виміряти напруги на затискачах первинної і вторинної обмоток.
- 2.4 Уміти виключити трансформатор і підключити до нього навантаження.
- 2.5 Уміти включити трансформатор у режимі навантаження.
- 2.6 Уміти визначити коефіцієнт трансформації трансформатора.
- 2.7 Уміти визначити кількість витків вторинної обмотки трансформатора.
- 2.8 Уміти визначити втрату напруги у вторинній обмотці трансформатора в режимі навантаження.

3. Завдання з виконання експериментального дослідження

- 3.1 Зібрати схему експериментальної установки.
- 3.2 Включити трансформатор на холостому ході (вимикач SF замкнений, вимикач SA розімкнений).
- 3.3 Виміряти напруги на затискачах первинної і вторинної обмоток ($U_{1X.X}$, $U_{2X.X}$).
- 3.4 Виключити трансформатор (розімкнути вимикач SF).
- 3.5 Підключити до трансформатора навантаження (замкнути вимикач SA , а реостат PH виставити у середнє положення).
- 3.6 Включити трансформатор у режимі навантаження (замкнути вимикач SF).
- 3.7 Виміряти напруги на затискачах первинної і вторинної обмоток ($U_{1НАВ}$, $U_{2НАВ}$).
- 3.8 Виключити трансформатор (розімкнути вимикач SF).
- 3.9 Визначити коефіцієнт трансформації трансформатора, використовуючи рівняння:

$$k_T = \frac{U_{1X.X}}{U_{2X.X}}$$

3.10 Визначити кількість витків вторинної обмотки трансформатора, використовуючи рівняння:

$$k_T = \frac{w_1}{w_2}.$$

3.11 Визначити втрату напруги у вторинній обмотці трансформатора в режимі навантаження, використовуючи рівняння:

$$\Delta U_2 = U_{2X.X} - U_{2НАВ}.$$

3.12 Занести отримані значення в таблицю 1.

Таблиця 1

№ п/п	Фізичні величини, що характеризують установку						
	w_1	$U_{1X.X}, B$	$U_{2X.X}, B$	$U_{1НАВ}, B$	$U_{2НАВ}, B$	k_T	w_2
1							

4. Структура звіту

4.1 Назва теми експериментального дослідження.

4.2 Принципова електрична схема експериментальної установки.

4.3 Таблиця 1.

Тема 9 ЕЛЕКТРОВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ. ТЕХНІКА ЕЛЕКТРИЧНИХ ВИМІРЮВАНЬ

9.1 Загальні відомості про електровимірювальні прилади

Електровимірювальні прилади призначені для перетворення різних електричних величин (сили струму, напруги, активних і реактивних потужностей та енергій, коефіцієнта потужності, опору, індуктивності, ємності та інших) у візуальну форму, зручну для сприйняття.

Електровимірювальний прилад складається з вимірювального механізму, який поміщений у корпус, та допоміжних частин (затискачі для підключення, перемикачі меж вимірювань, блок живлення, коректор та інші). Вимірювальний механізм складається з рухомої і нерухомої частин, та має шкалу з певною кількістю поділок.

Принцип дії вимірювального механізму може бути заснований на явищі електромагнетизму, електромагнітної сили або теплової дії струму. В результаті цих явищ виникає обертаючий момент, який повертає рухому частину вимірювального механізму разом з покажчиком (стрілкою). Стрілка відхиляється на кут, прямо пропорційний значенню вимірюваної фізичної величини. В протидію обертаючому моменту (електромагнітним або механічним шляхом) створюється рівний та протидіючий момент, тому що інакше стрілка буде відхилитися до кінця шкали при будь-якому значенні вимірюваної величини (відмінної від нуля).

Електровимірювальні прилади характеризуються наступними величинами:

1. *Межа вимірювання* – найбільше значення фізичної величини, яке можна вимірити приладом.
2. *Ціна поділки* – кількість одиниць вимірюваної фізичної величини в одній поділці шкали приладу:

$$C_{\Pi} = \frac{A_{\text{MAX}}}{n_{\text{MAX}}}, \quad (9.1)$$

де C_{Π} – ціна поділки приладу;
 A_{MAX} – межа вимірювання приладу;
 n_{MAX} – кількість поділок на шкалі приладу.

3. *Чутливість* – кількість поділок шкали, на яку відхиляється стрілка приладу при зміні вимірюваної фізичної величини на одну одиницю:

$$C = \frac{n_{\text{MAX}}}{A_{\text{MAX}}} = \frac{1}{C_{\text{П}}} . \quad (9.2)$$

4. *Показання приладу* – значення фізичної величини, яке вимірює прилад (визначається як добуток ціни поділки приладу на кількість поділок, на яке відхилилася стрілка приладу при вимірюванні):

$$A = C_{\text{П}} n , \quad (9.3)$$

- де A – показання приладу;
 n – кількість поділок,
на яке відхилилася стрілка приладу при вимірюванні.

5. *Абсолютна похибка* – різниця між показанням приладу та дійсним значенням вимірюваної фізичної величини:

$$\Delta = A - A_{\text{д}} , \quad (9.4)$$

- де Δ – абсолютна похибка;
 A – показання приладу;
 $A_{\text{д}}$ – дійсне значення вимірюваної фізичної величини.

6. *Відносна похибка* – відношення абсолютної похибки до дійсного значення вимірюваної фізичної величини (виражене у відсотках):

$$\delta = \frac{\Delta}{A_{\text{д}}} \cdot 100 . \quad (9.5)$$

7. *Приведена похибка* – відношення абсолютної похибки до межі вимірювання приладу (виражене у відсотках):

$$\gamma = \frac{\Delta}{A_{\text{MAX}}} \cdot 100 . \quad (9.6)$$

8. *Клас точності* – відношення максимальної абсолютної похибки (встановлюваної при проектуванні приладу) до межі вимірювання приладу (виражене у відсотках):

$$\varepsilon = \frac{\Delta_{\text{MAX}}}{A_{\text{MAX}}} \cdot 100 . \quad (9.7)$$

Для зменшення похибки вимірювання необхідно вибирати межу вимірювання приладу так, щоб його показання знаходилося на останній третині шкали приладу:

$$\frac{2}{3} A_{\text{MAX}} \leq A \leq A_{\text{MAX}} . \quad (9.8)$$

При роботі електровимірювальний прилад повинний споживати мінімально можливу потужність, щоб не змінювати режим роботи контрольного об'єкта.

Запитання для самоконтролю

1. Для чого призначені електровимірювальні прилади?
2. Опишіть будову і принцип дії стрілочного електровимірювального приладу.
3. Перелічіть основні величини, якими характеризується електровимірювальний прилад.
4. Що розуміється під межею вимірювання приладу?
5. Як визначити ціну поділки приладу?
6. Як визначити чутливість приладу?
7. Що розуміється під показанням приладу?
8. Як визначити абсолютну похибку приладу?
9. Як визначити відносну похибку приладу?
10. Що розуміється під приведеною похибкою приладу?
11. Що розуміється під класом точності приладу?

9.2 Класифікація електровимірювальних приладів

Для вимірювання електричних величин найбільш частіше застосовуються наступні прилади:

сили струму	–	<i>амперметр;</i>
напруги	–	<i>вольтметр;</i>
потужності	–	<i>ватметр;</i>
електроенергії	–	<i>електричний лічильник;</i>
коефіцієнта потужності	–	<i>фазометр;</i>
опору	–	<i>омметр, вимірювальний міст;</i>
частоти	–	<i>частотомір.</i>

Електровимірювальні прилади розрізняються за наступними ознаками: вимірювана фізична величина; рід струму; клас точності; принцип дії; спосіб відліку та характер шкали; характер застосування й установки, та іншим.

За родом струму прилади поділяються так:

- прилади, призначені для вимірювання на постійному струмі;
- прилади, призначені для вимірювання на змінному струмі;
- прилади, призначені для вимірювання на постійному і змінному струмі.

Існують вісім класів точності приладів:
0,05 ; 0,1 ; 0,2 ; 0,5 ; 1,0 ; 1,5 ; 2,5 ; 4,0 .

За принципом дії прилади підрозділяються так: магнітоелектричні, електромагнітні, електродинамічні, індукційні, термоелектричні, випрямні та інші.

За способом відліку прилади можуть бути такими, що показують (з безпосереднім відліком по шкалі) та такими, що реєструють (самописи, осцилографи). Шкала приладів, що показують, може бути рівномірною (всі поділки однакові) та нерівномірною (не всі поділки однакові); більш точне вимірювання здійснюється за допомогою рівномірної шкали.

За характером застосування прилади підрозділяються так: стаціонарні (встановлювані на одному місці), переносні, транспортні (для мобільних установок). Встановлювати прилади можна вертикально (як правило, щитові прилади), горизонтально та під кутом до горизонталі.

Вибір електровимірювального приладу здійснюється в такий спосіб:

- 1) визначається вимірювана фізична величина та прилад для вимірювань (сила струму – амперметр, напруга – вольтметр, потужність – ватметр і так далі);
- 2) визначається рід струму в колі (постійний, змінний);
- 3) визначається необхідний клас точності приладу;
- 4) визначається характер застосування й установки;
- 5) визначається система приладу (магнітоелектрична, електромагнітна і так далі);
- 6) визначається межа вимірювання приладу;
- 7) визначається ціна поділки приладу.

Запитання для самоконтролю

1. Перелічіть основні прилади, які найбільш частіше застосовуються для електричних вимірювань.
2. Як класифікуються електровимірювальні прилади?
3. Як здійснюється вибір електровимірювального приладу?

9.3 Будови та принципи дії електровимірювальних приладів різних систем

Вимірювальний механізм приладу *магнітоелектричної системи* складається з постійного магніту, який має підковоподібну форму. У середині магніту знаходиться котушка індуктивності, зв'язана зі стрілкою при-

ладу. При протіканні електричного струму в провідниках котушки спостерігається явище електромагнітної сили. В результаті котушка, укріплена на осі, повертається на кут, пропорційний значенню вимірюваної величини. Разом з котушкою відхиляється стрілка приладу, вказуючи на шкалі значення вимірюваної величини. Прилади цієї системи застосовуються для вимірювань у колах постійного струму.

