

**ВІННИЦЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ПЕДАГОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ МИХАЙЛА КОЦЮБИНСЬКОГО**

**Факультет математики, фізики і технологій**

**Кафедра технологічної освіти, економіки  
та безпеки життєдіяльності**

***ЗАГАЛЬНА ЕЛЕКТРОТЕХНІКА***

***Навчальний посібник***

**Вінниця – 2017**

УДК 621.3(075,8)

ББК 31.2я73

МЗЗ

Рецензенти:

В.Ф. Заболотний докт. пед. наук, професор, зав. каф. фізики і методики навчання фізики, астрономії Вінницького державного педагогічного університету імені Михайла Коцюбинського.

В.Г. Дзись канд. тех. наук, доцент кафедри вищої математики, інформатики та математичної економіки Вінницького національного аграрного університету.

Рекомендовано до друку методичним семінаром кафедри технологічної освіти, економіки і безпеки життєдіяльності Вінницького державного педагогічного університету імені Михайла Коцюбинського (протокол №3, від 05.10.2016р.)

В початковому посібнику наведені лекції та методичні рекомендації щодо виконання лабораторних робіт, що відповідають навчальній програмі з курсу «Загальна електротехніка». Окремі лабораторні заняття з розділів «Електричні кола і їх параметри» і «Електровимірювальні прилади» розроблені для виконання в комп'ютерній програмі EWB.

Призначений для студентів вищих педагогічних закладів освіти напряму підготовки: 6.010103 «Технологічна підготовка», освітньо-кваліфікаційний рівень – бакалавр; 6.040203 «Фізика\*», освітньо-кваліфікаційний рівень – бакалавр. Може бути корисний для студентів технічних коледжів і ліцеїв, учнів ПТНЗ.

***Матвійчук А. Я. Електротехніка: навчально-методичний посібник/ Матвійчук А. Я., В. Л. Стінянський; Вінницький державний педагогічний університет ім. М.Коцюбинського.– Вінниця, 2017. -270 с.***

© Матвійчук А.Я., Стінянський В.Л., 2017

# З М І С Т

|                            |   |     |
|----------------------------|---|-----|
| Зміст                      |   | 3   |
| Передмова                  |   | 5   |
| Вступ                      |   | 7   |
|                            | Розділ 1 ЛЕКЦІЇ.  | 9   |
|                            | <i>Теми для повторення:</i>   |     |
|                            | 1. Явище електромагнітної індукції.                                       | 9   |
|                            | 2. Напівпровідникові випрямлячі.  | 12  |
|                            | 3. Сонячні батареї.   | 16  |
| Лекція 1.                  | Електроенергетика України.  | 19  |
| Лекція 2.                  | Параметри електричного кола постійного струму.                            | 34  |
| Лекція 3.                  | Лінійні електричні кола однофазного змінного струму.                      | 42  |
| Лекція 4.                  | Трифазні системи змінного струму.   | 54  |
| Лекція 5-6.                | Електричні вимірювання і прилади.   | 61  |
| Лекція 7.                  | Електричні джерела освітлення.  | 86  |
| Лекція 8.                  | Основні поняття про трансформатори.                                       | 98  |
| Лекція 9.                  | Робота силового трансформатора в режимі навантаження.                     | 108 |
| Лекція 10.                 | Асинхронні двигуни.   | 115 |
| Лекція 11.                 | Робота асинхронних двигунів та їх характеристики.                         | 124 |
| Лекція 12.                 | Однофазні асинхронні двигуни.   | 133 |
| Лекція 13.                 | Генератори постійного струму  | 138 |
| Лекція 14.                 | Колекторні двигуни.   | 155 |
| Лекція 15.                 | Синхронний генератор.   | 166 |
| Лекція 16.                 | Синхронні двигуни.  | 176 |
|                            | Розділ 2. ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ.   |     |
|                            | <i>Зразок звіту лабораторної роботи.</i>                                  | 182 |
| Лабораторна<br>робота № 1. | Дослідження законів для розрахунку електричних кіл.                       | 185 |
| Лабораторна<br>робота № 2. | Вивчення електровимірювальних приладів.                                   | 189 |
| Лабораторна<br>робота № 3. | Вимірювання напруги та розширення меж вимірювання<br>вольтметра.          | 191 |
| Лабораторна<br>робота № 4. | Вимірювання сили струму та розширення меж вимірювання<br>амперметра.      | 195 |
| Лабораторна<br>робота № 5. | Вимірювання опорів.   | 198 |
| Лабораторна<br>робота № 6. | Вимірювання потужності та енергії в електричних колах<br>змінного струму. | 201 |
| Лабораторна<br>робота № 7. | Дослідження характеристик електричних джерел<br>освітлення.               | 204 |

|                          |  |     |
|--------------------------|--|-----|
| Лабораторна робота № 8.  | Аналіз та розрахунок нерозгалуженого кола однофазного струму.  | 207 |
| Лабораторна робота № 9.  | Дослідження трифазного електричного кола змінного струму при з'єднанні споживачів «зіркою» і «трикутником».      | 211 |
| Лабораторна робота № 10. | Дослідження лінійного електричного кола постійного струму.   | 215 |
| Лабораторна робота № 11. | Дослідження роботи однофазного силового трансформатора.  | 219 |
| Лабораторна робота № 12. | Дослідження трифазного асинхронного двигуна.   | 222 |
| Лабораторна робота № 13. | Дослідження генератора постійного струму паралельного та змішаного збуджень.                                     | 226 |
| Лабораторна робота № 14. | Дослідження роботи двигуна постійного струму з послідовним та паралельним збудженням.                            | 230 |
| Лабораторна робота № 15. | Дослідження універсального двигуна.  | 234 |
| Лабораторна робота № 16. | Дослідження параметрів змінного струму.  | 238 |
| Лабораторна робота № 17. | Дослідження параметрів електричного кола при паралельному з'єднанні двох або більше генераторів змінного струму. | 242 |
| Лабораторна робота № 18. | Дослідження лінійного електричного кола постійного струму.   | 245 |
| Лабораторна робота № 19. | Дослідження трифазного електричного кола змінного струму при з'єднанні споживачів зіркою та трикутником.         | 248 |
| Лабораторна робота № 20. | Дослідження напівпровідникових випрямлячів.  | 252 |
| Лабораторна робота №21   | Дослідження розгалуженого кола змінного струму.  | 257 |
| Лабораторна робота №22   | Дослідження трифазного трансформатора.   | 260 |
| Лабораторна робота №23   | Дослідження роботи синхронного трифазного генератора на його моделі.   | 263 |
| Лабораторна робота №24   | Дослідження сонячних батарей.  | 266 |
| Список літератури        |  | 270 |

## Передмова

Сьогодні без електроенергії ми не можемо уявити своє життя, хоча ще зовсім недавно, за історичними мірками, поняття «електрика» було невідомим і не зрозумілим для людства. Завдяки електроенергії забезпечується нормальний побут в оселях, вирощується врожай на сільській ниві, плавиться метал в печах; без електроенергії не зможе розвиватися практично жодна з сучасних галузей народного господарства: атомні станції, військові комплекси, фабрики, заводи, ферми, дослідні інститути, лікарні – всі вони використовують електричну енергію. Електрична енергія живить ЕОМ, верстати, освітлювальні прилади в хірургічних відділеннях, апарати, які підтримують штучне дихання, електропотяги і міський транспорт, банківська система і зв'язок, телебачення тощо. Раптове зникнення електрики в сучасному світі спричинило б величезну катастрофу.

Перші наукові узагальнення про магнітні та електричні явища, про існування магнітного поля Землі здійснено У. Гілбертом у 1600 році у праці «Про магніт, магнітні тіла та про великий магніт Землю».

У 1650 році Отто Геріке побудував першу електростатичну машину. Приблизно через століття Дюфе відкрив існування двох родів електричних зарядів: скляного і смоляного, а Е.Ю. фон Клейст і П. ван Мушенбрук створили лейденську банку (перший конденсатор).

Найбільше фундаментальних відкриттів здійснено у 19 сторіччі плеядою науковців різних країн, у тому числі й вітчизняних. У 1785 році Кулон винайшов крутильну вагу, завдяки якій встановив закон взаємодії електричних зарядів (Закон Кулона), Вольта створив гальванічний елемент. 1820 рік можна відзначити цікавими публікаціями Ерстеда про дію магнітного поля на магнітну стрілку; Ампера про взаємодію струмів (закон Ампера); Араго про створення магнітного поля провідником, у якому протікає струм та ін. Фундаментальні відкриття Фарадея, Ома, Ленца, Якобі, Джоуля, Кірхгофа, Максвела, Зеебека та ін. створили теоретичне підґрунтя для використання електромагнітних явищ у практичних цілях.

Саме практичному застосуванню законів електромагнетизму присвятили низку відкриттів вітчизняні науковці та інженери, до яких можна віднести Б.С. Якобі, А.Г. Столетов, А.Н. Лодигін, П.Н. Яблочков, М.О. Доліво-Добровольський та ін. Так, Доліво-Добровольський уперше в 1988-1989 р.р. здійснив відкриття системи трифазного струму, створив трифазний трансформатор та асинхронний двигун, якими користується людство по цей день.

Електроенергія має переваги серед інших видів енергії завдяки зручності її виробництва, передачі, керуванню, екологічності та ін. Її використовують у промисловості, сільському господарстві, транспорті, побуті, соціальній сфері тощо. Без електрики неможливі успіхи в медицині, біології, екології інших галузях науки.

Одним з критеріїв за якими визначають рівень розвиненості країни є кількість споживаної електричної енергії. Останніми роками виробництво електричних потужностей на особу в США становить 10 кВт., у світі 5 кВт., в Україні – приблизно 7 кВт., а до кінця століття, за прогнозами фахівців, цифри подвояться.

Виробництво електроенергії здійснюється на електростанціях, що працюють переважно на невідновлювальних джерелах (органічному та ядерному паливі): вугільних, мазутних, газових, газо-мазутних, атомних. Природне паливо вичерпується досить швидкими темпами, тому перспектива за електростанціями, що працюють на відновлювальних джерелах енергії: вітер, Сонце, вода, біовідходи тощо.

Від електростанцій до споживачів електричну енергію доставляють лініями електропередач (ЛЕП). ЛЕП являє собою складну систему керування, розподілу та передачі енергії. До її складу входять провідники, трансформатори та система керування.

Наука, що вивчає питання практичного застосування електромагнітних явищ у процесі виробництва, передачі, розподілу та використання електричної енергії, називається електротехнікою.

## Вступ

Запропонований посібник є розширеним і доповненим виданням практикуму з електротехніки 2012 року. У ньому два розділи. У першому розділі 15 лекцій; у другому 20 лабораторних робіт, 5 із них – віртуальні. На початку посібника дається коротке повторення окремих питань загальної фізики, які лежать в основі принципу дії електроприладів, пристроїв та машин.

Мета лекційного курсу та лабораторного практикуму – поглибити теоретичні знання студентів, майбутніх вчителів фізики і технологічної освіти, з основами загальної електротехніки; познайомити їх з можливостями застосування комп'ютерних програм при розрахунках та дослідженнях параметрів електричних кіл, розвинути практичні навички в цій галузі під час виконання реальних та віртуальних лабораторних робіт.

Завдання даного посібника – допомогти майбутнім учителям фізики та технологічної освіти засвоїти такі основні питання з електротехніки:

- сучасний стан, перспективи, напрямки і проблеми розвитку електроенергетики в Україні;
- основні методи розрахунку електричних кіл постійного і змінного струмів та можливості застосування комп'ютерних програм при цьому;
- способи розрахунку параметрів електричних кіл постійного та змінного струмів з активним та реактивним навантаженнями;
- особливості розрахунку параметрів трифазних систем змінного струму;
- побудова векторних діаграм параметрів електричних кіл, приладів і машин;
- основні види електровимірювальних приладів, їх призначення, будова і принцип дії;
- методи електричних вимірювань;
- призначення, будова, принцип дії та розрахунок основних параметрів силових трансформаторів;
- будова і принцип дії спеціальних трансформаторів: трифазних силових, зварювальних, вимірювальних та автотрансформаторів;

- призначення, будова і принцип дії трифазних та однофазних асинхронних двигунів, розрахунок їх основних параметрів;
- призначення, будова і принцип дії синхронних машин;
- призначення, будова, принцип дії та розрахунок основних параметрів машин постійного струму;
- призначення, будова, принцип дії колекторних двигунів змінного струму.

На основі здобутих теоретичних знань допомогти студентам набути такі практичні уміння:

- читати електричні схеми та складати за ними електричні кола;
- користуватися електровимірювальними приладами;
- розраховувати параметри електричних кіл постійного та змінного струму;
- застосовувати комп'ютерні програми при дослідженні простих електричних кіл;
- досліджувати основні характеристики електричних машин постійного і змінного струмів та синхронних машин;
- досліджувати характеристики трансформаторів;
- виконувати розрахунки, будувати графіки та векторні діаграми електричних параметрів кіл, трансформаторів та електричних машин;
- ставити досліди в школі при викладанні розділу «Електротехнічні роботи» на уроках трудового навчання.

Більшість лабораторних досліджень пропонується до виконання традиційно, з використанням реальних приладів, пристроїв, машин тощо. Інша частина робіт виконується віртуально, завдяки комп'ютерній програмі EWB. Насамперед, це стосується дослідження параметрів електричних кіл постійного та змінного струмів, дослідження напівпровідникових приладів.

Виконанню лабораторних робіт передують самостійна домашня підготовка, у процесі якої студент з'ясовує мету і зміст роботи, знайомиться з робочим завданням, опрацьовує теоретичний матеріал за даним посібником та іншою літературою, розв'язує свій варіант задачі, виконує робочу схему і готує таблицю для занесення результатів вимірювань.



На початку заняття викладач перевіряє готовність кожної бригади до виконання відповідної лабораторної роботи і дає дозвіл на складання електричного кола та виконання вимірювань. Допускаються до роботи ті студенти, які добре знають необхідний теоретичний матеріал, усвідомили практичне завдання і послідовність його виконання, ознайомились з особливостями техніки безпеки і пожежної безпеки при виконанні лабораторної роботи.

Захист лабораторної роботи відбувається на наступних заняттях або у спеціально відведений час після занять. До захисту допускаються роботи виконані та оформлені відповідно до наведеного зразку.

# Розділ 1

## ЛЕКЦІЇ

### Теми для повторення:

1. Явище електромагнітної індукції.
2. Напівпровідникові випрямлячі.
3. Сонячні батареї.

### Література:

1. Бушок Г.Ф. Курс фізики: Навч. посіб. Оптика. Фізика атома та атомного ядра. У 3 кн. / Г.Ф. Бушок, Є.Ф. Венгер. - К.: Вища шк., 2003. Т. 2, Т.3.
2. Кучерук І.М. Загальний курс фізики: У 3 т.: Навч. пос. для студ. вищ. техн. і пед. навч. закл. освіти І.М. Кучерук, І.Т. Горбачук / За ред. І.М. Кучерука. – К.: Техніка, 1999. Т.3. Оптика. Квантова фізика. – 520 с.
3. Мачулін В., Литовченко В., Стріха М. Сонячна енергетика: порядок денний для світу й України // Вісник Національної академії наук України. Загальнонауковий та громадсько-політичний журнал. — 2011, №5.
4. <https://uk.wikipedia.org/wiki/>.