Вимірювальний механізм приладу *електромагнітної системи* складається з котушки індуктивності з рухомим магнітопроводом, який зв'язаний зі стрілкою приладу. При протіканні електричного струму в провідниках котушки спостерігається явище електромагнетизму. В результаті магнітопровід втягується в котушку пропорційно значенню вимірюваної величини, а стрілка приладу відхиляється, вказуючи на шкалі значення вимірюваної величини. Прилади цієї системи застосовуються для вимірювань у колах постійного та змінного струмів.

Вимірювальний механізм приладу *електродинамічної системи* складається з двох котушок індуктивності (рухомої та нерухомої). При протіканні електричного струму в провідниках котушок спостерігається явище електромагнітної сили. В результаті рухома котушка (яка знаходиться усередині нерухомої котушки) відхиляється на кут, пропорційний значенню вимірюваної величини. Разом з цією котушкою відхиляється стрілка приладу, вказуючи на шкалі значення вимірюваної величини. Прилади цієї системи застосовуються для вимірювань у колах постійного та змінного струмів.

Вимірювальний механізм приладу *індукційної системи* складається з двох нерухомих котушок індуктивності (зсунутих у просторі на кут 90° одна до одної) та рухомої металевої частини (диска, циліндра), яка розміщується між котушками. Одну котушку включають паралельно мережі, а іншу послідовно. Струми, що протікають у котушках, створюють два магнітних потоки, які пронизують рухому металеву частину і наводять у ній вихрові електрорушійні сили. Під дією наведених вихрових е.р.с. у рухомій частині будуть протікати вихрові струми, тобто рухома частина зі струмом знаходиться в магнітному полі котушок. В результаті спостерігається явище електромагнітної сили, і рухома частина (диск, циліндр) приходить в обертання. Прилади цієї системи застосовують, як правило, для вимірювання потужності та енергії в колах змінного струму.

Прилад *термоелектричної системи* являє собою сукупність приладу магнітоелектричної системи і термопари (двох різнорідних металів: мідь – константан, залізо – константан та інших). Два кінці металевих провідників, з яких складається термопара, з'єднані у загальний вузол. До цього вузла приєднаний провідник, по якому проходить вимірюваний електричний струм. В результаті теплової дії струму загальний вузол нагрівається й у ньому наводиться постійна електрорушійна сила (яку називають термо-е.р.с.), незалежно від роду струму. До двох інших кінців металевих провідників, з яких складається термопара, підключений вимірювальний механізм магнітоелектричної системи. При виникненні термо-е.р.с. у котушці вимірювального механізму протікає постійний струм. При протіканні електричного струму в провідниках котушки спостерігається явище електромагнітної сили. В результаті котушка, а разом з нею і стрілка приладу відхиляються, вказуючи на шкалі значення вимірюваної величини. Прилади цієї системи застосовуються для вимірювань у колах постійного та змінного струмів.

Прилад *випрямної системи* являє собою сукупність приладу магнітоелектричної системи й одного або декількох напівпровідникових випрямлячів, призначення яких – живлення вимірювального механізму магнітоелектричної системи постійним струмом. Прилади цієї системи застосовуються для вимірювань у колах постійного та змінного струмів для вимірювання невеликих значень фізичних величин, а також для вимірювання у колах з підвищеною частотою струму (понад 50 Гц).

Запитання для самоконтролю

1. Опишіть будову і принцип дії приладу магнітоелектричної системи, вказавши область застосування.
2. Опишіть будову і принцип дії приладу електромагнітної системи, вказавши область застосування.
3. Опишіть будову і принцип дії приладу електродинамічної системи, вказавши область застосування.
4. Опишіть будову і принцип дії приладу індукційної системи, вказавши область застосування.
5. Опишіть будову і принцип дії приладу термоелектричної системи, вказавши область застосування.
6. Опишіть будову і принцип дії приладу випрямної системи, вказавши область застосування.

9.4 Вимірювання сили струму, напруги, активної потужності, коефіцієнта потужності

Для вимірювання сили струму в колі служить *амперметр*, літерне позначення якого на принципових електричних схемах – *РА*. Він включається послідовно в коло, у якому виконується вимірювання (рис.9.1). Опір котушки вимірювального механізму повинний бути мінімальним, щоб сила струму в колі не змінилася при включенні амперметра. Для цього котушку виконують з невеликою кількістю витків із проводу з великим перерізом.

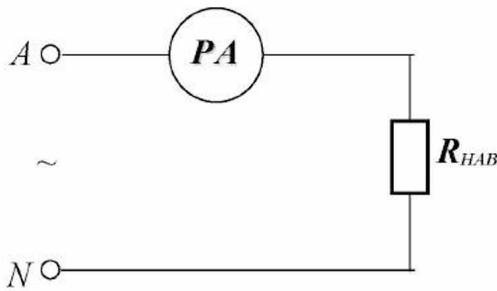


Рис.9.1

Амперметр вибирається для вимірювань у такий спосіб: межа вимірювання приладу повинна перевищувати передбачуване значення сили струму в колі. Для розширення межі вимірювання амперметра використовують трансформатори струму або шунти (манганінові пластини, упаяні в мідні чи латунні наконечники). Шунт включається в коло послідовно, а паралельно йому включається амперметр.

Приклад 9.1

Амперметр, на шкалі якого **100 поділок**, має межу вимірювання **15 А**. При включенні амперметра в коло його стрілка відхилилася на **80 поділок**.

Визначити ціну поділки приладу та силу струму в колі.

Рішення.

1. Визначаємо ціну поділки приладу за (9.1):

$$C_{\text{п}} = \frac{I_{\text{МАХ}}}{n_{\text{МАХ}}} = \frac{15}{100} = 0,15 \frac{\text{А}}{\text{поділ.}}$$

2. Визначаємо силу струму в колі за (9.3):

$$I = C_{\text{п}} n = 0,15 \cdot 80 = 12 \text{ А.}$$

Для вимірювання напруги в колі служить *вольтметр*, літерне позначення якого на принципових електричних схемах – *PV*. Він включається паралельно в коло, у якому виконується вимірювання (рис.9.2). Опір котушки вимірювального механізму повинний бути максимальним, щоб напруга в колі не змінилася при включенні вольтметра. Для цього котушку виконують з великою кількістю витків із проводу з невеликим перерізом.

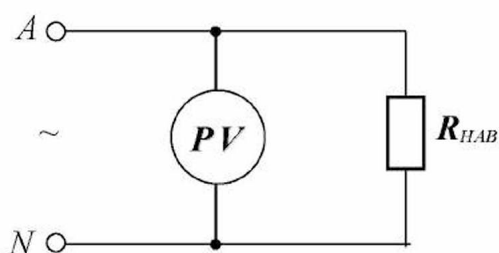


Рис.9.2

Вольтметр вибирається для вимірювань у такий спосіб: межа вимірювання приладу повинна перевищувати передбачуване значення напруги в колі. Для розширення межі вимірювання вольтметра використовують трансформатори напруги або додаткові опори, які включаються послідовно з вольтметром.

Приклад 9.2

Вольтметр, на шкалі якого **150 поділок**, має межу вимірювання **300 В**. При включенні вольтметра в коло його стрілка відхилилася на **110 поділок**.

Визначити ціну поділки приладу та напругу на затискачах кола.

Рішення.

1. Визначаємо ціну поділки приладу за (9.1):

$$C_{\text{п}} = \frac{U_{\text{МАХ}}}{n_{\text{МАХ}}} = \frac{300}{120} = 2 \frac{\text{В}}{\text{поділ.}}$$

2. Визначаємо напругу на затискачах кола за (9.3):

$$U = C_{\text{п}} n = 2 \cdot 110 = 220 \text{ В.}$$

Для вимірювання активної потужності в колі служить **ватметр**, літерне позначення якого на принципових електричних схемах – **PW**. Вимірювальний механізм ватметра складається з двох котушок: нерухомої та рухомої, зв'язаної зі стрілкою приладу. Нерухома котушка (струмова обмотка) має невелику кількість витків та виконана з проводу із великим перерізом; включається в коло послідовно. Рухома котушка (обмотка напруги) має велику кількість витків та виконана з проводу із невеликим перерізом; включається в коло паралельно. Струми в котушках повинні протікати в одному напрямку, щоб стрілка приладу відхилилася вправо від нуля, для цього затискачі приладу зі знаком «*» поєднують у загальний вузол. Принцип дії ватметра заснований на явищі електромагнітної сили, яка виникає при протіканні струму в обох котушках, в результаті чого виникає обертаючий момент прямо пропорційний струмам у котушках. Сила струму в рухомій котушці пропорційна напрузі в колі, тому що вона включається паралельно. Сила струму в нерухомій котушці пропорційна силі струму в колі, тому що вона включається послідовно. Отже, обертаючий момент, який діє на рухома котушку, пропорційний активній потужності в колі. Таким чином, ватметр має дві межі вимірювання: за струмом і за напругою, тому межа вимірювання та ціна поділки ватметра визначаються так:

$$P_{\text{MAX}} = I_{\text{MAX}} U_{\text{MAX}}; \quad (9.9)$$

$$C_{\text{П}} = \frac{P_{\text{MAX}}}{n_{\text{MAX}}}, \quad (9.10)$$

де I_{MAX} – межа вимірювання ватметра за струмом, A ;
 U_{MAX} – межа вимірювання ватметра за напругою, B .

Вибір ватметра для вимірювань здійснюється в такий спосіб: межа вимірювання приладу за струмом повинна перевищувати передбачуване значення сили струму в колі, межа вимірювання приладу за напругою повинна перевищувати передбачуване значення напруги в колі. Для розширення меж вимірювання ватметра використовують трансформатори струму і напруги (або шунти і додаткові опори).

Принципова електрична схема включення ватметра для вимірювання потужності, яку споживає навантаження в однофазному колі змінного струму, показана на рис.9.3.