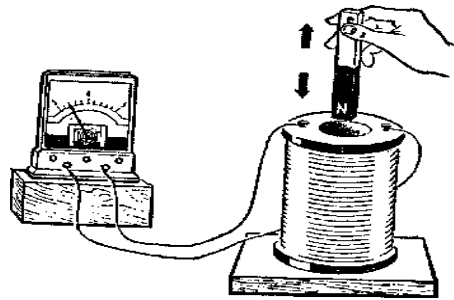
### 1. Електромагнітні явища

Дія електричних приладів, апаратів, електричних машин базується, насамперед, на явищах електромагнітної індукції та сили Ампера. Закони електромагнітної індукції та Ампера вивчалися на уроках фізики СЗОШ, а також під час вивчення курсу загальної фізики. Коротко зупинимось на цих досить важливих двох питаннях.

Явище електромагнітної індукції можна пояснити на таких дослідах:

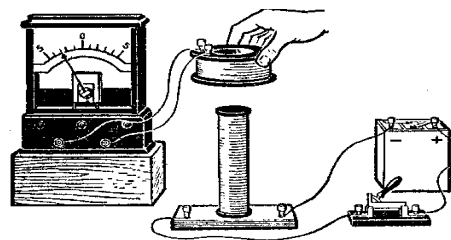
1. Рухаючи постійний магніт поступально відносно соленоїда, у його витках буде індукуватись ЕРС, про що свідчить відхилення стрілки гальванометра, під'єданого до кінців котушки (рис. 1). Напрямок струму в

електричному колі змінюється залежно від того, наближаємо чи віддаляємо постійний магніт відносно соленоїда.



*Рис. 1. Демонстрація виникнення ЕРС при русі постійного магніту відносно соленоїда.*

2. Якщо котушку малого діаметра під'єднати до джерела постійного струму, а котушку більшого діаметра до гальванометра, то при русі однієї котушки відносно іншої, стрілка гальванометра відхилиться (рис.2). Це означає, що на кінцях соленоїда виникає ЕРС.



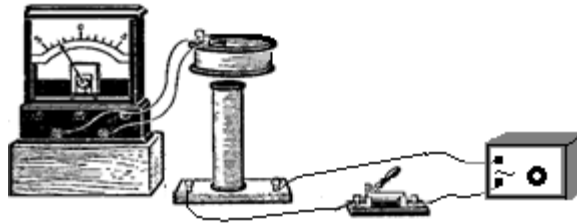
*Рис. 2. Демонстрація виникнення ЕРС при русі соленоїда відносно електромагніту.*

Якщо в обох дослідах постійний магніт (у другому досліді електромагніт) не рухати відносно соленоїда, то стрілка приладу не покаже наявності ЕРС. Отже ЕРС виникає в соленоїді тоді, коли в його середині магнітне поле змінюється – наростає або спадає. Величина ЕРС у соленоїді залежить від характеристики самої котушки та швидкості зміни магнітного потоку в ній:

Де: — — швидкість зміни магнітного потоку;

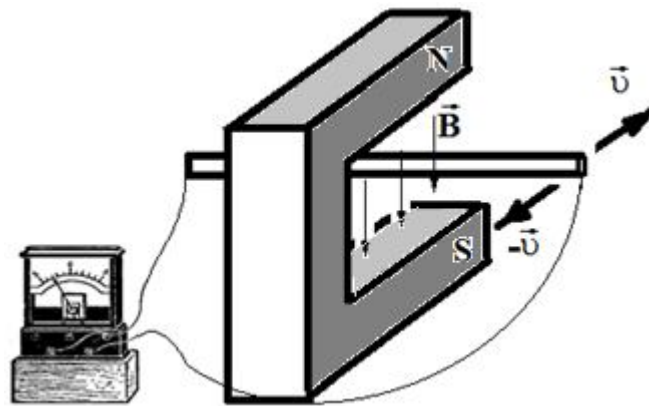
– кількість витків у соленоїді.

3. У другому досліді, замінивши джерело постійного на джерело змінного струму, в соленоїді виникне ЕРС і при нерухомих котушках (рис. 3). Адже в середині соленоїда магнітне поле буде змінним, так як воно створюється змінним струмом.



*Рис. 3. Демонстрація виникнення ЕРС при живленні котушки малого діаметра від джерела змінного струму.*

4. При русі провідника між полюсами магніту на його кінцях також виникатиме ЕРС індукції, про що засвідчить відхилення стрілки гальванометра (рис. 4). Напрямок ЕРС, а отже й струму, що протікає по гальванометру залежить від напрямку руху провідника. Величину ЕРС вираховують з формулою:  $e = Blv \cdot \sin\alpha$



*Рис. 4. Дослід, що пояснює індукування ЕРС у провіднику, якщо його рухати в магнітному полі зі швидкістю  $v$ .*

Напрямок ЕРС визначають за правилом «правої руки»: вектор магнітної індукції  $B$  направлений в долоню (напрямок вектора  $B$  – від північного полюса до південного); великий відігнутий палець вказує напрям руху провідника (швидкості  $v$ ), а чотири пальці покажуть напрям ЕРС –  $E$ .

**Сила Ампера** пояснюється явищем дії магнітного поля на провідник зі струмом. Якщо до провідника під'єднати джерело постійного струму (рис.5), то протече постійний струм і на нього діятиме сила Ампера з боку магнітного поля. Напрямок сили залежить від напрямку протікання струму та розташування полюсів магніту і визначається за правилом «лівої руки».

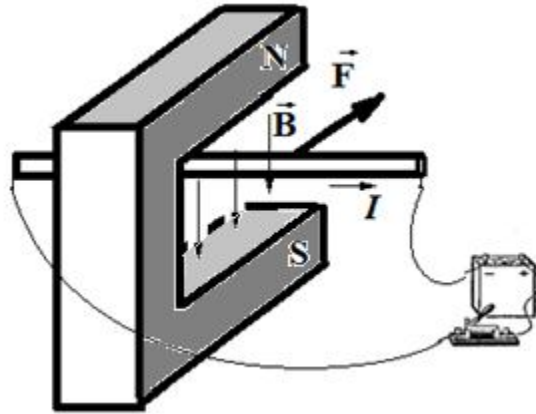


Рис. 5. Дослід до пояснення сили Ампера.

Праву руку розташовують так, щоб вектор  $\vec{B}$  входив у долоню, чотири пальці вказують напрям протікання струму, тоді відігнутий великий палець вказує напрям дії сили Ампера  $\vec{F}$ .

Величина сили обчислюється за формулою:  $F = BIl \cdot \sin \alpha$ .

## 2. Напівпровідникові випрямлячі

З фізики відомо, що напівпровідники не належать ні до провідників, ні до діелектриків. Характерним є те, що чисті напівпровідники мають слабку провідність, яка з підвищенням температури зростає. До них належать деякі чисті хімічні елементи, такі як кремній –  $Si$ , германій –  $Ge$ , селен –  $Se$ , а також оксиди і сульфід металів.

Розрізняють провідність напівпровідникових матеріалів власну і домішкову. Власну провідність мають чисті напівпровідникові матеріали, а сплави напівпровідника з іншими хімічними елементами – домішкову. На відміну від власної домішкова провідність вища.

Сплави напівпровідників з іншими хімічними елементами можуть мати  $p$ –, або  $n$ – провідність залежно від домішки.

Наприклад, якщо до складу 4 – валентного германію у якості домішки ввести 3 – валентний індій, то між атомами відбудеться парноелектронний зв'язок. У такому зв'язку в атомів індію не вистачатиме одного електрона для парного зв'язку з германієм, тому утвориться вакансія, або так звана «дірка». У таких напівпровідникових матеріалах матимемо «діркову» провідність (напівпровідник  $p$ -типу).

Якщо ж до чистого германію ввести домішку 5 – валентного миш'яку, то у парноелектронному зв'язку зайвим буде один його електрон. Очевидно, провідність будуть здійснювати вільні електрони, і такий сплав називається напівпровідником  $n$  – типу.

При тісному контакті напівпровідників з різною провідністю на межі їх розділу утвориться запірний шар (рис. 1). Пояснюється це явище дифузією вільних електронів від напівпровідника  $n$ -типу до напівпровідника  $p$ -типу.

У цьому випадку з одного боку межі поділу напівпровідників концентруються негативно заряджені вільні електрони, які дифундують до напівпровідника  $p$ -типу; по іншу – позитивно заряджені «дірки». Тому між негативно зарядженими електронами і некомпенсованими ядрами на межі поділу напівпровідникових матеріалів різної провідності виникне електричне поле, яке й спричинить запірний шар, який перешкоджатиме подальшій дифузії заряджених

частинок.

Якщо ж до такого приладу під'єднати джерело постійного струму, то при умові, що вектор електричного поля цього джерела співпадає за напрямком з вектором напруженості електричного поля запірного шару, ширина останнього зросте. У такому випадку сила зворотного струму  $I_{зв}$  буде незначною. При збільшенні напруги  $U_{зв}$  сила струму дещо зростатиме, але в незначній мірі, що й зображено на вольт-амперній характеристиці (рис. 2).

Коли ж напрям електричного поля буде зустрічним до напрямку електричного поля запірного шару, то прилад працюватиме в режимі провідності. При збільшенні напруги  $U_{пр}$  джерела запірний шар звужуватиметься, а сила прямого струму  $I_{пр}$  зростатиме. Такий прилад, як відомо, називають діодом.

Залежність сили струму провідності від величини напруги на кінцях діода, називають вольт-амперною характеристикою, яка зображена на рис. 7.

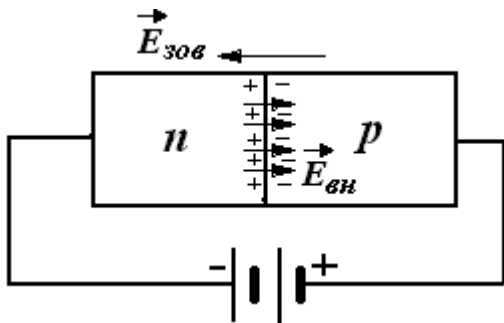


Рис. 1. Схематичне зображення напівпровідникового діода.

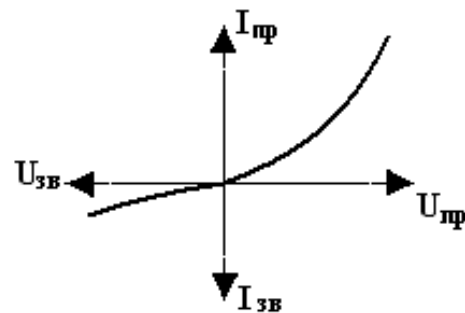


Рис. 2. Вольт-амперна характеристика напівпровідникового діода.

Для виготовлення випрямлячів змінного струму найчастіше використовують напівпровідникові діоди (вентилі) різної потужності. Способи ввімкнення вентилів у випрямлячах залежать від струму електромережі – однофазний або трифазний; виду випрямленого струму – однопівперіодне або двопівперіодне випрямлення; у свою чергу схеми двопівперіодного випрямлення бувають з середньою точкою трансформатора або містковою схемами.

Розглянемо способи випрямлення струмів, залежно від схеми ввімкнення вентилів.

Схема однопівперіодного випрямлення (рис. 3) дає змогу отримати пульсуючу напругу (силу струму) на споживачеві з «втратою» одного півперіоду,

саме того, при якому діод запертий.

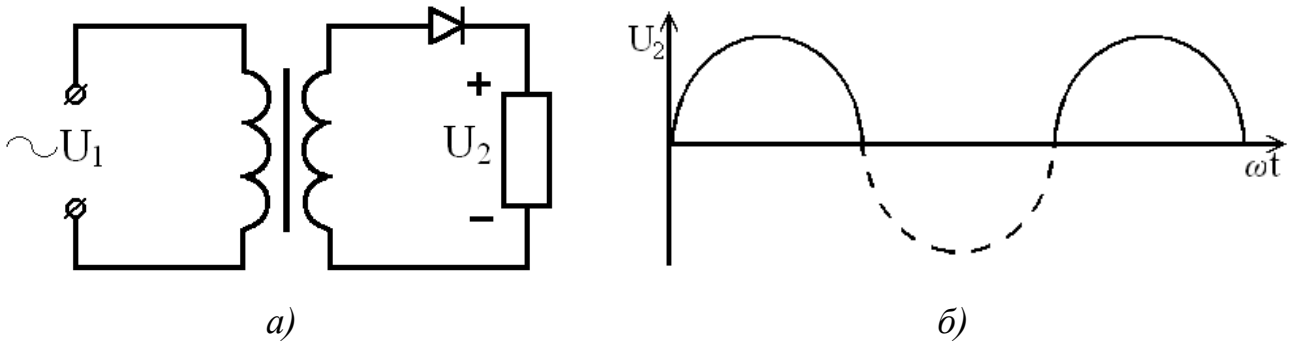


Рис. 3. Однопівперіодне випрямлення: а) - схема; б) - графік.

Електрична схема двопівперіодного випрямлення забезпечує протікання струму в одну сторону на споживачеві протягом обох півперіодів (рис. 4 а). Очевидно пульсація напруги і сили струму на споживачеві збільшиться удвічі, що відображено на графіку, зображеному на рис. 4 б.

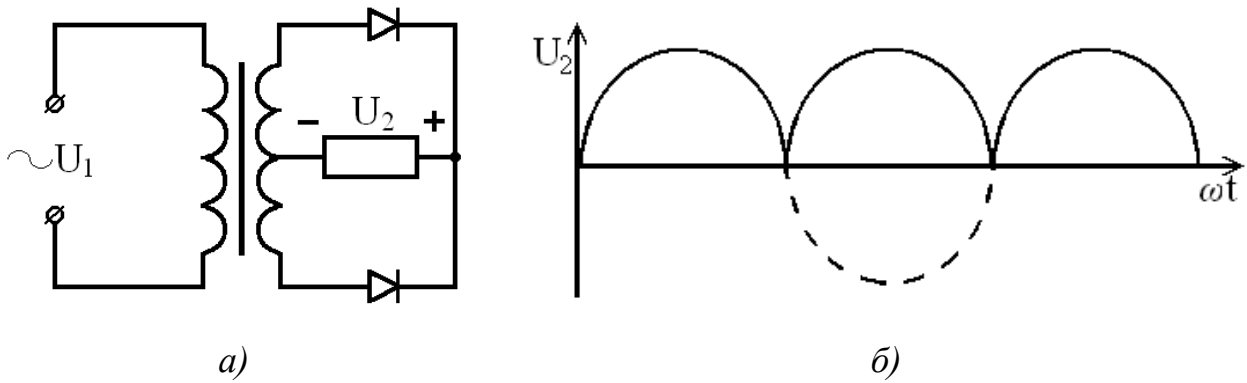
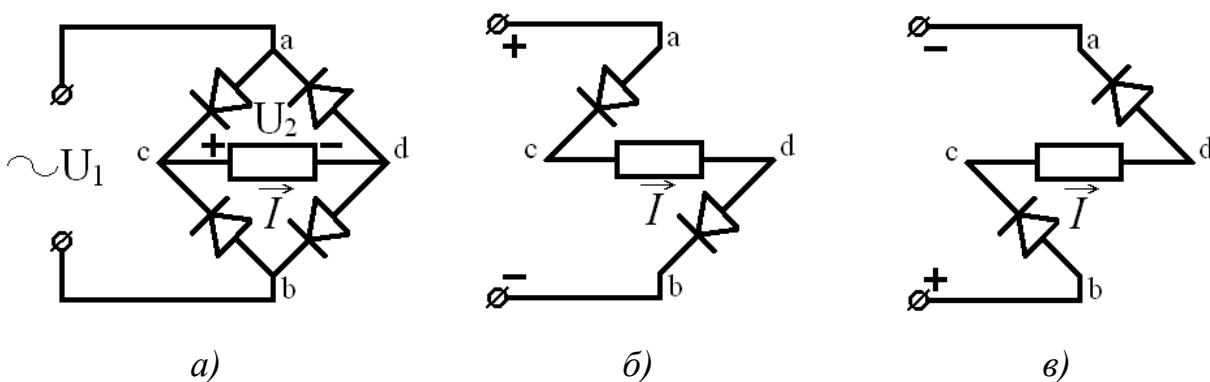


Рис. 4. Двопівперіодне випрямлення однофазного змінного струму за схемою середньої точки трансформатора: а) – схема; б) – графік.

Двопівперіодне випрямлення часто здійснюють випрямлячами, які працюють на основі місткової схеми (рис. 5). Якщо підвести змінну напругу до діодного містка у вузлах *a-b*, то на споживачеві між вузлами *c-d* струм *I* завжди протікатиме в одну сторону (на рисунку 5 а-в зліва на право).





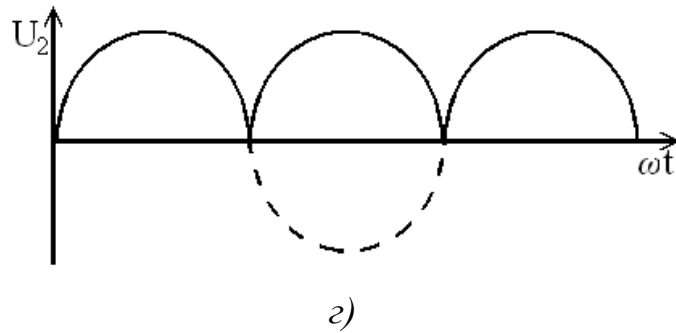


Рис. 5 Місткова схема: а) – схема; б, в) – елементи схеми; г) – графік.

Дійсно, з рисунка 3-б слідує, що провідність діодів забезпечує напрям електричного струму від вузла *c* до вузла *d*. Якщо у вузлі *a* потенціал вищий "+", а вузлі *b* "-", то струм протікатиме в напрямку від вузла *c* до вузла *d*.

Якщо ж через півперіоду потенціал у вузлі *a* "-", а в точці *b* "+", то струм, що потрапляє на споживач, матиме той самий напрямок (рис. 5-в). Характер випрямленого струму діодним містком Греца зображено на графіку – рисунок 7-г.

У трифазних електричних колах, подібно до однофазних, використовують схеми випрямлячів з середньою точкою трансформатора(рис. 6) та діодні мости (рис. 7).

Для усунення пульсацій у випрямлячах використовують різного роду фільтри.

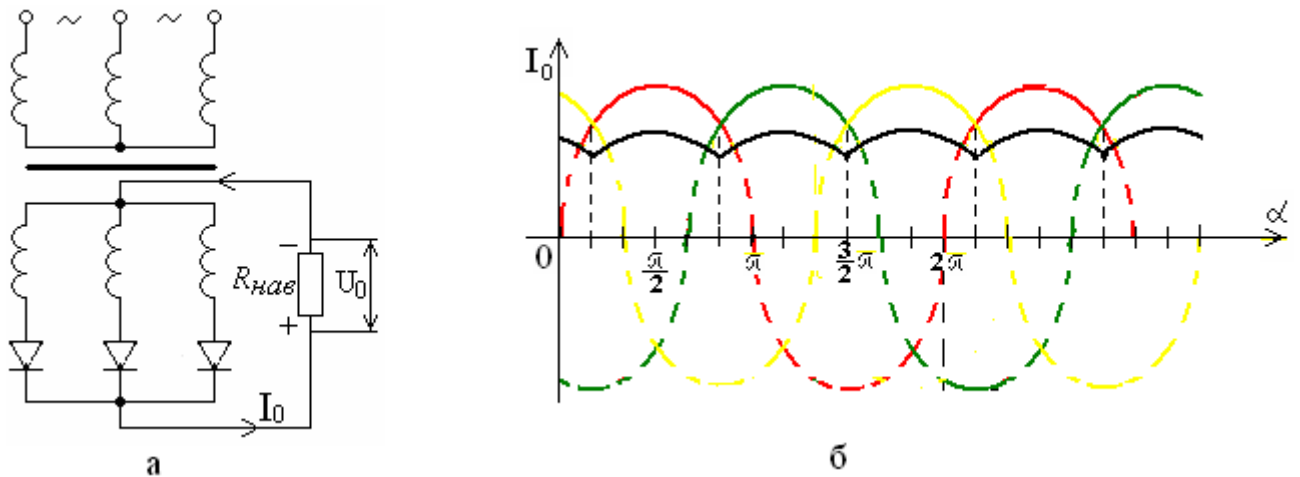


Рис. 6. Схема випрямляча з середньою точкою трансформатора для трифазного кола – а, графік випрямленого струму - б.

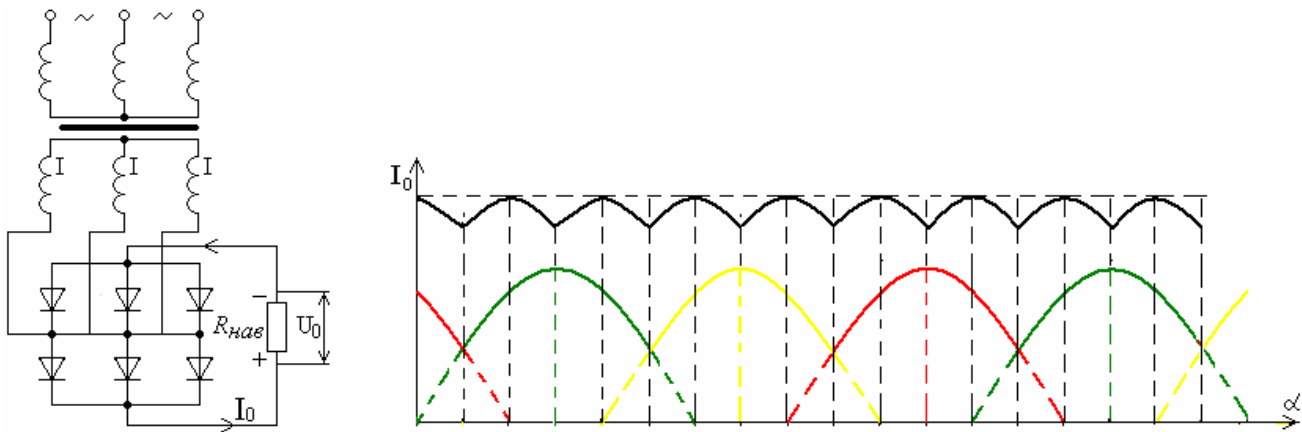


Рис. 7. Схема діодного моста для випрямляча трифазного струму - а та графік випрямленого струму - б.

### 3. Сонячні батареї

«Сонячні батареї» - умовна назва пристроїв, які перетворюють променеву енергію Сонця в електричну енергію.

Принцип дії сонячних батарей базується на явищі внутрішнього фотоефекту та явищі утворення запірного шару на межі з'єднання напівпровідникових матеріалів з різною провідністю (*p-n* перехід).

Внутрішній фотоефект виникає у напівпровідниках та діелектриках. Це явище можна пояснити на основі зонної теорії електропровідності. Так, для напівпровідників із власною електропровідністю, під дією світла можливий перехід електрона з валентної зони в зону провідності (рис. 1), що призводить до збільшення концентрації електронів у провідному та «дірок» у валентному шарі.

Для напівпровідників *n*-типу під дією світла відбувається перехід електрона з донорного рівня в зону провідності; у напівпровідниках *p*-типу під дією світла електрон переходить із валентної зони на акцепторний рівень, що призводить до збільшення концентрації дірок у валентній зоні. У всіх наведених випадках у напівпровідниках під дією світла збільшується концентрація носіїв струму, тобто зростає їх електропровідність. [1, 243]

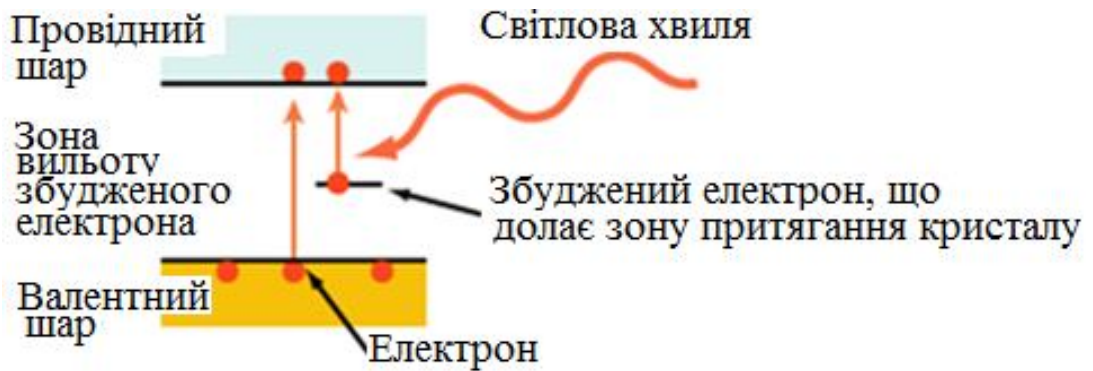


Рис.1. Схема пояснення механізму утворення внутрішнього фотоефекту.

Перерозподіл електронів напівпровідника за енергетичними станами під дією світла може призвести також до зміни внутрішнього електричного поля в кристалі. Це є причиною виникнення електрорушійної сили (фото-ерс) на межі контакту двох напівпровідників з різними типами домішкової провідності (*p-n* перехід) або на межі контакту напівпровідника і металу (вентильний фотоефект).

Відзначені явища покладено в основу принципу дії так званих фотоелектричних комірок. Фотоелектрична комірка (сонячна комірка, сонячний елемент, фотогальванічний елемент, фотоелектричний перетворювач (ФЕП), фотоелемент) - це електричний пристрій, який діє як перетворювач частини світлової енергії (як правило, видимих і інфрачервоних електромагнітних хвиль) в електричну.

Принцип дії фотоелементів здійснюється на напівпровідниковому *p-n* переході. Тобто, при поглинанні фотона в області, яка прилягає до *p-n* переходу, створюється пара носіїв заряду: електрон і «дірка». Одна із цих часток є неосновним зарядом і з великою ймовірністю проникає крізь перехід. У результаті чого заряди, створені завдяки поглинанню енергії фотона, розділяються в просторі й не можуть рекомбінувати. Як наслідок порушується рівновага густини зарядів (рис. 2). При під'єднанні елемента до зовнішнього навантаження у колі протікає струм.[1, 244]

Певна кількість фотоелектричних комірок, відповідним чином з'єднаних між собою, загорнутих в пластик або скло, скріплених алюмінієвою рамкою для жорсткого зв'язку і захисту - називаються сонячною панеллю.

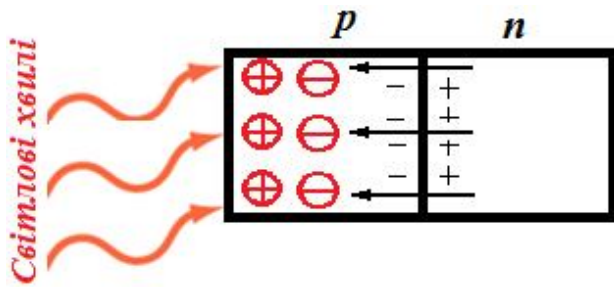


Рис. 2. Схематичне зображення процесу утворення фото-ерс.

Напруга холостого ходу, яка генерується одним елементом при номінальній освітленості, становить близько 0,6 В. Ця величина не залежить від розмірів елемента та його надлишкової освітленості (понад номінальне значення). Щоб підвищити вихідну напругу сонячні елементи з'єднують послідовно, утворюючи панель. Недоліком такого з'єднання є зменшення їх надійності, оскільки в разі виходу з ладу одного елемента (або просто потрапляння його в тінь) зменшується струм у цілій батареї в цілому.

Фотоелементи виготовляють з різноманітних напівпровідникових матеріалів. В даний час використовується для фотоелектричних сонячних елементів такі матеріали: монокристалічний кремній, полікристалічний кремній, аморфний кремній, телурид кадмію, арсенід галію, сульфат кадмію та ін. Процес виготовлення фотоелемента близький до процесів виготовлення інших напівпровідникових приладів.

У космічних апаратах використовують переважно багатоперехідні сонячні елементи або гетерофотоелементи. Такий елемент складається з декількох р-п переходів (AlGaAs-GaAs), кожен з яких поглинає світло певного спектру. Такі сонячні елементи мають найвищу ефективність - близько 35 %. Складність технології їх виготовлення, а отже висока собівартість, перешкоджає широкому промислового їх виробництву.

Сонячні панелі, до недавнього часу, використовували переважно в автономних системах, які, зазвичай, тривалий період часу не вимагають обслуговування оператором (автоматичні прилади радіонавігації, космічні апарати та ін.), а також використовувались для електропостачання у віддалених районах Землі або на орбітальних станціях, супутниках і ін. Тобто у випадках, коли неможливо використовувати електромережу. Мініатюрні сонячні панелі

вмонтовують у калькулятори від яких заряджаються вбудовані акумулятори, а також для живлення радіотелефонів, зарядних пристроїв, насосів тощо.

Останнім часом сонячні панелі широко використовують в побуті, при виготовленні дахів будівель, оздобленні балконів та ін.

Звичайно, найважливішим у використанні сонячних батарей є створення сонячних електростанцій (СЕС). В Україні широко використовуються потужні СЕС, що займають великі площі сонячних панелей. У 2016 році діючі потужності сонячної енергетики досягли майже двох тисяч мегават. У порівнянні – це приблизно два енергоблоки АЕС. І це лише початок розбудови альтернативної енергетики.

У таблиці 1 наведено приблизні потужності СЕС окремих областей станом на 2016 рік.