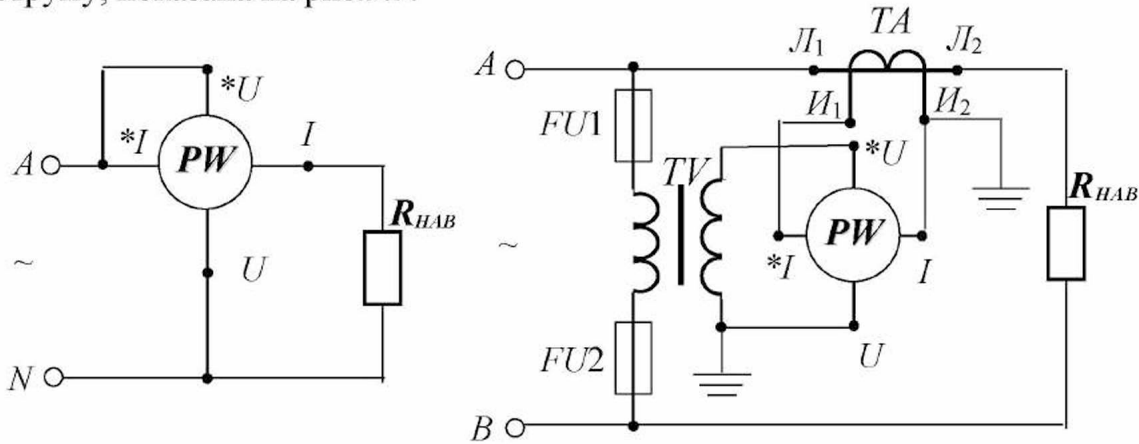


Рис.9.3

Приклад 9.3

Ватметр, на шкалі якого **150 поділок**, має межу вимірювання за струмом **20 А** та межу вимірювання за напругою **300 В**. При включенні ватметра в коло його стрілка відхилилася на **90 поділок**.

Визначити ціну поділки приладу та активну потужність у колі.

Рішення.

1. Визначаємо межу вимірювання приладу за (9.9):

$$P_{\text{MAX}} = I_{\text{MAX}} U_{\text{MAX}} = 20 \cdot 300 = 6000 \text{ Вт}.$$

2. Визначаємо ціну поділки приладу за (9.10):

$$C_{\text{П}} = \frac{P_{\text{MAX}}}{n_{\text{MAX}}} = \frac{6000}{150} = 40 \frac{\text{Вт}}{\text{поділ.}}$$

3. Визначаємо активну потужність у колі за (9.3):

$$P = C_{\text{П}} n = 40 \cdot 90 = 3600 \text{ Вт}.$$

Значення *коефіцієнта потужності* можна визначити за показаннями амперметра, вольтметра та ватметра:

$$\cos \varphi = \frac{A_{PW}}{A_{PV} A_{PA}}, \quad (9.11)$$

де $\cos \varphi$ – коефіцієнт потужності;
 A_{PW} – показання ватметра, $Вт$;
 A_{PV} – показання вольтметра, $В$;
 A_{PA} – показання амперметра, $А$.

Приклад 9.4

Котушка індуктивності підключена до однофазного джерела (50 Гц). У коло котушки включені ватметр, вольтметр і амперметр. Після подачі напруги на затискачі котушки показання приладів стали такими: ватметра – **110 Вт**, вольтметра – **220 В**, амперметра – **5 А**.

Визначити коефіцієнт потужності котушки.

Рішення.

1. Визначаємо коефіцієнт потужності котушки за (9.11):

$$\cos \varphi = \frac{A_{PW}}{A_{PV} A_{PA}} = \frac{110}{220 \cdot 5} = 0,1.$$

Коефіцієнт потужності можна також визначити за допомогою електровимірювального приладу, який називають *фазометром*, літерне позначення якого на принципових електричних схемах – *рФ*.

Запитання для самоконтролю

1. Для чого призначений амперметр?
2. Як вибрати для вимірювань амперметр?
3. Складіть принципову електричну схему вимірювання сили струму в однофазному навантаженні.
4. Для чого призначений вольтметр?
5. Як вибрати для вимірювань вольтметр?
6. Складіть принципову електричну схему вимірювання напруги на затискачах однофазного навантаження.
7. Для чого призначений ватметр?
8. Опишіть будову ватметра.
9. Опишіть принцип дії ватметра.
10. Як вибрати для вимірювань ватметр?

11. Як визначити межу вимірювання та ціну поділки ватметра?
12. Складіть принципову електричну схему вимірювання потужності однофазного навантаження.
13. Складіть і опишіть принципову електричну схему включення ватметра у високовольтну однофазну мережу за допомогою вимірювальних трансформаторів напруги і струму.
14. Як визначити коефіцієнт потужності пристрою за показаннями амперметра, вольтметра та ватметра?

9.5 Вимірювання електричної енергії

Для обліку споживання активної енергії використовують *лічильник активної енергії*, літерне позначення якого на принципових електричних схемах – *PWh*. Вимірювальний механізм лічильника активної енергії влаштований у такий спосіб. На двох магнітопроводах, які мають підковоподібну форму та розташовані перпендикулярно один до одного, знаходяться обмотки (котушки індуктивності). Одна обмотка (обмотка напруги) включається паралельно споживачу, друга обмотка (струмова обмотка) включається послідовно зі споживачем. Між магнітопроводами укріплений алюмінієвий диск на осі, яка зв'язана з рахунковим механізмом.

Принцип дії вимірювального механізму наступний: при протіканні електричного струму по обмотках спостерігається явище електромагнетизму, в результаті чого створюються магнітні потоки обмоток. Ці потоки пронизують диск і спостерігається явище електромагнітної індукції: у диску наводяться вихрові е.р.с., під дією яких протікають вихрові струми. Взаємодія магнітного поля обмоток і вихрових струмів призводить до виникнення явища електромагнітної сили. Диск, а разом з ним і рахунковий механізм, починають обертатися. Для гальмування диска (при відсутності споживання електроенергії) використовується постійний магніт підковоподібної форми, полюси якого розташовані по різні боки щодо площини диска.

На шкалі лічильника вказуються наступні технічні параметри: тип; номінальна напруга (220 В, 380 В – для безпосереднього включення; 100 В – для включення через вимірювальний трансформатор напруги); номінальний струм (5 А, 10 А, 20 А, 50 А); *постійна лічильника*, яка показує, скільки обертів диска відповідає 1 кВт·год.

Лічильник активної енергії включається аналогічно ватметру.

На практиці (крім обліку спожитої електроенергії) лічильники застосовують для визначення потужності включеного навантаження. Для цього знімають різницю показань лічильника за тривалий проміжок часу (кілька годин), яку співвідносять часу:

$$P = \frac{W_1 - W_2}{t} = \frac{\Delta W}{t}, \quad (9.12)$$

де P – активна потужність включеного навантаження, $кВт$;
 ΔW – різниця показань лічильника, $кВт \cdot год$;
 t – час, $год$.

Існує більш швидкий, але менш точний спосіб визначення потужності включеного навантаження. Для цього знімають кількість обертів диска за стислий проміжок часу (кілька секунд), яку співвідносять часу та постійній лічильника:

$$P = \frac{3600 n}{C_{лч} t}, \quad (9.13)$$

де n – кількість обертів диска, $об.$;
 $C_{лч}$ – постійна лічильника, $об/(кВт \cdot год)$;
 t – час, $с$.

Лічильники активної енергії випускаються в однофазному, трифазному трипровідному та трифазному чотирипровідному виконанні. Вимірювальний механізм трифазного трипровідного лічильника являє собою сукупність вимірювальних механізмів двох однофазних лічильників, диски яких розташовані на загальній вісі та працюють на один рахунковий механізм (такий вимірювальний механізм називається двоелементним). Вимірювальний механізм трифазного чотирипровідного лічильника являє собою сукупність вимірювальних механізмів трьох однофазних лічильників, диски яких розташовані на загальній вісі та працюють на один рахунковий механізм (такий вимірювальний механізм називається триелементним).

Вимірювання *реактивної енергії* здійснюється за допомогою лічильників реактивної енергії, конструкція яких аналогічна трифазним чотирипровідним лічильникам активної енергії. Відмінність полягає в способі підключення лічильника реактивної енергії.

Запитання для самоконтролю

1. Для чого призначений лічильник активної енергії?
2. Опишіть будову лічильника активної енергії.
3. Опишіть принцип дії лічильника активної енергії.
4. Складіть і опишіть принципову електричну схему включення лічильника активної енергії у високовольтну мережу за допомогою вимірювальних трансформаторів напруги і струму.
5. Що розуміється під постійною лічильника активної енергії?
6. Як визначити потужність навантаження за показаннями лічильника активної енергії?

9.6 Вимірювання опорів

У колах постійного струму опір елемента кола можна вимірити за допомогою вольтметра та амперметра. Для цього вимірюють напругу на елементі кола і силу струму, який у ньому протікає. Розділивши показання вольтметра на показання амперметра, визначають опір:

$$R = \frac{A_{PV}}{A_{PA}}. \quad (9.14)$$

У колах змінного струму за показаннями вольтметра та амперметра можна визначити повний опір елемента кола:

$$\bar{z} = \frac{A_{PV}}{A_{PA}}. \quad (9.15)$$

Активний опір елемента в колі змінного струму можна визначити за показаннями ватметра та амперметра:

$$r = \frac{A_{PW}}{(A_{PA})^2}. \quad (9.16)$$

Приклад 9.5

Котушка індуктивності підключена до однофазного джерела (50 Гц). У коло котушки включені ватметр, вольтметр і амперметр. Після подачі напруги на затискачі котушки показання приладів стали такими: ватметра – **110 Вт**, вольтметра – **220 В**, амперметра – **5 А**.

Визначити параметри котушки (повний, активний та індуктивний опори).

Рішення.

1. Визначаємо повний опір котушки за (9.15):

$$z = \frac{A_{PV}}{A_{PA}} = \frac{220}{5} = 44 \text{ Ом}.$$

2. Визначаємо активний опір котушки за (9.16):

$$r = \frac{A_{PW}}{(A_{PA})^2} = \frac{110}{5^2} = \frac{110}{25} = 4,4 \text{ Ом}.$$

3. Визначаємо індуктивний опір котушки з (3.75):

$$x_L = \sqrt{z^2 - r^2} = \sqrt{44^2 - 4,4^2} = \sqrt{1936 - 19,36} = 43,8 \text{ Ом}.$$

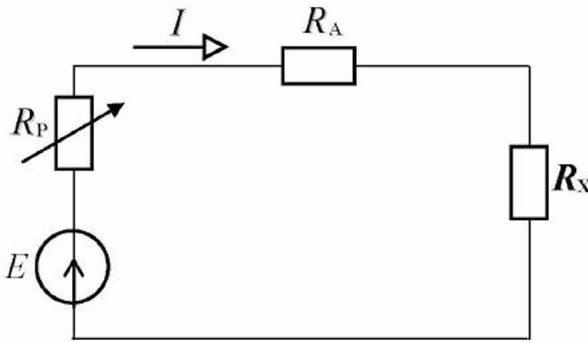


Рис.9.4

Для безпосереднього вимірювання опорів застосовується електровимірювальний прилад *омметр*, який являє собою сукупність міліамперметра магнітоелектричної системи та спеціальної вимірювальної системи, яка складається з джерела постійної електрорушійної сили і регульованого резистора (рис.9.4).