Таблиця 1

| <i>№</i> | <i>Область</i>    | <i>МВт</i> |
|----------|-------------------|------------|
| 1.       | Вінницька         | 133        |
| 2.       | Дніпропетровська  | 44         |
| 3.       | Донецька          | 13         |
| 4.       | Житомирська       | 15         |
| 5.       | Закарпатська      | 64,4       |
| 6.       | Запорізька        | 40,5       |
| 7.       | Івано-Франківська | 25,6       |
| 8.       | Київська          | 72         |
| 9.       | Кіровоградська    | 184,4      |
| 10.      | Крим              | 241,5      |
| 11.      | Луганська         | 0,03       |
| 12.      | Львівська         | 100,3      |
| 13.      | Миколаївська      | 31,8       |
| 14.      | Одеська           | 257,7      |
| 15.      | Рівненська        | 8          |
| 16.      | Харківська        | 11,207     |

|     |             |       |
|-----|-------------|-------|
| 17. | Херсонська  | 377,2 |
| 18. | Херсонська  | 377,2 |
| 19. | Хмельницька | 31    |
| 20. | Черкаська   | 100,3 |
| 21. | Чернівецька | 26    |

На 2017 рік урядом України планується будівництво потужних сонячних електростанцій у забрудненій Чорнобильській зоні та інших регіонах України. Провідним виробником сонячних батарей у нашій країні є ВАТ «Квазар».

## **Лекція 1. Електроенергетика України.**

1. Вступ.
2. Перспективи розвитку електроенергетики в Україні.
3. Перспективи розвитку сонячної енергетики.
4. Перспективи використання енергії вітру.
5. Енергетика на основі біогазу.

### **Література:**

Л-14 с. 221-224.

### **1. ВСТУП**

**Наука, що вивчає питання практичного застосування електромагнітних явищ у процесі виробництва, передачі, розподілу та використання електричної енергії, називається електротехнікою.**

Широке коло сучасних сфер діяльності людини не можуть існувати без використання значної кількості енергії. Її споживання непинно і систематично зростає, за деякими даними через 5-7 років її споживання подвоюється.

Серед різних видів енергії, що використовується людством – біологічна, механічна, теплова, електрична та інші, на першому місці знаходиться електрична енергія. Вона широко використовується в сучасній промисловості, сільському господарстві, військовій справі, сфері обслуговування, побуті тощо. Важко відшукати галузь виробництва, сфери обслуговування або просто будь-який прилад чи пристосування, де б не використовувалась електрична енергія.

Її широке застосування пояснюється, насамперед, перевагами перед іншими видами енергії. Пріоритети електричної енергії проявляються в наступному:

1) її зручно, порівняно легко, економічно вигідно і при малих втратах передавати на великі відстані;

2) вона унікальна ще і в тому, що лише промениста енергія може конкурувати з нею за дальністю і швидкістю передачі;

3) електроенергію порівняно легко отримувати концентровано та у великій кількості;

4) вона просто перетворюється в інші види: механічну, теплову, світлову, хімічну, звукову і навпаки. Наприклад, електродвигуни обертають верстати завдяки електричній енергії, що перетворюється в механічну; електронагрівальні прилади перетворюють її в теплову; яскравим світлом горять електричні лампи – виникає світлова енергія; несуться до радіоприймачів електромагнітні хвилі – електрична енергія перетворюється в електромагнітну, а в самому радіоприймачі електромагнітна енергія перетворюється у звукову; при заряджанні акумуляторів (електролізі) електрична енергія перетворюється в хімічну і т.і.;

5) електроенергією зручно і порівняно просто керувати. Легкий натиск на кнопку магнітного пускача і вмикається електродвигун, незначний рух вимикача – вмикається електролампа освітлення. Ця властивість дала змогу розвинути механізацію і особливо автоматизацію в промисловості та побуті. Завдяки електриці став можливий розгалужений і швидкий електричний зв'язок за наявності проводів і без них – радіо та радіо супутниковий зв'язок між будь-якими віддаленими пунктами, країнами, материками і, навіть, планетами. Звукове й об'ємне кіно та телебачення, дія яких цілком ґрунтується на електриці, глибоко увійшли в наше повсякденне життя;

6) вона відрізняється високою ступінню подільності. Від одного і того ж джерела може отримувати енергію електрична бритва, потужність якої кілька ват, електродвигун потужністю в десятки і сотні кіловат, електропіч металургійного заводу тощо. Ця властивість електричної енергії різко виділяється серед решти її видів. Вона легко передається і поділяється на будь-які «порції», а тому широко використовується у промисловому виробництві, сільському господарстві, транспорті, побуті тощо. У фермерське сільське господарство дедалі більше впроваджується електрична оранка, зрошування, доїння корів і електрична переробка продуктів сільського господарства. Електричне освітлення найгігієнічніше, дешеве, потужне. У побуті широко застосовуються електронагрівальні прилади, такі як електроплити, електрочайники та самовари, праски, каміни тощо; а також відео та комп'ютерна техніка, холодильники, вентилятори, пілососи тощо;

7) електричні машини, апарати та обладнання мають високий К.К.Д.;



8) використання електроенергії відрізняються позитивними санітарно-гігієнічними характеристиками.

Не виникає сумніву в тому, що вчителі фізики і трудового навчання повинні мати знання про способи виробництва, передачі і використання електричної енергії. З цією метою до навчальних планів, за якими навчаються майбутні вчителі фізики і трудового навчання, включено навчальні дисципліни відповідно «Електротехніка» та «Загальна електротехніка».

Зміст цих дисциплін, що вивчається студентами педагогічних університетів, складається з двох частин: у першій частині вивчаються основні теоретичні положення, а в другій частині ставиться завдання навчити студентів прийомам виконання практичних монтажних робіт, користування електричними приладами та дослідження характеристик деяких, найчастіше вживаних, електричних машин та пристроїв.

Тобто, при вивченні електротехніки студентами передбачені лекційний курс, лабораторні заняття і самостійна робота, під час яких майбутні вчителі здобувають знання з теоретичних основ електротехніки, а також впроваджують набуті знання під час читання електричних схем, складанні електричних кіл, дослідженні параметрів електричних машин і пристроїв. Вивчення дисципліни передбачає застосування комп'ютерних програм, як при вивченні теоретичних положень, так і при виконанні віртуальних лабораторних робіт.

## **2. ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКИ В УКРАЇНІ**

Електрична енергія широко використовується людиною близько 200 років, проте її споживання у кількісному вимірі і різномайттям застосування значно переважає всі інші види енергії. За кількістю споживаної електроенергії можна оцінити стан розвитку тогочасного району, області держави в плані промислового, соціального, екологічного і культурного розвитку.

Вироблення електроенергії в Україні здійснюється переважно завдяки використанню паливних ресурсів, таких як вугілля, нафтопродукти, природний газ, а також енергії атомного ядра урану. Переважну частину палива, яке швидкими темпами вичерпується із надр Землі, а отже й дорожчає, Україна

імпортує. Тому останнім часом перед людством у цілому і перед нашою державою зокрема виникла проблема використання відновлювальних джерел енергії – води, вітру, Сонця, геотермальних джерел, припливів і відпливів тощо.

Дефіцит паливних ресурсів, експлуатація застарілого обладнання в Україні вимагають від держави розробки певних економічних, наукових та організаційних заходів з метою підтриманні галузі на рівні розвинених країн.

Основу електроенергетики на сьогодні в Україні складають теплові та атомні електростанції. Що стосується теплоенергетики, то її основою є стаціонарні паротурбінні теплові електростанції, у яких енергія, що виділяється при згорянні палива, перетворюється в електричну. Найпоширеніші в наш час конденсаційні парові електростанції. Водночас важливе місце відводиться теплофікаційним електростанціям (ТЕЦ), на яких добуте тепло використовується як для виробництва електроенергії, так і для технологічних потреб, обігріву приміщень та житла.

Найбільшою серед них в Україні – Київська ТЕЦ-5т потужність енергоблоків якої 700 тис. кВт. На ній 20% тепла, яке утворюється від згорання палива, перетворюється в електричну енергію, а 60% передається для технологічних і побутових потреб. Таке комбіноване використання енергії корисних копалин є одним з ефективних методів підвищення економічності теплових електростанцій. Три п'ятих електроенергії, яка виробляється в Україні, припадає на ТЕС.

Теплоелектростанції можна будувати близько до споживачів і розміщувати рівномірно по всій території країни. Переваги ТЕЦ і в тому, що вони працюють практично на всіх видах палива: вугіллі, сланцях, рідкому пальному, природному газі. ККД теплових електростанцій різного типу коливається від 35-40% до 52-58%.

Одним із шляхів підвищення ККД теплоелектростанцій є зменшення затрат. Як відомо, найбільше тепла втрачається в конденсаторі турбіни. Близько 60% тепла, яке міститься в перегрітій парі не перетворюється в енергію обертання ротора турбіни, а викидається у вигляді тепла при температурі 30-35 С.

Збільшення ККД можна здійснити за рахунок підвищення параметрів пари, яка подається на паротурбінні установки.

У табл. 1 подано перелік найбільших теплових станцій України, та деякі їхні характеристики.

Таблиця 1

| Теплові станції  | Кількість турбогенераторів та потужність кожного (шт. – МВт) | Потужність (МВт) |
|------------------|--|------------------|
| Запоріжська      | 3 – 800 ; 4 – 300  | 3600             |
| Вуглегірська     | 3 – 800; 4 – 300   | 3600             |
| Криворіжська     | 10 – 282   | 2820             |
| Бурштинська      | 8 – 195; 4 – 185   | 2300             |
| Зміївська        | 4 – 275; 6 – 175   | 2150             |
| Старобешівська   | 10 – 175   | 1750             |
| Ладижинська      | 6 – 300  | 1800             |
| Придніпровська   | 4 – 285; 4 – 150   | 1740             |
| Трипільська      | 6 – 300;   | 1800             |
| Луганська        | 8 – 175; 2 – 100   | 1600             |
| Слов'янська      | 1 – 720; 1 – 100;<br>1 – 800; 1 – 80                         | 1700             |
| Кухарівська      | 6 – 210; 1 – 200   | 1460             |
| Київська ТЕЦ-5   | 2 – 250; 2 – 100   | 700              |
| Київська ТЕЦ-6   | 2 – 250  | 500              |
| Харківська ТЕЦ-5 | 1 – 250; 2 – 110   | 470              |

Національною енергетичною програмою передбачено нарощування виробництва електроенергії за рахунок теплових станцій, що працюють на природному газі із застосуванням парогазових установок, ККД яких вищий на 11-13%, ніж у звичайних.

Україна має значні ресурси геотермальної енергії - енергії глибинного тепла Землі. Крім Криму і Карпатського регіону, промислове використання геотермальних джерел можливе у Чернівецькій, Харківській, Луганській і Полтавській областях. Геотермальні джерела за підрахунками фахівців на першому етапі виконання Національної енергетичної програми забезпечать потужності 1,5-2 ГВт.

Близько половини виробленої електроенергії в Україні припадає на атомні електростанції, які працюють на ядерному паливі. Перший у світі ядерний реактор, в якому здійснювалась керована ланцюгова реакція поділу ядер урану з виділенням величезної кількості теплової енергії, був запущений у 1942 році в США.

Через 4 роки такий реактор був в колишньому Радянському Союзі. На його базі в м. Обнінську у 1954 р. стала до ладу перша в світі атомна енергетична станція (АЕС). Пізніше, у червні 1970 р. було розпочато будівництво Чорнобильської АЕС, перший блок її запущено в дію 1977 року: услід за нею в грудні 1980 р. була введена в дію Рівненська АЕС; у 1982 р. стала до ладу Південно-Української АЕС; у 1980 р. розпочалось будівництво Хмельницької АЕС - вона вступила в дію у 1986 р. Нормативний строк будівництва енергетичного блоку потужністю 1000 МВт складає 5-7 років.

В Україні працюють ядерні реактори на повільних нейтронах, ядерним паливом для яких є уран -235. Потужності нині діючих АЕС і їх структурний склад подано в табл. 2.

Таблиця 2

| АЕС                 | Кількість і потужність енергоблоків (шт. - МВт) | Потужність МВт |
|---------------------|---|----------------|
| Запорізька          | 5 – 1000  | 5000           |
| Південно-Українська | 3 – 1000  | 3000           |
| Рівненська          | 1 – 1000; 1 – 416; 1 – 402                      | 1818           |
| Хмельницька         | 2 – 1000  | 2000           |
| Чорнобильська       | закрита   |                |

Атомна електростанція в основному складається з тих самих елементів, що й звичайна теплова, відрізняється вона лише використанням паливом і конструкцією і принципом дії парогенератора. Зазначимо, що атомна електростанція, на відміну від теплової екологічно чистіша, вона позбавлена шкідливих викидів сірки, золи й вуглекислого газу. За існуючою технологією для кожного енергоблоку АЕС передбачений басейн витримки, де відпрацьовані ТВЕЛі повинні зберігатись не менше трьох років. Протягом цього терміну вони втрачають близько 80% радіоактивності і залишкового тепла. Потім це паливо відправляється на переробку або ж на довготривале зберігання. Україна до

останнього часу не мала достатнього досвіду поховання радіоактивних відходів, надійних проектів і технологій заправки АЕС. Національна енергетична програма передбачає, розробку і створення технологій виготовлення ТВЕЛів і конструювання та монтажу парогенераторів, створення сховищ для зберігання відпрацьованого ядерного палива в районі бувшої Чорнобильської АЕС.

В оточенні атомних електростанцій особливе хвилювання в людей викликає радіоактивне випромінювання, яке найбільш специфічне для атомної енергетики. У багатьох в пам'яті жахи катастрофи на Чорнобильській АЕС. Ця аварія підкреслює необхідність надійної експлуатації ядерних реакторів і поліпшення їх конструкцій. Для роботи на АЕС потрібний висококваліфікований персонал. При його підготовці варто аналізувати можливі види потенціальних аварій і засоби до їх локалізації». З цією метою на Хмельницькій АЕС вступив у дію спеціальний тренажер, на якому імітуються всі можливі штатні і нештатні ситуації на енергоблоці.

Близько 6% виробленої в Україні електроенергії припадає на гідроелектростанції. На сучасних ГЕС використовують переважно три типи реактивних турбін: радіально-осьову, пропелерну і прямоточну. У всіх них енергія падаючої води за допомогою генераторів перетворюється в електричну.

Підрахунки показують, що для побудови гідроелектростанції необхідно вдвічі більше коштів, ніж для побудови теплової, і будівництво їх триває майже вдвічі довше. Однак гідроелектростанції мають свої переваги. Вироблена ними електроенергія значно дешевша. Після будівництва станція може працювати практично без участі людини, оскільки енергетичні перетворення на гідроелектростанціях простіші ніж на теплових, і їх роботу можна надійно автоматизувати.

Дніпро – третя за величиною річка Європи. Її енергетичні ресурси величезні. Складні народногосподарські завдання були розв'язані після спорудження велико потужного гідроенергетичного каскаду із семи гідроелектростанцій; їх характеристики подано в табл.3.

Таблиця 3

| ГЕС                 | Кількість і потужність<br>гідралічних турбін<br>(шт. МВт) | Потужність<br>(МВт) |
|---------------------|---|---------------------|
| Київська акумулююча | 3 – 41,5; 3 – 37  | 235,5               |
| Київська            | 16 – 18,5; 4 – 16,3                                       | 361,2               |
| Канівська           | 24 – 18,5   | 444,0               |
| Кременчуцька        | 12 – 52   | 625,0               |
| Дніпродзержинська   | 8 – 44  | 325,0               |
| Дніпровська         | 6 – 113,1; 2 – 104,5;<br>9 – 720; 1 – 2,6                 | 1532,2              |
| Каховська           | 6 – 58,5  | 351                 |
| Дністрянська        | 6 – 117   | 702                 |

Згідно з Національною енергетичною програмою, електроенергія ГЕС буде використовуватись як резерв для стабілізації енергосистеми в години пік і на випадок аварійної ситуації. Практично гідроресурси України задіяні повністю, хоча у верхній течії Дніпра можна збудувати кілька середніх за потужністю гідроелектростанцій. Місцеве значення матимуть і ГЕС, збудовані на гірських потоках Карпат і Кримських гір.

Одним з можливих варіантів використання енергії води – використання припливів і відпливів. Хвилі на воді піднімаються силою тяжіння. З 0,77 м теоретичної величини припливу 0,53 м спричинюється впливом Місяця і 0,24 м - впливом Сонця. Проте для використання енергії припливів і відпливів потрібні розробки принципово нових методів і засобів реалізації проблеми.

Останнім часом вчені працюють над створенням хвильових електростанцій а також дрейфуючих в океанах міст з населенням у сотні тисяч осіб (ковчеги на випадок танення льодовиків). Автономне енергетичне забезпечення за рахунок енергії припливів і відпливів та хвильових електростанцій.

### **3. Перспективи розвитку сонячної енергетики**

Енергія Сонця належить до практично невичерпних джерел енергії, яка постійно відновлюється. Тривалість життя Сонця становить близько 10 млрд. років. Маючи вік близько 4,5 млрд. років воно перебуває майже в середині свого існування.

Щорічно земна поверхня одержує у вигляді сонячної радіації енергію  $3,9 \cdot 10^{24}$  Дж. енергії. Сьогодні річна потреба енергії на Землі становить близько  $3,3 \cdot 10^{20}$  Дж. Таку кількість енергії можна добути при використанні лише 0,1% сонячного випромінювання, що падає на земну поверхню, навіть за умови, що ККД дорівнював би 10%. Але густина сонячної енергії дуже мала, так на поверхні Землі вона становить 150-250 Вт на квадратний метр. Для порівняння зазначимо, що для чайника, який нагрівається на газовій плиті підводиться енергія густиною 30-40 кВт/м<sup>2</sup>; тому розсіяне сонячне світло треба збирати в потужні пучки, до того ж потрібне дороге обладнання, щоб з сонячного тепла добути інші види енергії. Науку про використання енергії Сонця називають *геліотехнікою*. У практичному плані реалізація проблеми зводиться до побудови малопотужних сонячних нагрівників. Концентрації сонячного випромінювання досягають за допомогою різних систем з використанням дзеркал.

Серед сонячних нагрівників найпоширеніші такі, що працюють за принципом "гарячого ящика". Установка являє собою дерев'яний ящик з скляною кришкою. На дні ящика в шарі піску лежить трубчатий змієвик, по якому протікає вода. Нагрітий до високої температури пісок, енергією сонячного випромінювання, віддає тепло змієвику з водою і нагріває її до температури на 40-50°C вищої від температури навколишнього середовища. Скляна кришка перешкоджає теплообміну з навколишнім середовищем (затримує тепло), тому вся сонячна енергія, що потрапляє на поверхню нагрівника, витрачається на нагрівання піску і змієвика з водою.

За таким принципом оранжерейного ефекту працюють нагрівники в південних районах, обслуговуючи бані, сушилки для фруктів, теплиці, установки для опріснення води тощо. Використання сонячних колекторів у приватному секторі та невеликих підприємствах дадуть можливість отримати потужності 200-300 МВт.

Для забезпечення високих температур використовують печі, які концентрують сонячну енергію. Головна частина такої *печі* - параболічне дзеркало, що збирає в своєму фокусі падаючі на нього промені. Печі дають можливість досягти температури 3500-3700°C, тобто температури плавлення

майже всіх тугоплавких металів, включаючи платину. У виплавлених таким чином металах вдається позбутися домішок і забруднень, які є неминучими при використанні інших методів.

Найбільш розроблений на сьогодні традиційний спосіб добування електричної енергії за рахунок сонячної – через нагрівання теплоносія. Останній, наприклад вода, використовується в паровому циклі котел - пара - турбіна - генератор. Сонячна енергія концентрується дзеркалами, у фокусі яких розміщений котел з теплоносієм.

В Україні в м. Керчі була споруджена сонячна електростанція потужністю 5МВт. Навколо станції концентричними колами розмішені 1600 дзеркал площею 25 м<sup>2</sup> кожне, які спрямовують сонячну енергію на паровий котел у вигляді башти семидесятиметрової висоти. За допомогою електричної енергії, отриманої від сонячної електростанції, електролізом води можна отримувати водень – хімічно чисте паливо. ККД серійних перетворювачів сонячної енергії в електричну становить 12%.

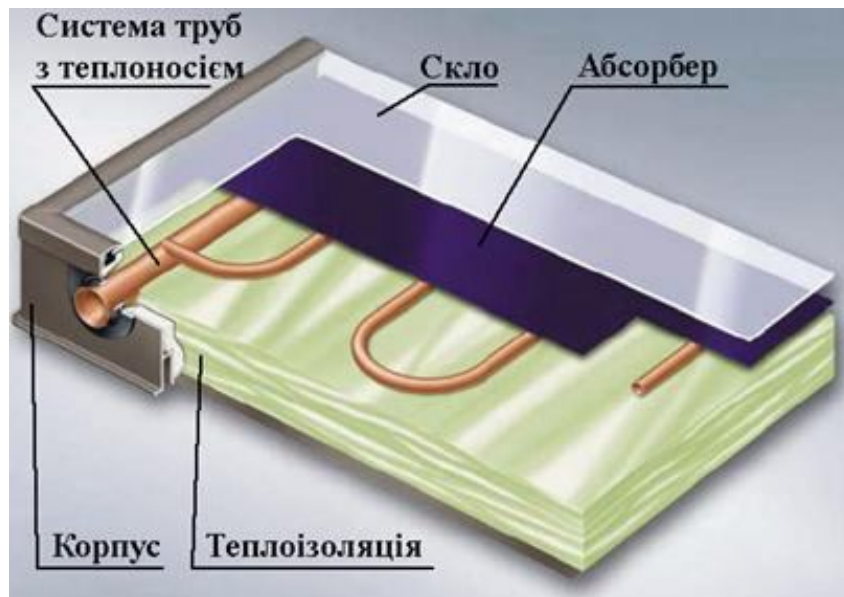
Останнім часом розробляються різного роду ефективні сонячні колектори, які використовуються для нагрівання води і опалення приміщень. Принцип їх роботи полягає у циркуляції води через теплообмінник, де вона нагрівається сонячним випромінюванням, і подачі нагрітої води в систему опалення чи гарячого водопостачання. Виділяють плоскі і вакуумні сонячні колектори.

Плоский колектор складається з теплоізолюваної панелі в якій знаходиться пластина поглинач. Поглинач виготовляється з теплопровідного металу (найчастіше з міді або алюмінію). Пластина поглинача обробляється спеціальним покриттям, яке має високу поглинаючу здатність у видимій області спектру і низьким коефіцієнтом випромінювання у інфрачервоному спектрі. Для зменшення втрат тепла передню частину колектора покривають склом, а задню і бокові – теплоізолюючим матеріалом. Конструкція плоского колектора показана на рис. 1.

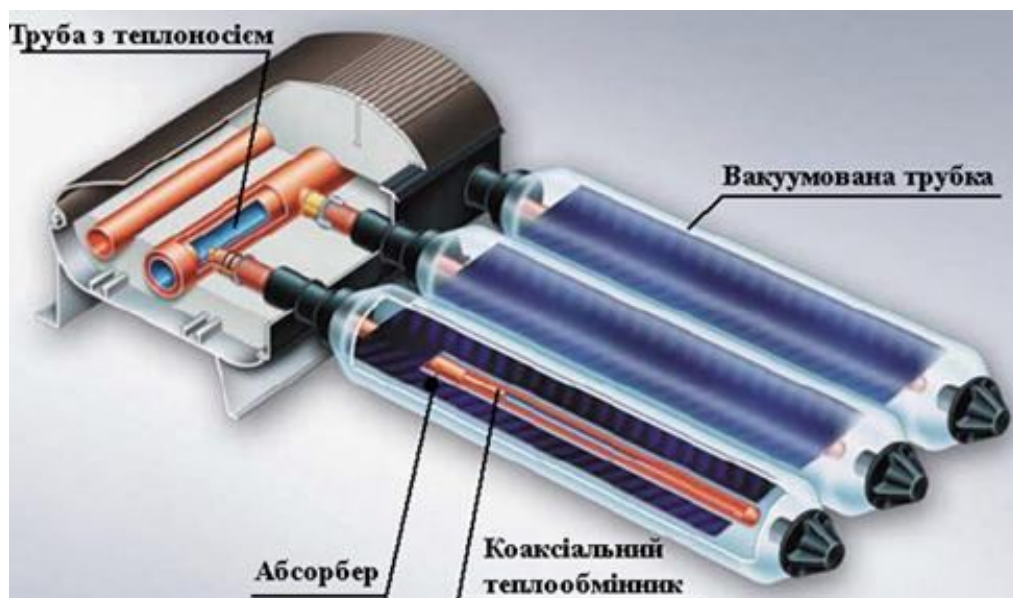
Спрощеним варіантом плоского колектора є пластиковий колектор, абсорбер якого виготовляється з пластику. Як правило він не ізолюється, тому використовується лише в літню пору в основному для підігріву басейнів.



Вакуумні колектори складаються з вакуумованих трубок, в кожній з яких знаходиться мідний абсорбер з титановим покриттям, що гарантує високий рівень поглинання сонячної енергії, а вакуумований простір дозволяє звести до мінімуму втрати на теплопровідність. В абсорбері встановлюється коаксіальний (трубка в трубці) теплообмінник, через який теплоносій отримує тепло від абсорбера. Конструкція вакуумного колектора показана на рис. 2.



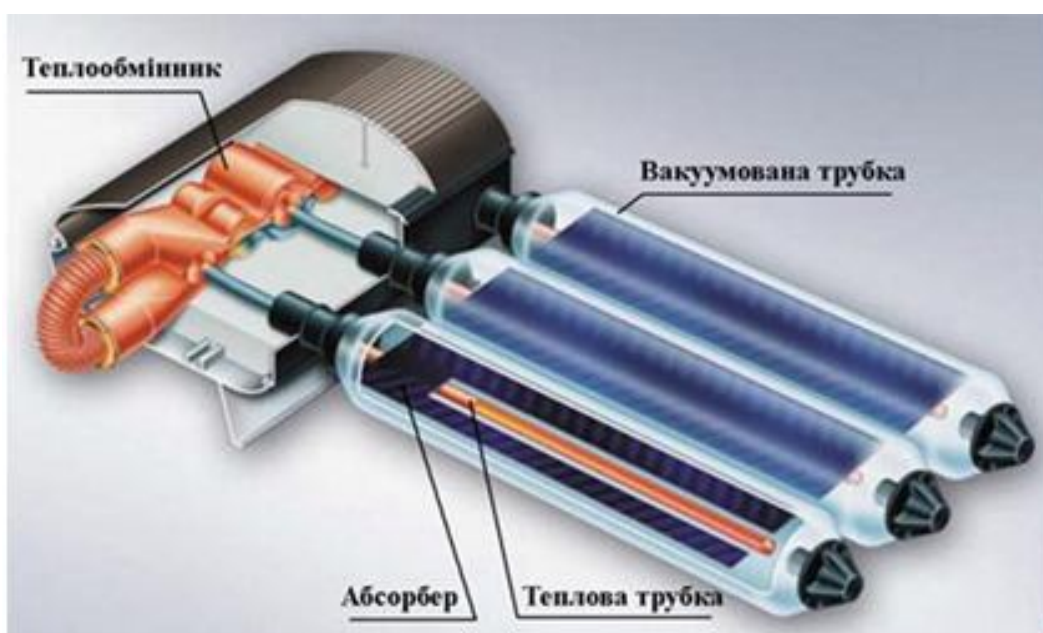
*Рис. 1. Конструкція плоского колектора*



*Рис. 2. Конструкція вакуумного колектора*

При використанні в якості теплоносія води плоский і вакуумний колектори можливо використовувати лише при температурах вище нуля. Для усунення цього обмеження розроблені вакуумні колектори з тепловою трубкою. Вони

складаються з двох скляних або металічних трубок, які вставлені одна в одну і розділені вакуумом. Зовнішня трубка має таку ж конструкцію як у звичайного вакуумного колектора і виконує функцію абсорбера. Всередині абсорбера розміщується теплова трубка з рідиною, з низькою температурою кипіння. Під дією теплоти абсорбера рідина випаровується і піднімається у верхню частину трубки, яка з'єднана з теплообмінником по якому протікає вода. В теплообміннику газу рідини конденсуються і віддають енергію воді. Цей тип колектора може працювати при температурі  $-30^{\circ}\text{C}$ , якщо теплова трубка виготовлена зі скла і при  $-45^{\circ}\text{C}$ , якщо вона металева. Конструкція вакуумного колектора з тепловою трубкою показана на рис. 3.

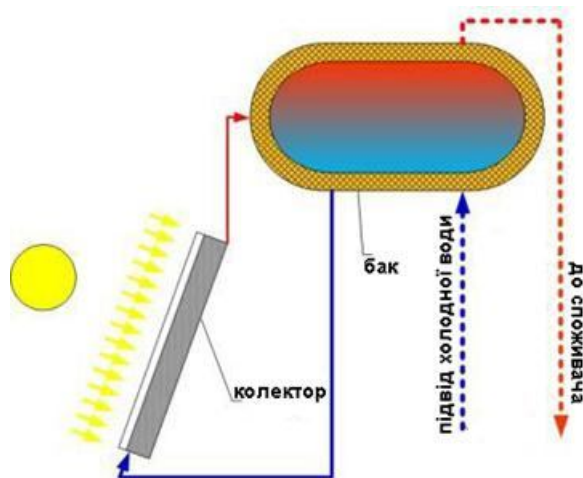


*Рис. 3. Вакуумний колектор з тепловою трубкою*

ККД сонячного колектора виражає відношення корисної теплової енергії відведеної від абсорбера до виділеної на ньому енергії сонячного випромінювання. Втрати енергії мають дві складові: оптичну і теплопровідну. В колекторах оптичні втрати виникають при відбиванні сонячного випромінювання від поверхні скла і абсорбера. Оптичний ККД  $\eta_{K0}$  є максимально можливим і досягається при нульовій різниці температур між абсорбером і навколишнім середовищем, коли втрати на теплопровідність відсутні. Зі збільшенням різниці температур  $\Delta T$  втрати на теплопровідність зростають майже лінійно. Оптичний ККД  $\eta_{K0}$  плоского колектора дещо більший ніж у вакуумного. Однак за рахунок менших теплових втрат вакуумні колектори мають більший сумарний ККД при

великій різниці температур між абсорбером і навколишнім середовищем ( $30^{\circ}\text{C}$  і вище).