При незмінній напрузі джерела сила струму в колі залежить від вимірюваного опору, що дозволяє градуювати шкалу міліамперметра в омах:

$$I = \frac{E}{R_P + R_A + R_X}, \quad (9.17)$$

де I – сила струму в колі, A ;
 R_P – опір регульованого резистора, $Ом$;
 R_A – опір амперметра, $Ом$;
 R_X – вимірюваний опір, $Ом$.

Чим більше вимірюваний опір, тим менший струм протікає в колі, тому омметр має зворотну шкалу.

Крім омметра опір елемента кола можна вимірити за допомогою *вимірювального моста*. Розглянемо чотириплечій вимірювальний міст (рис.9.5).

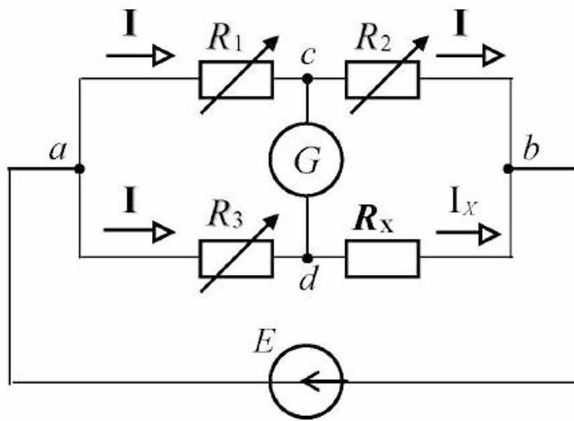


Рис.9.5

В одне плече моста включається елемент кола, опір якого необхідно вимірити (R_X), у три інших плечі моста включаються регульовані резистори R_1, R_2, R_3 . Вимірювальний міст має дві діагоналі (ab і cd), до діагоналі ab підключається джерело постійної електрорушійної сили, до діагоналі cd – гальванометр G .

При вимірюванні необхідно опори регульованих резисторів змінювати так, щоб урівноважити міст, тобто струм у гальванометрі повинний бути відсутнім. Це означає, що в урівноваженому стані $I_1 = I_2, I_3 = I_X$. У відповідності до другого закону Кірхгофа:

$$R_1 I_1 = R_3 I_3; \quad R_2 I_2 = R_X I_X. \quad (9.18)$$

Розділивши одне рівняння на інше, одержимо:

$$R_X = \frac{R_3}{R_1} R_2. \quad (9.19)$$

Запитання для самоконтролю

1. Складіть розрахункову схему двоплечого моста.
2. Опишіть принцип дії двоплечого моста.
3. Складіть розрахункову схему чотириплечого моста.
4. Опишіть принцип дії чотириплечого моста.

ТЕМАТИЧНЕ КОМПЛЕКСНЕ КВАЛІФІКАЦІЙНЕ ЗАВДАННЯ

Умова

Однофазне навантаження споживає повну потужність S при коефіцієнті потужності $\cos \varphi$ та напрузі U . У колі навантаження включені амперметр, вольтметр і ватметр через вимірювальні трансформатори напруги і струму. Амперметр із межею вимірювання 5 A и максимальним числом поділок на шкалі – 100 . Вольтметр із межею вимірювання 150 B и максимальним числом поділок на шкалі – 150 . Ватметр із межею вимірювання по струму 5 A і по напрузі 150 B та максимальним числом поділок на шкалі – 150 . Коефіцієнт трансформації вимірювального трансформатора напруги $k_{\text{т.н}}$, коефіцієнт трансформації вимірювального трансформатора струму $k_{\text{т.с}}$.

Завдання

1. Скласти принципову електричну схему описаної установки.
2. Визначити силу струму навантаження.
3. Визначити кількість поділок, на яке відхилиться стрілка амперметра.
4. Визначити кількість поділок, на яке відхилиться стрілка вольтметра.
5. Визначити активну потужність, яку споживає навантаженням.
6. Визначити кількість поділок, на яке відхилиться стрілка ватметра.

**Варіанти вихідних даних до тематичного комплексного
кваліфікаційного завдання**

Таблиця 9.1

Варіанти	Вихідні дані				
	S, BA	U, B	$\cos \varphi$	$k_{т.н}$	$k_{т.с}$
1	1000	220	0,6	2	5
2	1000	120	0,8	2	5
3	2000	1000	0,6	5	10
4	5000	200	0,7	2	5
5	5000	220	0,8	2	5
6	4000	500	0,6	5	2
7	4000	500	0,45	2	10
8	6000	200	0,45	5	10
9	6000	500	0,6	5	5
10	6000	1000	0,8	2	10
11	1000	250	0,7	2	5
12	5000	250	0,45	2	10
13	4000	500	0,8	2	5
14	6000	300	0,6	4	10
15	6050	200	0,45	5	10

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

1. Опис експериментальної установки

Експериментальна установка містить котушку індуктивності K , яка підключена до однофазного джерела (50 Гц). У колі котушки для захисту і комутації передбачений однофазний автоматичний вимикач SF , для вимірювань передбачені амперметр PA , вольтметр PV і ватметр PW , які включені через вимірювальні трансформатори струму TA і напруги TV . У первинному колі трансформатора напруги для захисту передбачені плавкі запобіжники $FU1$ та $FU2$.

Принципова електрична схема експериментальної установки наведена на рисунку 1.

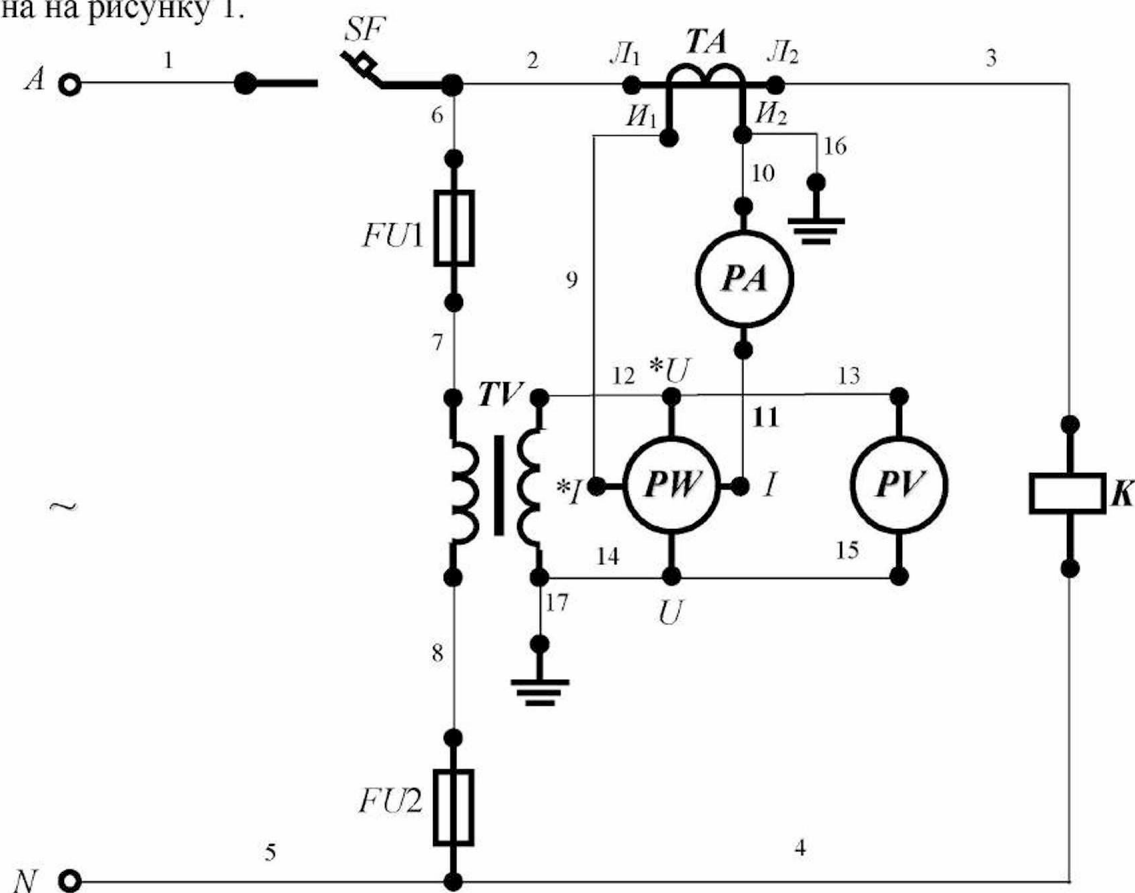


Рисунок 1 - Принципова електрична схема експериментальної установки.

Для складання схеми необхідно мати 17 провідників (на схемі позначені номерами 1-17).

2. Уміння, які здобуваються студентами в результаті виконання експериментального дослідження

- 2.1 Уміти скласти принципову електричну схему кола та зібрати її.
- 2.2 Уміти визначити за допомогою паспортних даних межу вимірювання амперметра та максимальну кількість поділок на його шкалі.
- 2.3 Уміти визначити за допомогою паспортних даних межу вимірювання вольтметра та максимальну кількість поділок на його шкалі.
- 2.4 Уміти визначити за допомогою паспортних даних межу вимірювання вольтметра та максимальну кількість поділок на його шкалі.
- 2.5 Уміти визначити за допомогою паспортних даних коефіцієнт трансформації трансформатора струму.
- 2.6 Уміти визначити за допомогою паспортних даних коефіцієнт трансформації трансформатора напруги.
- 2.7 Уміти визначити за допомогою паспортних даних ціну поділки амперметра.
- 2.8 Уміти визначити за допомогою паспортних даних ціну поділки вольтметра.
- 2.9 Уміти визначити за допомогою паспортних даних ціну поділки ватметра.
- 2.10 Уміти виміряти напругу на затискачах котушки.
- 2.11 Уміти визначити за допомогою експериментальних даних діюче значення сили струму в колі.
- 2.12 Уміти виміряти силу струму в котушці.
- 2.13 Уміти визначити за допомогою експериментальних даних діюче значення напруги на затискачах котушки.
- 2.14 Уміти виміряти активну потужність, яку споживає котушка.
- 2.15 Уміти визначити за допомогою експериментальних даних активну потужність, споживану котушкою.

2.16 Уміти визначити за допомогою експериментальних повний опір котушки.