Такий же принцип дії має геліосистема з пасивною циркуляцією теплоносія (рис.4).



*Рис. 4. Геліосистема з пасивною циркуляцією теплоносія*

Крім описаних установок, спинимося ще на двох способах перетворення сонячної енергії в електричну. Один з них базується на використанні явища Т.Зеебека. ККД такого термоелемента сягає до 7%. Потужність батареї термоелементів залежить від їх кількості та сонячної радіації. Перший сонячний термоелектрогенератор потужністю 40 Вт був сконструйований ще в 1955р.

Другий спосіб перетворення сонячної енергії в електричну базується на використанні фотоелекту.

Фотоелектричні напівпровідникові елементи застосовують сьогодні в різній побутовій техніці, яка не потребує великої кількості енергії: для живлення електронних годинників, мікрокалькуляторів, фотоекспонетрів тощо.



*Рис. 5. Сонячні електростанції*

Напівпровідникові і фотоелектричні батареї виконують сьогодні важливі практичні завдання. Зокрема вони є джерелами живлення електричних приладів космічних апаратів. Кремнієві напівпровідникові Фотоелектростанції використовувались на всіх супутниках Землі та космічних станціях. Проблема побудови напівпровідникових геліоелектростанцій зводиться до розробки технологій і добування дешевих надчистих кремнію і германію й інших хімічних матеріалів, властивості яких дають можливість отримувати значні фотоструми.

В Інтернеті наведений список сонячних електростанцій, встановлених останніми роками у Вінницькій області (табл.4).

Вінницька область є одним із лідерів у будівництві ФЕС . Останньою потужною станцією, яка була запущена на експлуатацію 18 листопада 2016 року- ФЕС «Балки» (фотогальванічна електростанція) в селі Войнашівка Барського району. На кінець року сумарна потужність становила близько 53,8 МВт, що становить 20% від загальної потужності ФЕС в Україні.

**Таблиця 4**

Сонячні (фотовольтаїчні) електростанції Вінницької області

| Найближчий | Потужність, | Девелопер | Рік запуску |
|------------|-------------|-----------|-------------|
|------------|-------------|-----------|-------------|

| населений пункт            | МВт     |  |   |
|----------------------------|---------|--|---|
| Шаргород                   | 8       | Martifer Solar (Rengy Development)                                   | 2014  |
| Вінниця                    | 7,98    | Праймвуд (Rengy Development)   | 2014  |
| Альтен-Інвест (Тростянець) | 1       | Альтен-Інвест  | 2012 запущено першу чергу потужністю 0,309 МВт  |
| Чорноминська               | 0,62832 | ГРАНД СОЛАР  | 2014. У 2015 запущено другий пусковий комплекс 1-ї черги  |
| Вінниця                    | 5       | Ренджи Приазовське   |   |
| Гальжбіївська              | 1,446   | Енергоінвест   | 2012 запущено першу чергу потужністю 0,2679 МВт   |
| Гальжбіївська-2            | 0,51007 | Енергоінвест   | 2014  |
| Гнівась                    | 0,035   | Вінниця-енергосервіс   | 2011  |
| Кукавка                    | 4       | Вінниця-енергосервіс   |   |
| Пороги                     | 4,5     | Грин Агро Сервіс (Rengy Development), Мартифер Солар (Martifer SGPS) |   |
| Тростянець (с.Глибочок)    | 1,374   | Ренджи Тростянець (Rengy Development)                                | 2012  |
| Бершадь (с.Чернятка)       | 7       | Ренджи Бершад (Rengy Development)                                    | 2013  |
| Томашпіль                  | 4,5     | Ренджи Томашпіль (Rengy Development)                                 | 2013  |
| Слобода-Бушанська          | 1,875   | Рентехно (заказчик Енергоінвест)                                     | 2012  |
| Цекинівка                  | 13,475  | Новосвіт   | 2012 запущено першу чергу потужністю 0,125 МВт.<br>2014 запущено 4-5 черги.<br>Загальна потужність 13,475 МВт |

|             |       |                  |      |
|-------------|-------|------------------|------|
| Цекинівка 3 | 0,203 | Новосвіт         | 2014 |
| Цекинівка 2 | 1,011 | Новосвіт         | 2014 |
| Чечельник   | 12    | Ekotechnik Praha |      |
| Трибусівка  | 1,579 | Вінсолар         | 2013 |
| Вендичани   | 1     | Євросолар        | 2013 |
| Вендичани   | 1     | Екосолар Інвест  | 2013 |

#### 4. Перспективи використання енергії вітру

Енергія п'ятого океану – так часто називають повітряний океан – величезна. За підрахунками вчених вітер може дати в тисячі разів більше енергії, ніж людство отримує її за рахунок вугілля, що спалюється на всіх теплостанціях світу. Вітрова електростанція являє собою комплекс технічних пристроїв, що використовується для перетворення кінетичної енергії потоку вітру в механічну енергію обертання ротора генератора. Вітроелектрична установка (Рис. 6) складається з однієї або декількох вітроелектричних станцій, акумулюючого або резервного пристрою та систем автоматичного управління і регулювання режимів роботи ВЕУ .



*Рис. 6. Вітроелектрична установка*

Типовим представником вітросилових установок, які без змін пройшли крізь віки, є голландський млин. Їх верхню частину можна повертати за вітром на шарнірах. Вони мають, як правило, чотири дерев'яних або обтягнутих парусиною,

крила довжиною до 15 м. і здатні робити від 6 до 12 обертів за хвилину залежно від сили вітру. Потужність таких вітряків сягає до 40 кВт, а ККД до 10%.

Наукові розрахунки вітрових установок викладені в працях М.Є.Жуковського. Він показав, що лопаті парової і гідравлічної турбін підпорядковуються тим самим законам; вивів формули для розрахунку сил, що діють на згадані елементи механізмів. Ці праці сприяли побудові швидкохідних сучасних вітродвигунів. Швидкохідний вітродвигун Ц А Г І-Д-30 мав потужність 100 кВт., його було споруджено в 1931 р. у Криму під керівництвом інженерів Н.В.Красовського та В.Р.Секторова. Вироблена ним електроенергія подавалась у мережу Севастопольської теплової електростанції.

Сьогодні в Україні діє до 100 вітроагрегатів, сумарна потужність яких становить близько 500 МВт.

Для промислового використання вітроенергетичних установок найсприятливіші гори Криму, вся смуга Чорноморського узбережжя, Карпати. У них забезпечується істотна передумова використання вітру – його середня швидкість має бути не меншою 4 м/с. Хоча практично всі регіони України відповідають цим вимогам, проте виробництво електроенергії вітроагрегатами недостатнє для забезпечення густонаселених регіонів.

Вітроенергетика – одна із галузей економіки, яка розвивається в світі найдинамічніше. Понад 75% вітроустановок дають у Каліфорнії (США), з решти 25% – більша частина в Данії (1500 вітроустановок). В Україні на різних стадіях готовності працюють Аджигольська, Асканіївська, Актишська, Донзулавська і Чорноморська електростанції.

Розроблено проектну документацію Західно-Сивашської вітроелектростанції потужністю 10 МВт, Якимівської (Запорізька обл.)– 15 МВт, Чонгарської– 15 МВт, Володимировської (Херсонської обл.)– 11 МВт. З 1993 року на виробничому об'єднанні "Південмаш" налагоджено виробництво вітроагрегатів потужністю 20,45 і 103 кВт.

Згідно з Національною енергетичною програмою до 2010 р. в Україні планувалось побудувати ВЕС загальною потужністю 2 млн. кВт. Перспективними на Україні є офшорні ВЕС - станції збудовані на узбережжях морських екваторій

та на мілководдях, зокрема Азовського моря і озера Сиваш. За прогнозами міжнародного енергетичного Конгресу в 2020 р. частка нетрадиційних джерел енергії сягатиме в світі від 1,5 до 2,7%, тепер вона становить лише 0,7%.

Таблиця 5

| Вітрові електростанції | Розташування                 | фактична потужність, МВт | побудова першої черги |
|------------------------|------------------------------|--------------------------|-----------------------|
| Ботієвська ВЕС         | Приморський Посад            | 200                      | 2012                  |
| Донузлавська ВЕС       | Новоозерне                   | 17,2                     | 1992                  |
| Краснодонська ВЕС      | Краснодонський район         | 25                       | 2013                  |
| Мирновська ВЕС         | Криловка                     | 20,8                     | 2004                  |
| Новоазовська ВЕС       | Безіменне                    | 79,3                     | 1998                  |
| Останинська ВЕС        | Зелений Яр                   | 25                       | 2011                  |
| Очаківська ВЕС         | Дмитрівка                    | 37,5                     | 2012                  |
| Тарханкутська ВЕС      | Красносільське, Новосільське | 15,5                     | 2001                  |

## 5. Енергетика на основі біогазу

Біогаз – газ, що одержують водневим або метановим бродінням біомаси. Метанове розкладання біомаси відбувається під впливом трьох видів бактерій. У ланцюжку живлення наступні бактерії харчуються продуктами життєдіяльності попередніх. Перший вид – бактерії гідролізни, другий – кислотоутворюючі, третій – метаноутворюючі. У виробництві біогазу беруть участь не тільки бактерії класу метаногенів, а всі три види. Одним з різновидів біогазу є біоводень, де кінцевим продуктом життєдіяльності бактерій є не метан, а водень.





### *Рис. 7. Біогазова установка*

**Склад і якість біогазу:** 50-87% метану, 13-50% CO<sub>2</sub>, незначні домішки H<sub>2</sub> і H<sub>2</sub>S. Після очистки біогазу від CO<sub>2</sub> виходить біометан. Біометан - повний аналог природного газу, відмінність тільки в походженні.

**Сировина для отримання:** Перелік органічних відходів, придатних для виробництва біогазу: гній, пташиний послід, післяспиртова барда, відходи пивного виробництва, буряковий жом, фекальні осади, відходи рибного і забійного цеху (кров, жир, кишки), трава, побутові відходи, відходи молокозаводів – солонина і солодка молочна сироватка, відходи виробництва біодизеля – технічний гліцерин від виробництва біодизеля з ріпаку, відходи від виробництва соків – жом фруктовий, ягідний, овочевий, виноградна вижимка, водорості, відходи виробництва крохмалю і патоки – мезга і сироп, відходи переробки картоплі, виробництва чіпсів – шк.урки, гнилі бульби, кавова пульпа.

Крім відходів біогаз можна виробляти зі спеціально вирощених енергетичних культур, наприклад, з силосної кукурудзи або силфія, а також водоростей. Вихід газу може сягати до 300 м<sup>3</sup> з 1 тонни.

Вихід біогазу залежить від вмісту сухої речовини і виду використовуваної сировини. З тонни гною великої рогатої худоби виходить 50-65 м<sup>3</sup> біогазу з вмістом метану 60%, 150-500 м<sup>3</sup> біогазу з різних видів рослин з вмістом метану до 70%. Максимальна кількість біогазу – це 1300 м<sup>3</sup> з вмістом метану до 87% – можна отримати з жиру.

Розрізняють теоретичний (фізично можливий) і технічно-реалізований вихід газу. В 1950-70-х роках технічно можливий вихід газу становив усього 20-30% від теоретичного. Сьогодні застосування ензимів, бустерів для штучної деградації сировини (наприклад, ультразвукових або рідинних кавітаторів) та інших пристосувань дозволяє збільшувати вихід біогазу на звичайнісінькій установці з 60% до 95%.

Для прикладу можна навести діючу установку, що працює на вінницькому сміттєзвалищі в районі с. Стадниця.

## Лекція 2. Параметри електричного кола постійного струму.

1. Будова електричного кола.
2. Класифікація електричних кіл.
3. Параметри електричних кіл постійного струму.
4. Розрахунок параметрів електричного кола постійного струму методом накладання.
5. Розрахунок параметрів електричного кола постійного струму методом контурних струмів.
6. Розрахунок параметрів електричного кола постійного струму методом вузлових напруг.
7. Побудова потенціальних діаграм.

### Література:

Л-1, с. 3-9. Л-2, с. 3-8. Л-3, с. 11-35.

### 1. Будова електричного кола.

Електричним колом називають замкнений контур, що складається з джерела струму, електричного обладнання та провідників, що забезпечують протікання електричного струму.

Електрична схема – це схематичне зображення елементів електричного кола за допомогою умовних позначень.

Джерело електричної енергії це пристрій у якому відбувається перетворення первинної неелектричної енергії в електричну. Наприклад: хімічні джерела (гальванічні елементи, акумулятори), термоелементи, термодари, фотоелементи, генератори тощо. На рис. 1 зображені умовні позначення елементів електричного кола.

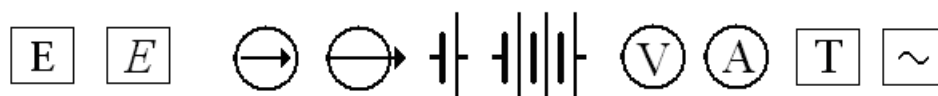


Рис. 1. Схематичне зображення джерел електроенергії, вимірювальних приладів, позначення змінного струму.

Провідники забезпечують протікання електричного струму від джерела до

споживача електроенергії і позначаються тонкою суцільною лінією.

Споживачі електричної енергії – це пристрої, у яких електрична енергія перетворюється в інші види енергії. Окремі із них позначаються так, як це зображено на рис. 2.

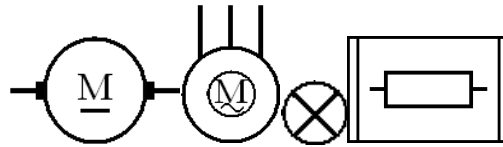


Рис. 2. Приклади схематичного зображення окремих електричних споживачів: електродвигунів, електроплитки, електричної лампи.

Просте електричне коло, наприклад електрична схема для кишенькового ліхтарика, матиме вигляд (рис. 3):

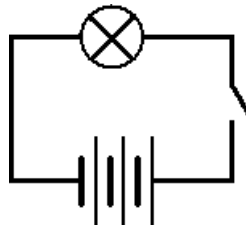
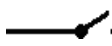



Рис. 3. Найпростіша електрична схема ліхтарика.

Крім названих частин електричного кола: джерела, провідника та споживача існують комутаційні пристосування або частини кола, що служать для керування його роботою. Наприклад вимикач, що позначається символом , або перемикач  та ін.

В електричному колі виділяють окрему його частину - ділянку кола. Ділянка кола - це та його частина, по якій протікає один і той же електричний струм. Декілька ділянок, на яких протікає один і той же струм, називають віткою. Точки в яких з'єднується три і більше віток називають – вузлом. Замкнена частина кола називається контуром. Контур може бути активним, якщо він має джерело електричної енергії та пасивним, якщо контур не має джерела електричної енергії.

На рисунку 4 зображено елементи кола.

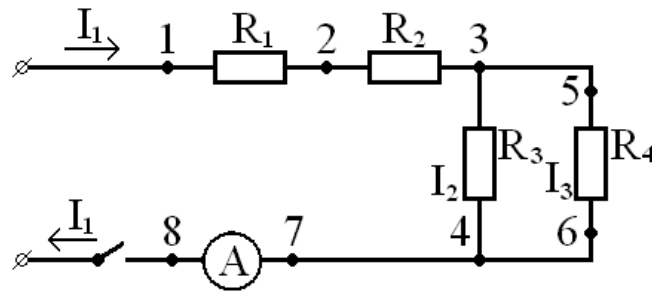


Рис. 4. Схема електричного кола.

Відповідно до рисунка 4 ділянки кола: 1 – 2; 2 – 3; 3 – 4; 5 – 6; 7 – 8.

Вітки: 1 – 3; 3 - 4; 5 – 6.

Активний контур: 1 – 3 – 4 – 8 – 1.

Пасивний контур: 3 – 5 - 6 – 4 – 3.

## 2. Класифікація електричних кіл.

Залежно від характеру струму, що протікає в електричних колах, їх поділяють на кола постійного струму та кола змінного струму; за способом та видом з'єднання споживачів - розгалужені та нерозгалужені. До нерозгалужених кіл відносять ті у яких споживачі з'єднані між собою лише послідовно або кола в якому їх є одна вітка, або один контур.

До розгалужених електричних кіл відносять такі кола, у яких споживачі з'єднані між собою не лише послідовно, а й паралельно - змішаним способом. Вони мають декілька контурів, у яких протікають декілька різних струмів. Вони мають більше двох вузлів і декілька віток.

Електричні кола, у яких виробництво, розподіл, перетворення та використання електричної енергії є основним їх призначанням – називають енергетичними.

У тих випадках, коли електричні перетворення відіграють лише допоміжну роль і являються лише засобом передачі і використання сигналів або інформації, їх називають інформаційними.

## 3. Параметри електричного кола постійного струму та методи їх розрахунку.

До параметрів електричного кола постійного струму можна віднести

електрорушійну силу джерела струму (ЕРС) –  $E$ , напругу –  $U$ , силу струму –  $I$ , активний опір –  $R$ , споживану потужність –  $P$  та енергію –  $W$ .

Електрорушійна сила – це робота сторонніх сил по перенесенню 1 Кл. електрики по замкненому контуру.

Напруга на ділянці кола – це робота, виконана силами електричного поля по перенесенню 1 Кл. електрики на цій ділянці кола.

Сила струму – це фізична величина, яка чисельно дорівнює заряду, що протікає через поперечний переріз провідника за одиницю часу:  $I = \frac{q}{t}$ . (1)

Опір провідника – це властивість його протидіяти напрямленому руху електричних зарядів:  $R = \rho \frac{l}{S}$ , де:

$\rho$  – питомий опір провідника;

$l$  – довжина провідника;

$S$  – площа поперечного перерізу провідника.

Активна потужність  $P$  (Вт) у колах постійного струму – це робота електричних сил виконана протягом одиниці часу:  $P = \frac{A}{t}$ . У свою чергу робота

$A = qU$ . З цих рівнянь визначимо потужність  $P = \frac{qU}{t}$ . (2)

Підставивши вираз 1 у вираз 2, отримаємо формулу для обчислення потужності в колі постійного струму:

$$P = IU.$$

У різних споживачах електрична енергія перетворюється в інші види – механічну роботу, теплову та світлову енергію тощо.

У нагрівальних приладах електрична енергія виділяється у вигляді кількості теплоти  $Q = W = P \cdot t = IUt$ . Де:

$I$  – сила струму в колі;

$U$  – напруга;

$t$  – час протікання електричного струму.

Розрахунок електричних кіл здійснюється на основі закону Ома для ділянки кола та замкненого кола відповідно:  $I = \frac{U}{R}$  та  $I = \frac{E}{R + r}$

Де:  $I$  – сила струму в колі;

$U$  – напруга на ділянці кола;

$E$  – електрорушійна сила джерела;

$R$  – опір зовнішнього кола;

$r$  – внутрішній опір джерела струму.

У складних електричних колах іноді не вдається здійснити розрахунки завдяки використанню лише законів Ома. Тому в електротехніці є низка інших методів розрахунку електричних кіл. Найуніверсальнішими є два закони Кірхгофа, за якими розраховують складні електричні кола.

У першому законі Кірхгофа говориться про те, що сума струмів вузла дорівнює нулю:

$$\sum I = 0.$$

У другому законі дається співвідношення між ЕРС та спадами напруг – у замкненому контурі сума електрорушійних сил дорівнює сумі спадів напруг:

$$\sum E = \sum IR$$

Приклад: Нехай електричне коло постійного струму складається з двох контурів у яких є джерела струму з електрорушійною силою  $E_1$  та  $E_2$  з внутрішніми опорами  $r_1$  та  $r_2$  і резисторів опором  $R_1$ ,  $R_2$  та  $R_3$  (мал.4).

Визначити силу струму у кожній вітці.

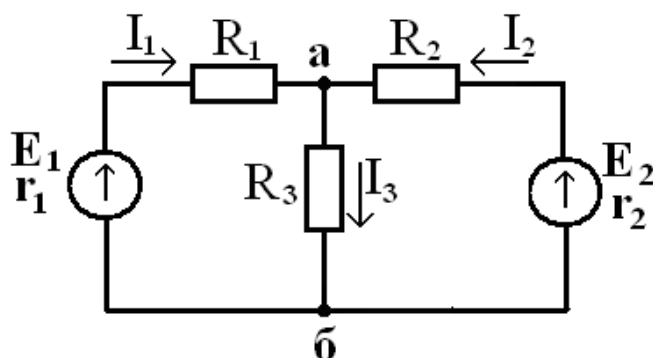


Рис. 5. Схема електричного кола.

Скориставшись 1 законом Кірхгофа, запишемо вираз для струмів у вузлі «а»:

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

Для вузла «б» записувати рівняння немає потреби, так як до нього ввійдуть тіж самі струми.

Другий закон Кірхгофа запишеться двічі, хоча в колі можна розглядати три контури. Для третього контуру записувати рівняння немає потреби тому, що туди увійдуть ті ж самі параметри. Напрямок обходу по контурах вибирається довільно, за годинниковою стрілкою або проти годинникової стрілки. У даному випадку в одному контурі напрям обходу здійснено за годинниковою стрілкою, в іншому – проти.

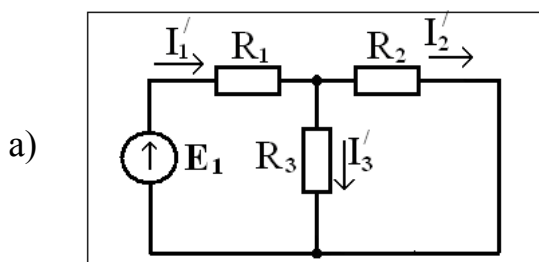
$$\text{Отже, } E_1 = I_3 R_3 + I_1 R_1 + I_1 r ; E_2 = I_3 R_3 + I_2 R_2 + I_2 r .$$

З отриманої системи трьох рівнянь можна отримати три невідомі значення струмів  $I_1; I_2; I_3$ , які протікають у контурах.

На основі законів Кірхгофа та закону Ома можна отримати інші методи розрахунку складних розгалужених електричних кіл, таких як метод “контурних струмів”, запропонований Д.К. Максвелом; метод “вузлових напруг” та ін. Суть цих методів висвітлено в літературі. Для прикладу розглянемо окремі із них.

#### Метод накладання.

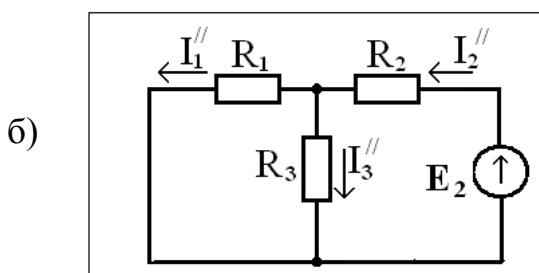
Розрахунок кола за допомогою методу накладання базується на принципі суперпозиції. Принцип суперпозиції для лінійних кіл постійного струму полягає в тому, що в будь-якій вітці струм дорівнює алгебраїчній сумі струмів, які б протікали у ній при дії кожного джерела живлення взятого окремо, у той час як інші джерела замінюються резисторами з опором, що дорівнюють їх внутрішнім опорам.



$$I_1' = \frac{E_1}{R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}} ; I_2' = \frac{E_1 - R_1 I_1'}{R_2} ;$$

$$I_3' = \frac{E_1 - R_1 I_1'}{R_3}$$

+



$$I_1'' = \frac{E_2 - R_2 I_2''}{R_1} ; I_2'' = \frac{E_2}{R_2 + \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3}} ;$$

$$I_3'' = \frac{E_2 - R_2 I_2''}{R_3}$$

||

Відповідно принципу суперпозиції дійсні значення сили струму у вітках відповідно дорівнюють:

$$I_1 = I_1^1 - I_1''; I_2 = -I_2^1 + I_2''; I_3 = I_3^1 + I_3''$$

Рис. 6. Електричні схеми до пояснення розрахунку кіл методом накладання.

Метод накладання застосовують для аналізу та розрахунку параметрів електричного кола з декількома джерелами живлення. Суть цього методу полягає в тому, що складне електричне коло замінюють декількома простішими, у кожному з яких діє лише одне джерело. Електричні струми, створені окремими джерелами у відповідних вітках, розраховують методом еквівалентних перетворень. Реальні ж струми визначають як алгебраїчну суму часткових струмів у кожній вітці кола. На рис. 6 показано послідовність розрахунку кола з застосуванням методу накладання, до складу якого входить два джерела ЕРС –  $E_1$  та  $E_2$ . Для спрощення розрахунків вважатимемо, що внутрішні опори джерел струму незначні, що є в дійсності, тому знехтуємо ними у нашому прикладі.

Припустимо, що в електричному колі (рис. 6,а) по черзі вилучають джерела ЕРС (рис. 6,а та 6,б). У такому випадку замість дійсних значень струмів  $I_1, I_2, I_3$  у вітках циркулюватимуть електричні струми  $I_1^1, I_2^1, I_3^1$  (рис. 6,б) та струми  $I_1'', I_2'', I_3''$  (рис. 6, в). Здійснимо розрахунки сил струму у вітках з почерговим вилученням ЕРС –  $E_1$  та  $E_2$  відповідно.

Напрямок дійсних значень струмів відповідає напрямкам стрілок на схемі при додатніх значеннях розрахунків, якщо ж отримані розрахунками значення окремих струмів мають від'ємні значення, то їх дійсний напрямок є зворотним до прийнятого.

Аналогічно методом накладання розраховуються і спади напруг на резисторах:  $U_1 = U_1^1 - U_1''$ ;  $U_2 = -U_2^1 + U_2''$ ;  $U_3 = U_3^1 + U_3''$ .

Метод накладання досить громіздкий для кіл з 3-ма і більше джерелами ЕРС. Тому для аналізу складних кіл застосовують інші методи, зокрема метод контурних струмів. Цей метод має простіші розрахунки кіл порівняно з системою



рівнянь, отриманою завдяки законам Кірхгофа. Для прикладу візьмемо попередню схему електричного кола (рис. 6).

### Метод контурних струмів.

Нехай ми маємо електричне коло (рис. 7), у якому 2 джерела ЕРС і 3 резистори. Вибираємо довільно контурні струми  $I_{1к}$  та  $I_{2к}$ , які циркулюють у відповідних замкнутих контурах.

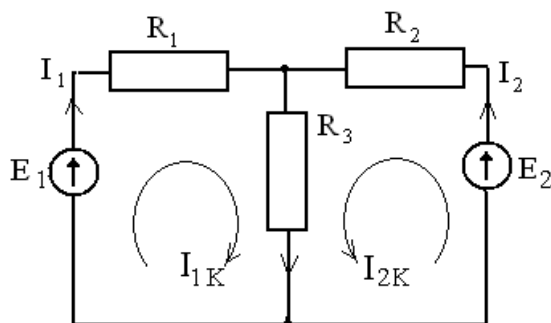


Рис. 7. Електричне коло для розрахунку контурних струмів.

Запишемо закон Кірхгофа для кожного із контурів, при цьому отримаємо систему двох рівнянь з двома невідомими  $I_{1к}$  та  $I_{2к}$ .

$$\begin{cases} E_1 = I_{1к}R_1 + I_{1к}R_3 + I_{2к}R_3 \\ E_2 = I_{2к}R_2 + I_{2к}R_3 + I_{1к}R_3 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} E_1 = I_{1к}(R_1 + R_3) + I_{2к}R_3 \\ E_2 = I_{2к}(R_2 + R_3) + I_{1к}R_3 \end{cases} \quad (6)$$

Цю ж задачу можна розв'язати за допомогою 1 і 2 законів Кірхгофа. Запишемо систему рівнянь:

$$\begin{cases} I_3 = I_1 + I_2 \\ E_1 = I_1R_1 + I_3R_3 \\ E_2 = I_2R_2 + I_3R_3 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} E_1 = I_1R_1 + I_1R_3 + I_2R_3 \\ E_2 = I_2R_2 + I_2R_3 + I_1R_3 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} E_1 = I_1(R_1 + R_3) + I_2R_3 \\ E_2 = I_2(R_2 + R_3) + I_1R_3 \end{cases} \quad (7)$$

Порівнюючи системи двох рівнянь з двома невідомими 6 та 7 бачимо, що вони тотожні. Але у першому випадку ми мали на початку на одне рівняння менше, а отже простіший розв'язок відносно величин струмів.

### Метод вузлових напруг

Якщо електричне коло складається з багатьох активних та пасивних віток з'єднаних у двох вузлах, то найпростішим методом розрахунку його параметрів є метод вузлових напруг. Наприклад, нехай ми маємо коло з двох активних та двох пасивних віток (рис. 8).

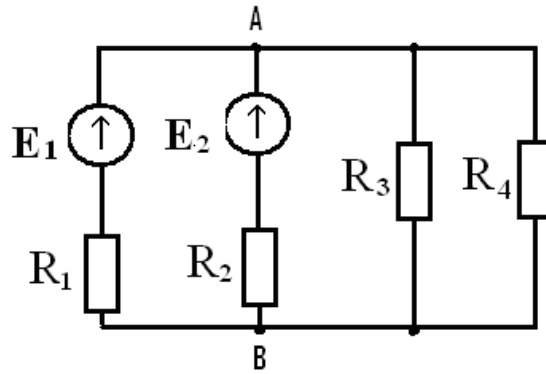


Рис. 8. Розгалужене електричне коло.