2.17 Уміти визначити за допомогою експериментальних активний опір котушки.

2.18 Уміти визначити за допомогою розрахункових реактивний опір котушки.

3. Завдання з виконання експериментального дослідження

3.1 Зібрати схему експериментальної установки.

3.2 Визначити за допомогою паспортних даних межу вимірювання амперметра (I_{MAX}) та максимальну кількість поділок на його шкалі (n_{MAX_PA}).

3.3 Визначити за допомогою паспортних даних межу вимірювання вольтметра (U_{MAX}) та максимальну кількість поділок на його шкалі (n_{MAX_PV}).

3.4 Визначити за допомогою паспортних даних межу вимірювання вольтметра (P_{MAX}) та максимальну кількість поділок на його шкалі (n_{MAX_PW}).

3.5 Визначити за допомогою паспортних даних коефіцієнт трансформації трансформатора струму ($k_{T.C}$).

3.6 Визначити за допомогою паспортних даних коефіцієнт трансформації трансформатора напруги ($k_{T.H}$).

3.7 Визначити за допомогою паспортних даних ціну поділки амперметра, використовуючи рівняння:

$$C_{II_PA} = \frac{I_{MAX}}{n_{MAX_PA}} \cdot k_{T.C} .$$

3.8 Визначити за допомогою паспортних даних ціну поділки вольтметра, використовуючи рівняння:

$$C_{II_PV} = \frac{U_{MAX}}{n_{MAX_PA}} \cdot k_{T.H} .$$

3.9 Визначити за допомогою паспортних даних ціну поділки ватметра, використовуючи рівняння:

$$C_{\Pi_PW} = \frac{P_{MAX}}{n_{MAX_PA}} \cdot k_{T.C} \cdot k_{T.H.}$$

3.10 Занести отримані значення в таблицю 1.

Таблиця 1

№ п/п	Фізичні величини, що характеризують установку										
	$I_{MAX},$ <i>A</i>	$n_{MAX_PA},$ <i>под.</i>	$U_{MAX},$ <i>B</i>	$n_{MAX_PV},$ <i>под.</i>	$P_{MAX},$ <i>Bm</i>	$n_{MAX_PW},$ <i>под.</i>	$k_{T.C}$	$k_{T.H}$	$C_{\Pi_PA},$ <i>A/под.</i>	$C_{\Pi_PV},$ <i>B/под.</i>	$C_{\Pi_PW},$ <i>Bm/под.</i>
1											

3.11 Подати напругу на затискачі експериментальної установки.

3.12 Зняти показання приладів, результати занести в таблицю 2.

Таблиця 2

№ п/ п	Умови проведення експерименту	Показання приладів		
		I, A	U, B	P, Bm
1	Вимикач SF замкнений			

3.13 Визначити за допомогою експериментальних даних діюче значення напруги на затискачах котушки.

3.14 Визначити за допомогою експериментальних даних діюче значення сили струму в котушці.

3.15 Визначити за допомогою експериментальних даних активну потужність, споживану котушкою.

3.16 Визначити за допомогою експериментальних даних повний опір котушки, використовуючи запис закону Ома для ділянки кола:

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

3.17 Визначити за допомогою експериментальних даних активний опір котушки, використовуючи рівняння:

$$P = r \cdot I^2.$$

3.18 Визначити за допомогою розрахункових даних індуктивний опір котушки, використовуючи рівняння:

$$z = \sqrt{r^2 + x_L^2}.$$

3.19 Занести отримані значення в таблицю 3.

Таблиця 3

№ п/п	Фізичні величини, що характеризують установку					
	U, B	I, A	$P, Вт$	$r, Ом$	$z, Ом$	$x_L, Ом$
1						

4. Структура звіту

4.1 Назва теми експериментального дослідження.

4.2 Принципова електрична схема експериментальної установки.

4.3 Таблиця 1.

4.4 Таблиця 2.

4.5 Таблиця 3.

Тема 10 ОСНОВИ ЕЛЕКТРОНІКИ

10.1 Електронно-дірковий перехід

Хімічним елементом називається з'єднання атомів з однаковим зарядом ядра. У природі з усіх хімічних елементів тільки гази: гелій, неон та інші знаходяться в одноатомному стані. Всі інші елементи тяжіють з'єднатися один з одним у певному порядку, утворюючи молекули. З'єднання у певному порядку атомів і молекул називається речовиною. Тверда речовина має свою структуру і складається з атомів, що мають у своєму складі ядра й електрони, які знаходяться на певних енергетичних рівнях (заповнена зона, заборонена зона, валентна зона, зона провідності).

У речовині, яку називають **напівпровідником**, валентна зона і зона провідності розділені забороненою зоною, у провіднику такий розділ відсутній, а в діелектрику ϵ , але ширина забороненої зони набагато більше, ніж у напівпровідника. Розрізняють власні напівпровідники та напівпровідники з домішкою. Власними напівпровідниками є хімічні елементи IV групи періодичної таблиці Менделєєва: кремній (*Si*), германій (*Ge*), що мають 4 валентних електрони, які можуть вступити в хімічний зв'язок з електронами інших атомів. При незначній температурі один або декілька з цих валентних електронів можуть переходити в зону провідності на відміну від діелектрика.

Властивість атомів одного хімічного елемента приєднувати певну кількість атомів інших хімічних елементів називається валентністю. З'єднання атомів хімічних елементів у молекулу називається хімічним зв'язком. Він може виникнути, наприклад, при утворенні електронних пар: двох електронів, які належать одночасно двом атомам (тобто обертаються навколо ядер двох атомів); такий хімічний зв'язок називається ковалентним зв'язком. Якщо ковалентний зв'язок утворюється в результаті переходу електронної пари від одного хімічного елемента – донора (постачальника електронів) до іншого хімічному елементу – акцептора (користувача електронів), то такий хімічний зв'язок називається донорно-акцепторним зв'язком.

Напівпровідник з домішкою утворюється у такий спосіб. Якщо в хімічний елемент IV групи внести домішку (хімічний елемент V групи), то при кімнатній температурі атоми домішки віддають 5-й електрон, який не бере участі у створенні хімічного зв'язку. В результаті атоми домішки, які розташовані у вузлах кристалічних решіток, стають позитивними іонами, а в отриманій речовині з'являються вільні електрони. Такі речовини, у яких носіями зарядів є електрони, називають **напівпровідниками n-типу** (n – «negative» – негативний), а **домішки**, завдяки яким виникають вільні електрони, називають **донорними**.

Якщо в хімічний елемент IV групи внести як домішку хімічний елемент III групи, то при кімнатній температурі атоми домішки захоплюють електрони у деяких атомів хімічного елемента IV групи для утворення хімічного зв'язку. В результаті ці атоми, розташовані у вузлах кристалічних решіток, стають позитивними іонами, навколо яких знаходяться нейтральні атоми. Нейтральні атоми, які знаходяться біля іона, віддають свої електрони позитивному іону, роблячи його нейтральним; при цьому вони самі стають позитивними іонами. Отже, місце позитивного іона увесь час змінюється, начебто переміщується позитивний заряд, який дорівнює за модулем заряду електрона. Відсутність електрона в атомі напівпровідника називають діркою, яка має позитивний заряд, рівний за модулем заряду електрона. Такі речовини, у яких носіями зарядів є дірки, називають **напівпровідниками р-типу** (р – «positive» – позитивний), а **домішки**, завдяки яким виникають дірки, називають **акцепторними**.

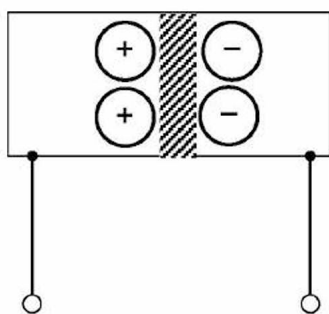


Рис.10.1

Якщо з'єднати напівпровідник р-типу з напівпровідником n-типу, то утвориться напівпровідник р-n-типу (який має р-шар та n-шар) у місці їх з'єднання створиться електронно-дірковий перехід (р-n-перехід), у якому електрони n-шару заповнюють дірки р-шару. Тому в місці з'єднання утвориться шар речовини, що не має вільних зарядів (тобто з великим опором), який називають **замикаючим шаром**. Товщина замикаючого шару складає кілька мікрометрів, його розширенню перешкоджає електричне поле нерухомих іонів домішок. Отже, у нейтральному стані, коли потенціали на кінцях напівпровідника дорівнюють нулю, упорядкований і спрямований рух зарядів у ньому відсутній, тобто сила струму дорівнює нулю (рис.10.1).

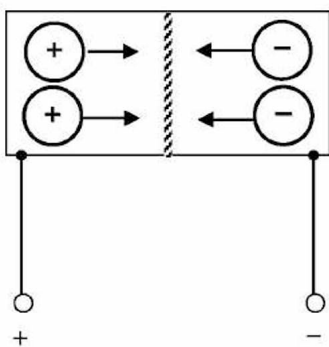


Рис.10.2

Якщо від джерела електрорушійної сили до р-шару отриманого напівпровідника прикласти позитивний потенціал ($+\varphi$), а до n-шару – негативний потенціал ($-\varphi$), то електрони під дією прикладеної напруги з n-шару почнуть проникати в р-шар, заповнюючи дірки. Нестача електронів у n-шарі та дірок у р-шарі компенсується за рахунок джерела електрорушійної сили: електрони від джерела надходять у n-шар, а з р-шару електрони надходять до джерела, утворюючи в цьому шарі дірки. Цей упорядкований і спрямований рух вільних зарядів у напівпровіднику (прямий електричний струм) відбувається доти, поки до нього прикладена пряма напруга від джерела електрорушійної сили: «+» – до р-шару, а «-» – до n-шару (рис.10.2).

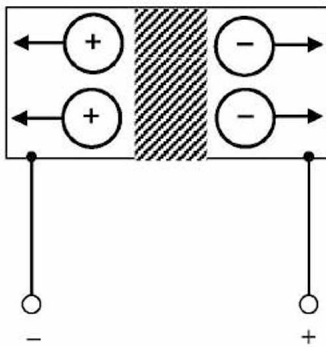


Рис.10.3

Якщо від джерела електрорушійної сили до р-шару отриманого напівпровідника прикласти негативний потенціал ($-\varphi$), а до n-шару – позитивний потенціал ($+\varphi$), то електрони під дією прикладеної напруги з n-шару почнуть надходити до джерела, з якого будуть проникати в р-шар, заповнюючи дірки (тобто відбудеться розширення замикаючого шару). Цей процес припиниться, коли товщина замикаючого шару стане пропорційною прикладеній напрузі джерела. У напівпровіднику буде відбуватися незначний упорядкований і спрямований рух зарядів (зворотний електричний струм) доти, поки до нього прикладена зворотна напруга від джерела електрорушійної сили: « \leftarrow » – до р-шару, а « \rightarrow » – до n-шару (рис.10.3).

Отже, речовини, електропровідність яких знаходиться між провідниками та діелектриками, називають напівпровідниками, характерними властивостями яких є:

- напівпровідник при прямій напрузі проводить електричний струм в одному напрямку (є провідником), а при зворотній напрузі практично не проводить електричний струм (є діелектриком);
- при збільшенні температури питомий опір напівпровідників знижується (провідників, навпаки, зростає).

Запитання для самоконтролю

1. Які речовини називають напівпровідниками?
2. Якими властивостями володіють напівпровідники?
3. Як утворюються напівпровідники?
4. Що є носіями зарядів у напівпровідниках n-типу?
5. Як утворюються напівпровідники n-типу?
6. Що є носіями зарядів у напівпровідниках p-типу?
7. Як утворюються напівпровідники p-типу?
8. Як утворюються напівпровідники p-n-типу?
9. Що розуміється під p-n-переходом?
10. Що розуміється під замикаючим шаром?
11. Що розуміється під прямим струмом і прямою напругою напівпровідника?
12. Опишіть роботу напівпровідника p-n-типу при прямій напрузі.
13. Що розуміється під зворотним струмом і зворотною напругою напівпровідника?
14. Опишіть роботу напівпровідника p-n-типу при зворотній напрузі.

10.2 Напівпровідниковий діод

Напівпровідниковий діод являє собою електронний пристрій з одним електронно-дірковим переходом (р-п-переходом) і двома виводами.

В залежності від конструктивного виконання р-п-переходу розрізняють точкові діоди, які мають незначну потужність, та площинні діоди, які мають значну потужність. На принципових електричних схемах літерно-графічне позначення напівпровідникового діода наступне:



Залежність сили струму в діоді від прикладеної до нього напруги, вольт-амперна характеристика (ВАХ), показана на рис.10.4. Вона ж є узагальненою ВАХ р-п-переходу. Вольт-амперна характеристика напівпровідникового діода має три характерних ділянки:

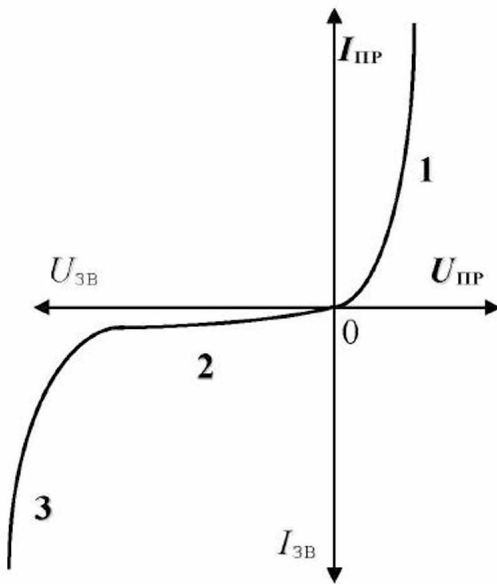


Рис.10.4

1 – робота при прямій напрузі (протікає прямий струм: р-п-перехід відкритий, і сила струму обмежена тільки опором матеріалу напівпровідника);

2 – робота при зворотній напрузі (протікає зворотний струм: р-п-перехід закритий, і струм незначної сили проходить за рахунок незначної кількості не основних носіїв вільних зарядів у матеріалі напівпровідника (електронів у р-шарі та дірок у п-шарі);

3 – робота при напрузі пробію (зворотний струм різко збільшується: відбувається різке, («лавиноподібне») збільшення не основних носіїв вільних зарядів у матеріалі напівпровідника (електронів у р-шарі та дірок у п-шарі) при збільшенні зворотної напруги).

Для оцінки та вибору напівпровідникових діодів указують наступні технічні параметри:

- прямий струм: максимально допустимий (середній за період) струм, сила якого визначається нагріванням діода;
- пряма напруга: пряма імпульсна максимальна напруга для допустимого імпульсу прямого струму;
- потужність, що розсіюється діодом: максимальна потужність, яку здатний розсіювати діод;
- зворотна напруга: зворотна імпульсна максимальна напруга, яка дорівнює 70 % від напруги пробію;
- зворотний струм: сила струму, який протікає при зворотній напрузі.

Напівпровідникові діоди випускають кремнієві (на основі кремнію) і германієві (на основі германію): кремнієві діоди здатні працювати при температурі від 120°C до 150°C при прямій напрузі близько 1 В , германієві діоди здатні працювати при температурі від 55°C до 85°C при прямій напрузі близько $0,3\text{ В}$. Для одержання більшої зворотної напруги діоди з'єднують послідовно, а для одержання більшого прямого струму діоди з'єднують паралельно.

Якщо номінальний режим роботи діода знаходиться на зворотній частині його вольт-амперної характеристики (рис.10.4, ділянка 2), то діод називають **стабілітроном**.

На принципових електричних схемах літерно-графічне позначення стабілітрона наступне:

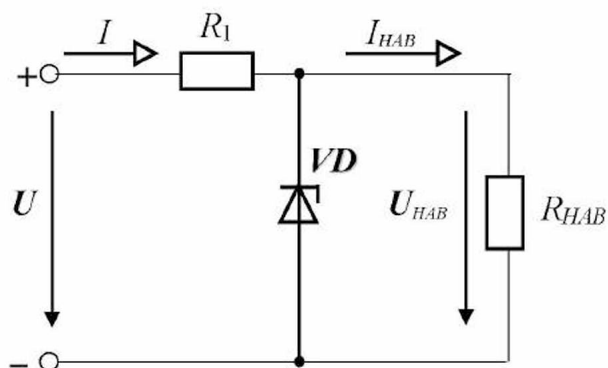


Рис.10.5

Стабілітрон призначений для стабілізації напруги, тобто підтримки напруги на одному рівні. Стабілітрон включають паралельно навантаженню (рис.10.5). При збільшенні вхідної напруги зростає струм у колі $R_1 - VD$, а напруга на навантаженні $U_{наб}$ (яка дорівнює напрузі стабілізації) практично не змінюється за рахунок спадання надлишкової напруги на резисторі R_1 .

Запитання для самоконтролю

1. Який електронний пристрій називається напівпровідниковим діодом?
2. Як напівпровідниковий діод позначається на принциповій електричній схемі?
3. Опишіть роботу напівпровідникового діода, використовуючи його вольт-амперну характеристику.
4. Перелічіть технічні параметри напівпровідникового діода.
5. Як вибрати напівпровідниковий діод?
6. Який електронний пристрій називається стабілітроном?
7. Як стабілітрон позначається на принциповій електричній схемі?
8. Приведіть принципову електричну схему стабілізації напруги з розшифруванням літерних позначень.
9. Опишіть роботу приведеної схеми стабілізації напруги.

10.3 Випрямлення змінного струму

Випрямлення змінного струму в постійний струм необхідно для живлення електричних машин постійного струму, електронних пристроїв та інших.

Розглянемо **однопівперіодну** схему випрямлення (рис.10.6). Вона складається з трансформатора, до вторинної обмотки якого послідовно підключаються діод і споживач електроенергії. Випрямлення струму за цією схемою здійснюється в такий спосіб: у першу половину періоду (у 1-й півперіод) електричний струм проходить через діод, у другу половину періоду (у 2-й півперіод) електричний струм фактично не проходить через діод, далі процес повторюється. Отже, протягом 1-го півперіоду навантаженні є, а протягом 2-го півперіоду вона відсутня. Струм, який протікає в колі навантаження, є **пульсуючим**, тобто змінюється його сила, але не змінюється його напрям (рис.10.7).

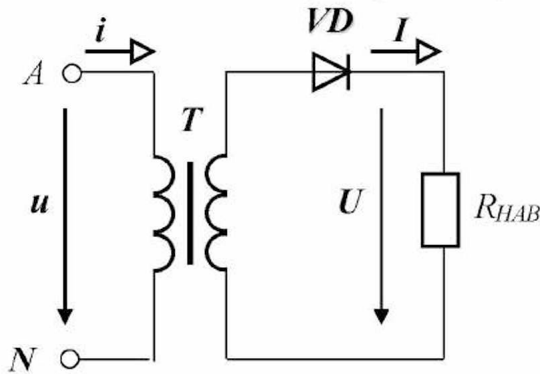


Рис.10.6

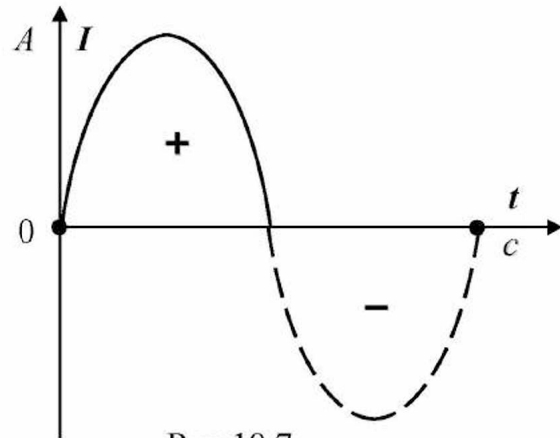


Рис.10.7

Недоліком показаної вище схеми випрямлення є значна пульсація випрямленого струму, що призводить до нестабільного постачання навантаження електроенергією.

Тому на практиці в основному використовують мостову **двопівперіодну** схему випрямлення змінного струму (рис.10.8). Вона складається з трансформатора, до вторинної обмотки якого підключаються діодний міст (з'єднання діодів) і споживач електроенергії. Випрямлення струму за цією схемою здійснюється в такий спосіб: у 1-у половину періоду (у 1-й півперіод) електричний струм проходить через діоди VD_1 і VD_2 (шлях струму показаний не заштрихованими стрілками), у 2-у половину періоду (у 2-й півперіод) електричний струм проходить через діоди VD_3 і VD_4 (шлях струму показаний заштрихованими стрілками), далі процес повторюється. Отже, напруга на навантаженні є і протягом 1-го півперіоду, і протягом 2-го півперіоду. Струм, який протікає в колі навантаження, пульсуючий, тобто змінюється його сила, але не змінюється його напрям (рис.10.9). Для зниження пульсації випрямленого струму використовують фільтри, що згладжують, на базі конденсаторів.

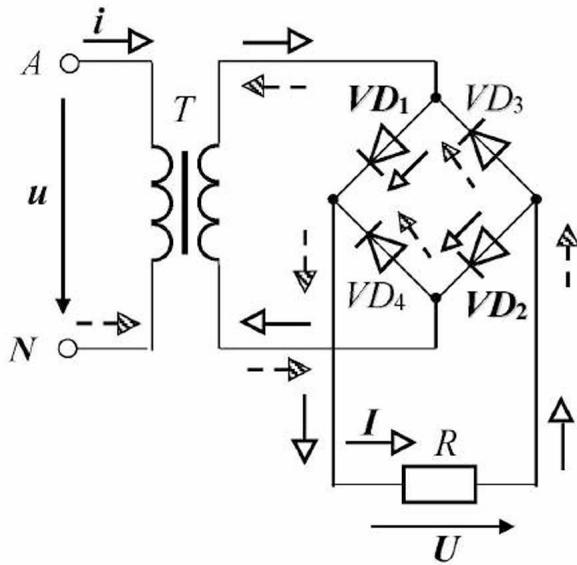


Рис.10.8

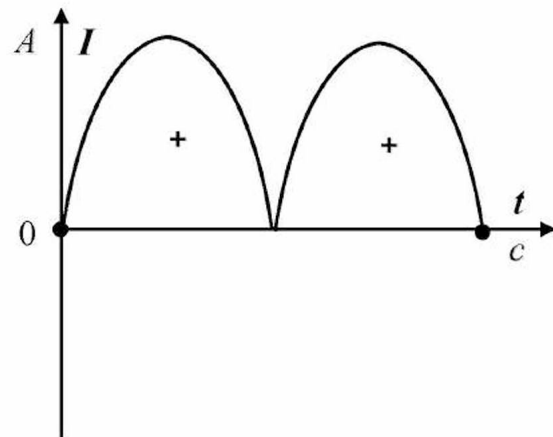


Рис.10.9

Аналогічно (з додаванням у схему випрямлення двох діодів) можна випрямляти трифазний змінний струм.

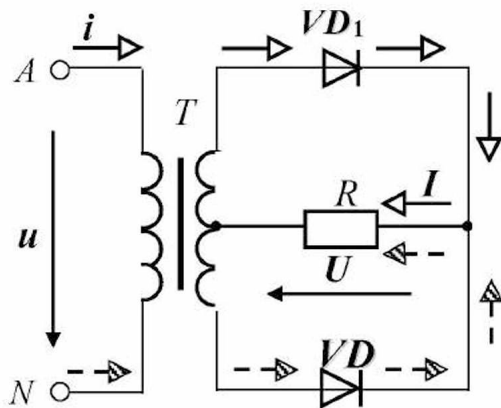


Рис.10.10

Якщо вторинна обмотка трансформатора має вивід від середньої точки (у цьому випадку її називають нульовою точкою), то для випрямлення змінного струму використовують двопівперіодну з нульовою точкою схему випрямлення (рис.10.10), що дозволяє одержати таку ж випрямлену напругу в споживача електроенергії, як і у випадку застосування мостової схеми.

Запитання для самоконтролю

1. Приведіть принципову електричну схему однопівперіодного випрямлення змінного синусоїдного струму з понижуючим трансформатором з розшифрування літерних позначень.
2. Опишіть роботу приведеної схеми однопівперіодного випрямлення.
3. Зобразіть графічно випрямлений струм.
4. Приведіть принципову електричну схему двопівперіодного випрямлення змінного синусоїдного струму з понижуючим трансформатором з розшифрування літерних позначень.
5. Опишіть роботу приведеної схеми двопівперіодного випрямлення.
6. Зобразіть графічно випрямлений струм.
7. Приведіть принципову електричну схему двопівперіодного з нульовою точкою випрямлення змінного синусоїдного струму з понижуючим трансформатором з розшифрування літерних позначень.

10.4 Тиристор

Тиристор – це напівпровідниковий керований пристрій, який має два р-шари і два n-шари, із трьома електронно-дірковими переходами (р-п-переходами) і трьома виводами. Вивід з р-шару називають анодом, вивід з n-шару називають катодом, третій вивід називають керуючим електродом, який може приєднуватися як до р-шару, так і до n-шару (рис.10.11а, 10.11б).

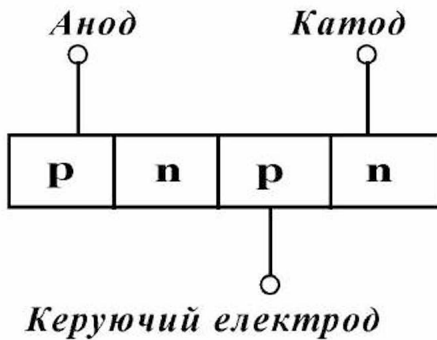


Рис.10.11а

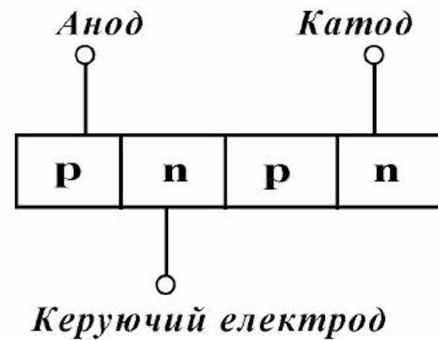
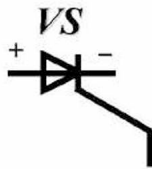
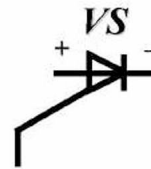


Рис.10.11б

На принципових електричних схемах літерно-графічне позначення тиристора наступне:



Керуючий електрод підключений до р-шару



Керуючий електрод підключений до n-шару

Вольт-амперна характеристика тиристора має вигляд, показаний на рис.10.12. Якщо керуючий електрод не підключений до мережі, то один з р-п-переходів закритий і тиристор працює на 1-й ділянці ВАХ. Значне збільшення напруги призводить до того, що тиристор починає працювати на 2-й ділянці ВАХ. В результаті напруга на тиристорі падає, а струм через нього збільшується, що призводить до роботи тиристора на 3-й ділянці ВАХ. Тому відсутність прямої напруги на керуючому електроді призводить до того, що тиристор переходить у відкритий стан при значній напрузі. Якщо керуючий електрод підключений до мережі і на нього подана пряма напруга, то тиристор відразу починає працювати на 3-й ділянці ВАХ.

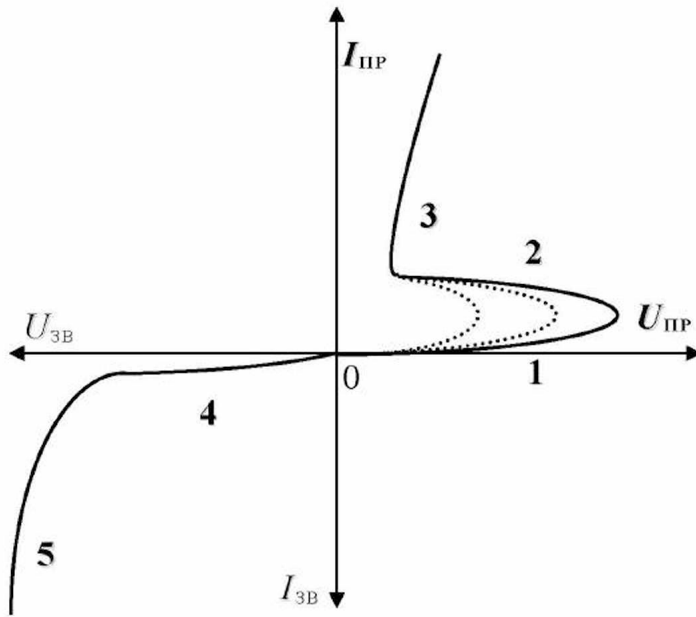


Рис.10.12

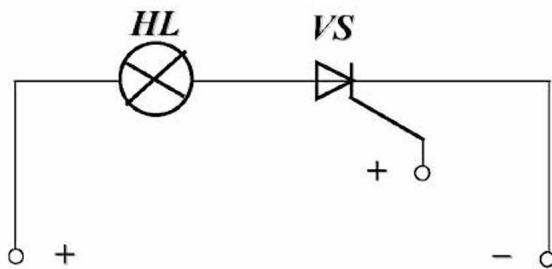


Рис.10.13

Отже, наявність прямої напруги на керуючому електроді призводить до того, що тиристор переходить у відкритий стан при незначній напрузі.

Тиристори можуть пропускати електричний струм силою до 1,0 – 2,0 кА при напрузі 0,1 – 4,0 кВ.

Найбільше просто тиристор можна застосувати як електричний ключ (рис.10.13). Тиристори використовуються також для регулювання напруги на затискачах трифазних асинхронних електродвигунів та інших цілей.

Запитання для самоконтролю

1. Який електронний пристрій називається тиристором?
2. Як тиристор позначається на принциповій електричній схемі?
3. Опишіть роботу тиристора, використовуючи його вольт-амперну характеристику.
4. Для чого призначений тиристор?

10.5 Транзистор, підсилення електричного сигналу

Транзистор винайдений у 1948 році американськими вченими Д. Бардіном, У. Браттейном і У. Шоклі, за що їм була присуджена Нобелівська премія.

Транзистор (біполярний транзистор) – це напівпровідниковий пристрій, який призначений для підсилення електричного сигналу (струму, напруги), та має два р-шари і один п-шар (рис.10.13а), або один р-шар і два п-шари (рис.10.13б), з 2-ма електронно-дірковими переходами (р-п-переходами) і 3-ма виводами. Шари, що знаходяться по краях транзистора, називають колектором і емітером, а середній шар називають базою.

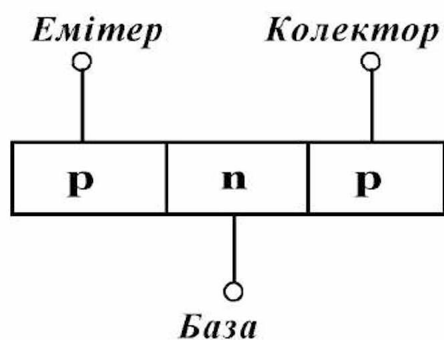


Рис.10.13а

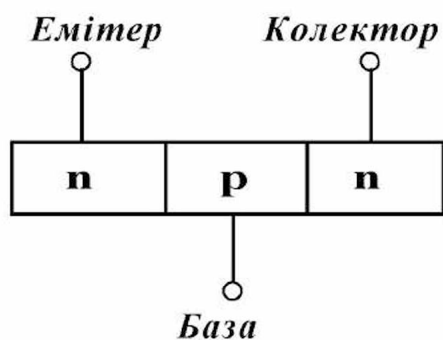
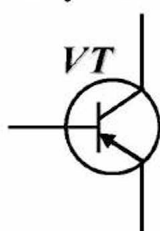
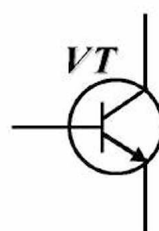


Рис.10.13б

На принципових електричних схемах літерно-графічне позначення транзистора наступне:



Транзистор р-п-р-типу



Транзистор н-р-п-типу

На кожний р-п-перехід транзистора може бути подана як пряма, так і зворотна напруги. Відповідно розрізняють чотири режими роботи транзистора: режим відсічення (режим закритого транзистора) – на обидва переходи подається зворотна напруга; режим насичення (режим відкритого транзистора) – на обидва переходи подається пряма напруга; активний режим – на емітерний перехід подається пряма напруга, на колекторний перехід подається зворотна напруга; інверсний режим – на емітерний перехід подається зворотна напруга, на колекторний перехід подається пряма напруга.

Розглянемо активний режим роботи транзистора. Між одним шаром (емітером – «випромінювачем» вільних зарядів) та іншим шаром (базою – «передавачем» вільних зарядів) подають пряму напругу, тобто на один р-п-перехід. Між іншим шаром (колектором – «одержувачем» електронів) і базою подають зворотну напругу, тобто на другий р-п-перехід. В результаті один р-п-перехід буде відкритий, а другий р-п-перехід – закритий. Отже, у колі «емітер – база» буде протікати прямий електричний струм, а в колі «база – колектор» – зворотний електричний струм:

$$I_E = I_K + I_B, \quad (10.1)$$

- де I_E – сила струму, який протікає в емітері, A ;
 I_K – сила струму, який протікає в колекторі, A ;
 I_B – сила струму, який протікає в базі, A .

Таким чином, транзистор можна розглядати як пристрій, що розподіляє електричний струм (який протікає через один електрод – емітер), між двома іншими електродами (базою і колектором) у визначеному співвідношенні. Ця властивість транзистора використовується для підсилення електричного сигналу. Відношення зміни сили струму, який протікає в колекторі (ΔI_K), до зміни сили струму, який протікає в базі (ΔI_B), при незмінній напрузі між емітером і колектором називають коефіцієнтом передачі базового струму:

$$\beta = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B}. \quad (10.2)$$

Для транзисторів різних типів $\beta = 15 - 500$, тобто сила електричного струму, який протікає в колекторі, набагато більше сили струму, який протікає в базі.

Отже, якщо струм у базі, буде вхідним сигналом, а струм у колекторі – вихідним сигналом, то транзистор буде працювати в режимі підсилення вхідного електричного сигналу. У цьому випадку загальною точкою вхідного і вихідного електричного кола є емітер, а схему називають «із загальним емітером» (рис.10.14). Схему «із загальною базою» використовують для підсилення напруги (рис.10.15).

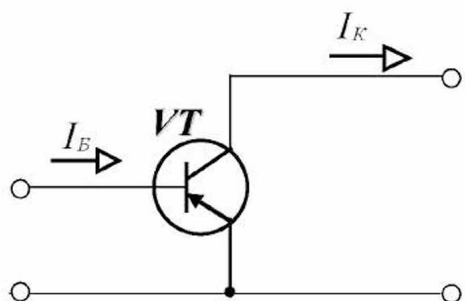


Рис.10.14

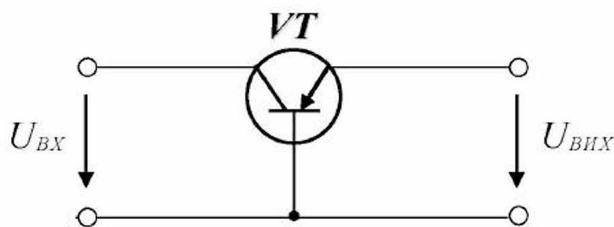


Рис.10.15

Запитання для самоконтролю

1. Який електронний пристрій називається біполярним транзистором?
2. Як біполярний транзистор позначається на принциповій електричній схемі?
3. Опишіть будову біполярного транзистора.
4. Перелічіть режими роботи біполярного транзистора.
5. Опишіть включення біполярного транзистора в режимі підсилення струму.
6. Що розуміється під коефіцієнтом передачі базового струму?
7. Опишіть включення біполярного транзистора в режимі підсилення напруги.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

1. Опис експериментальної установки

Експериментальна установка містить лабораторний автотрансформатор TV , діодний міст $VD1 \dots VD4$, навантажувальний резистор R_H , підключений до його вторинних затискачів. У вторинному колі діодного моста включено амперметр PA , послідовно з яким включений додатковий резистор R_D . Напругу з додаткового резистора подано на вхід осцилографа. Для комутації кола передбачений вимикач SA .

Принципова електрична схема експериментальної установки наведена на рисунку 1.

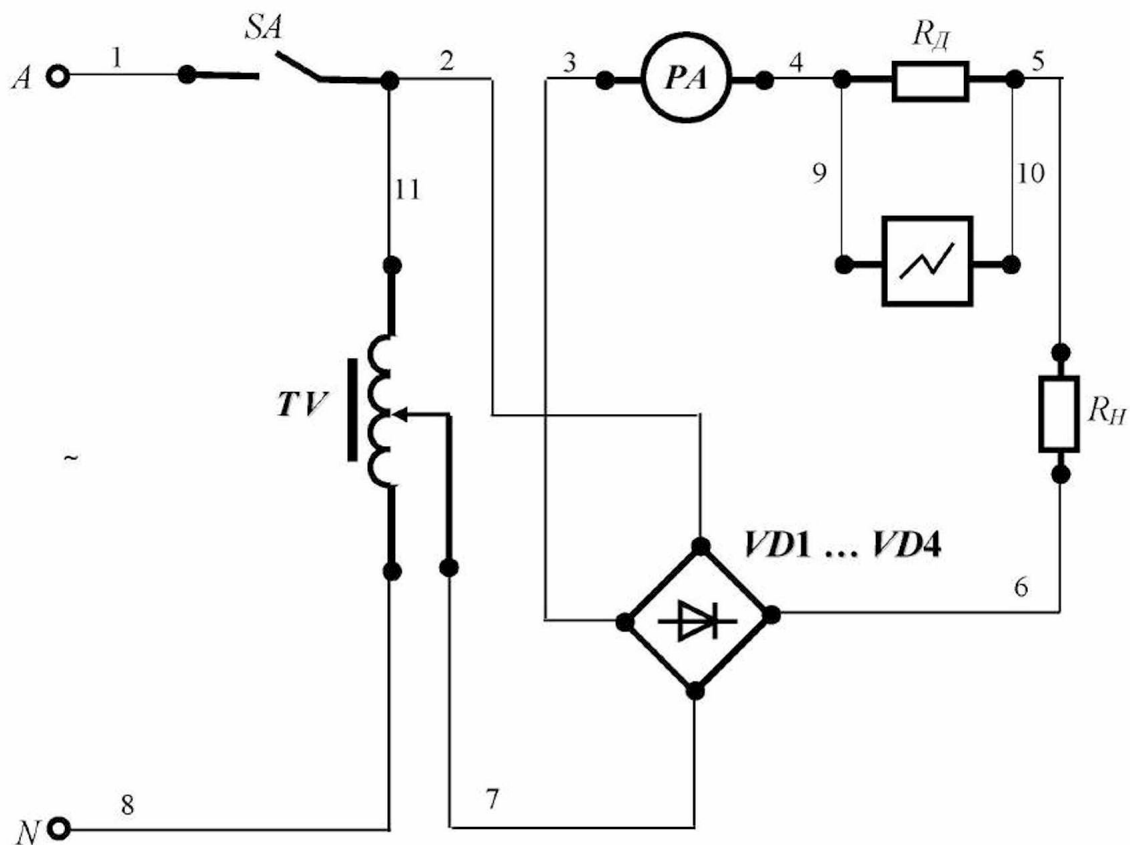


Рисунок 1 - Принципова електрична схема експериментальної установки.

Для складання схеми необхідно мати 11 провідників (на схемі позначені номерами 1-11).

2. Уміння, які здобуваються студентами в результаті виконання експериментального дослідження

- 2.1 Уміти скласти принципову електричну схему кола та зібрати її.
- 2.2 Уміти включити установку.
- 2.3 Уміти використовувати осцилограф для спостереження миттєвого струму.

3. Завдання з виконання експериментального дослідження

- 3.1 Зібрати схему експериментальної установки.
- 3.2 Подати напругу на затискачі експериментальної установки.
- 3.3 Здійснити візуальне спостереження миттєвого струму.

4. Структура звіту

- 4.1 Назва теми експериментального дослідження.
- 4.2 Принципова електрична схема експериментальної установки.
- 4.3 Графічна залежність миттєвого струму у функції часу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Овчаров, В.В. Теоретичні основи електротехніки, частина 1: Підручник [Текст] / В.В. Овчаров. – Мелітополь : Люкс, 2007. – 389 с.
2. Овчаров, В.В. Теоретичні основи електротехніки, частина 2: Підручник [Текст] / В.В. Овчаров. – Мелітополь : Люкс, 2007. – 215 с.
3. Назарьян, Г.Н. Электрические машины: Учебное пособие для вузов [Текст] / Г.Н. Назарьян. – Мелитополь : Люкс, 2011. – 827 с.
4. Гаев, Г.П. Электротехника и электроника: Учебник для вузов. В 3-х кн. Кн.3. Электрические измерения и основы электроники [Текст] / Г.П. Гаев, В.Г. Герасимов, О.М. Князьков и др.; Под ред. проф. В.Г. Герасимова. – М. : Энергоатомиздат, 1998. – 432 с.
5. Общая электротехника: Учебное пособие для вузов [Текст] / Под ред д.т.н. А.Т. Блажкина. – Л. : Энергоатомиздат, 1986. – 592 с.