Запишемо закони Кірхгофа - перший для вузлів А та В і другий для двох контурів, електричного кола зображеного на схемі (рис. 8):

$$\begin{array}{l}
 I_1 + I_2 = I_3 + I_4; \\
 U_{AB} = E_1 - I_1 R_1; \\
 U_{AB} = E_2 - I_2 R_2; \\
 U_{AB} = I_3 R_3; \\
 U_{AB} = I_4 R_4.
 \end{array}
 \left| \begin{array}{l}
 g = \frac{U}{R}; \\
 I_1 = E_1 g_1 - U_{AB} g_1; \\
 I_2 = E_2 g_2 - U_{AB} g_2.
 \end{array} \right.
 \begin{array}{l}
 I_1 + I_2 = E_1 g_1 + E_2 g_2 - U_{AB} (g_1 + g_2); \\
 I_3 + I_4 = U_{AB} (g_3 + g_4).
 \end{array}$$

Прирівняємо праві частини останніх виразів:

$$E_1 g_1 + E_2 g_2 - U_{AB} (g_1 + g_2) = U_{AB} (g_3 + g_4).$$

Після розрахунків отримаємо вираз для розрахунку вузлових напруг

$$U_{AB} = \frac{E_1 g_1 + E_2 g_2}{g_1 + g_2 + g_3 + g_4}.$$

Де:  $g = \frac{U}{R}$  - провідності віток.

Існують й інші методи розрахунку складних розгалужених електричних кіл крім методу накладання; "контурних струмів", запропонований Д.К. Максвеллом; методу "вузлових напруг" тощо. Суть цих методів висвітлено в літературі Л - 3 та ін.

### Побудова потенціальних діаграм.

Потенціальна діаграма дає можливість визначити спади напруг на окремих ділянках контура. При її побудові на осі абсцис відкладають (у вибраному масштабі) величини опорів між окремими точками контура, а по осі ординат –

різниці потенціалів або спади напруги між цими ж точками. Якщо потенціальна діаграма побудована без врахування внутрішнього опору джерела енергії, її називають наближеною.

Побудуємо потенціальну діаграму для контура ABCA рис. 9. Почнемо обхід контура з точки А, прийнявши її за нуль  $\varphi_A = 0$ . На другій клемі джерела ЕРС  $E_1$  у точці В потенціал буде найвищим, а числове значення, відповідно закону Ома,  $\varphi_B = E_1 - I_1 r_1$ . Потенціал у точці С зменшиться на величину спаду напруги на резисторі  $R_1$  і досягне значення  $\varphi_C = E_1 - I_1 r_1 - I_1 R_1$ . Очевидно, що на іншому резисторі  $R_2$  відбудеться спад напруги за рахунок протікання струму  $I_1$  джерела  $E_1$  та зустрічного струму  $I_2$ , що створює джерело  $E_2$ . Отже потенціал у точці D дорівнює:  $\varphi_D = E_1 - I_1 r_1 - I_1 R_1 + I_2 R_2$ . Наступним кроком у зміні потенціалу в контурі є перехід через джерело струму  $E_2$ . Точки М та А мають один і той же потенціал, чисельно рівний  $\varphi_{MA} = E_1 - I_1 r_1 - I_1 R_1 + I_2 R_2 - E_2 + I_2 r_2 = 0$ . Це рівняння можна переписати у звичному вигляді – другого закону Кірхгофа:

$$E_1 - E_2 = I_1 r_1 + I_1 R_1 - I_2 R_2 - I_2 r_2.$$

Відкладаючи у масштабі на вісі абсцис величину відповідних опорів резисторів та внутрішніх опорів джерел струму, а по вісі ординат різницю потенціалів на кожному із них, отримаємо потенціальну діаграму (рис. 10), яка є наочною ілюстрацією другого Закону Кірхгофа.

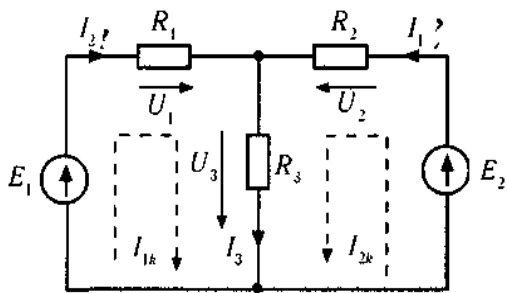


Рис. 9. Електрична схема.

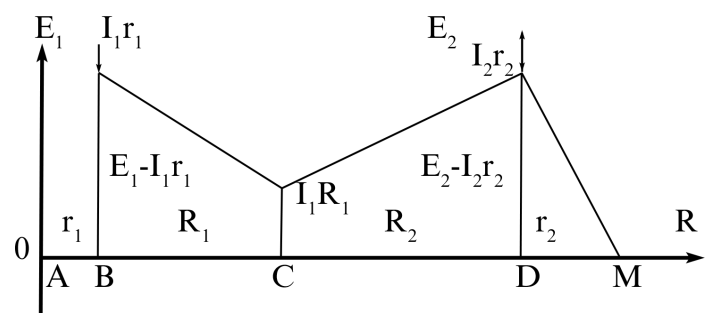


Рис. 10. Потенціальна діаграма.

### Лекція 3. Лінійні електричні кола однофазного змінного струму.

1. Вироблення змінного струму і його основні параметри.
2. Розрахунок параметрів електричних кіл змінного струму методом векторних діаграм.
3. Активно-реактивні навантаження в колах змінного струму.
4. Коефіцієнт потужності і способи його підвищення.

#### Література:

Л-1, с.18-44. Л-2, с.8-35. Л-3, с.36-62.

#### 1. Вироблення змінного струму і його основні параметри.

##### Параметри електричного кола змінного струму

На практиці частіше використовують енергію змінного струму ніж постійного. Переваги використання змінного струму у порівнянні з постійним полягають насамперед у тому, що електроенергію можна передавати на далекі відстані при значно вищій напрузі, а це економічно вигідно. Тобто змінний струм можна трансформувати. Електродвигуни та генератори змінного струму компактніші і мають кращий ККД.

Змінним називають такий струм, величина та напрям протікання якого змінюються з часом. Змінний струм, який використовується в промисловості, побуті і т. д. є такий, що змінюється в часі за синусоїдним законом і виробляється генераторами змінного струму. Його будову у спрощеній формі зображено на рис.

3. Основні складові спрощеної моделі генератора: постійний магніт, обертова рамка  $f1, f2$ ; контактні кільця  $K_1, k_1, k_2, K_2$  і щітки  $Щ1, Щ2$ . У рамці, що обертається в магнітному полі, за законом електромагнітної індукції (закон М. Фарадея – 1831р.) створюється змінна ЕРС індукції.

При різних положеннях рамки відповідні миттєві значення ЕРС будуть виражені формулою:  $e = Blv \sin \alpha$ , де:

$B$  – індукція магнітного поля;

$e$  – ЕРС у рамці;

$\ell$  – довжина активної частини рамки;

$v$  – швидкість активної частини рамки;

$\alpha$  – кут між напрямком векторами швидкості та магнітної індукції.

Якщо  $\alpha = 0$  то  $e = 0$ ; при  $\alpha = 90^\circ$  миттєве значення ЕРС  $e = Blv = E_{\max}$ .

Звідки  $e = E_{\max} \sin \alpha$  (1)

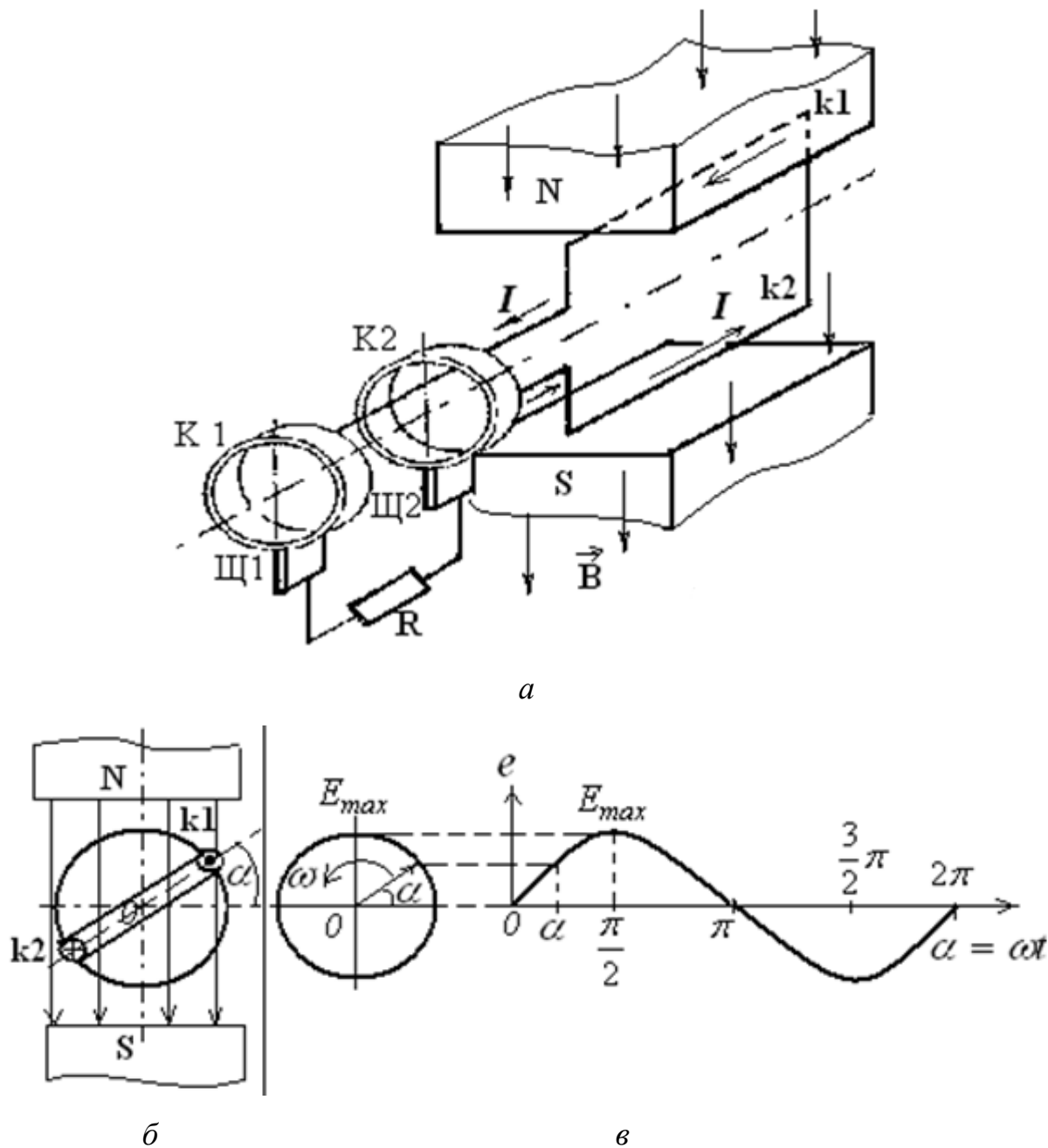


Рис. 3. Схема генератора змінного струму та графічне зображення характеру ЕРС і струму, що виникають у рамці.

Отже, при обертанні рамки, при її вертикальному розташуванні буде індукуватися найбільше значення ЕРС, а при горизонтальному положенні ЕРС дорівнюватиме нулю. Напрямок індукованого струму можна визначити за правилом правої руки.

Для більшої наочності й полегшення розрахунків змінного значення ЕРС –  $e$  скористаємось методом векторних діаграм. Зобразимо амплітудне значення електрорушійної сили  $\vec{E}_{\max}$  одиничним обертовим радіус-вектором (рис.3, в), який обертається синхронно з рамкою. Очевидно миттєве значення ЕРС в рамці дорівнює проекції радіус-вектора  $\vec{E}_{\max}$  на вісь ординат і визначається кутом повороту рамки  $e = f(\alpha)$ . Сила струму на активному навантаженні змінюється аналогічно. Тому миттєві значення ЕРС, сили струму та напруги, залежно від кута повороту рамки, можна вирахувати так:

$$e = E_{\max} \sin \alpha; \quad i = I_{\max} \sin \alpha; \quad u = U_{\max} \sin \alpha \quad (2)$$

Відомо, що певне положення коливної системи у даний момент називається фазою. У нашому випадку фаза визначається величиною кута  $\alpha$ , на який повернулась рамка в магнітному полі і вимірюється в кутових одиницях або радіанах. Якщо рамка за час  $t$  повернеться на кут  $\alpha$ , то кутова швидкість її руху  $\omega = \frac{\alpha}{t}$  (3).

За один період  $T$  рамка повернеться на кут  $2\pi$  - радіан. Тоді  $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$ .

Де:  $f$  – частота обертання рамки.

$\omega$  - кутова швидкість обертання рамки або циклічна частота струму (ЕРС) у рамці.

Підставивши вирази 1 і 2 у вираз 3 отримаємо миттєві значення ЕРС та струму:

$$e = E_{\max} \sin \omega t; \quad i = I_{\max} \sin \omega t; \quad u = U_{\max} \sin \omega t.$$

Якщо в період часу  $t = 0$  рамка знаходилась під деяким кутом  $\varphi$  до горизонтального положення, то такий стан буде називатися початковою фазою. Тому в загальному вигляді останні вирази набудуть такого вигляду:

$$i = I_{\max} \sin(\omega t + \varphi); \quad e = E_{\max} \sin(\omega t + \varphi); \quad u = U_{\max} \sin(\omega t + \varphi)$$

Отже, кожна електрична величина, яка змінюється за законом синуса, характеризується амплітудою  $E_{\max}, I_{\max}, U_{\max}$ , фазою  $\omega t \pm \varphi$ , початковою фазою  $\varphi$ , циклічною частотою  $\omega$ .

Якщо два значення Е.Р.С. або інші параметри однакової частоти з однаковими фазами коливання і будь-якими амплітудними значеннями  $E_1 \neq E_2$  змінюються за законами синусів, то кажуть що Е.Р.С. збігаються за фазою.

Якщо Е.Р.С.  $E_1 \neq E_2$  досягатимуть своїх максимальних або нульових значень неодноразово, тоді кажуть, що Е.Р.С. зсунуті за фазою одна відносно одної (рис. 4).

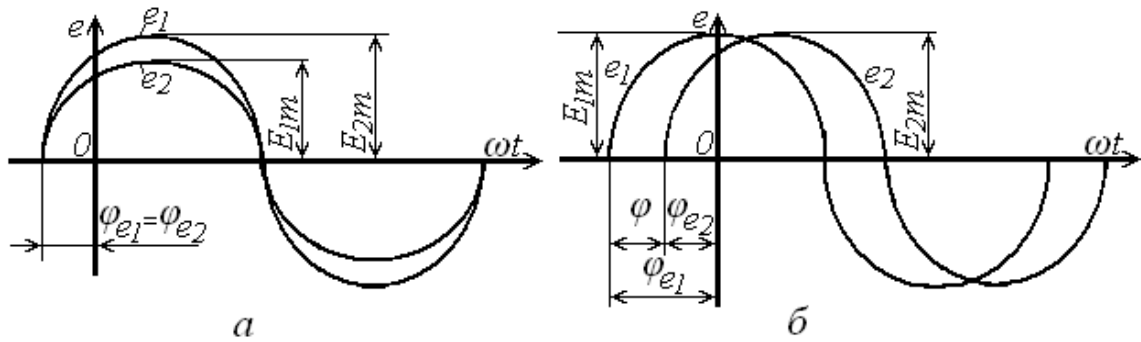


Рис. 4. Графіки зміни ЕРС (струму) від часу:

а – з однаковими фазами коливань; б – зсунуті по фазі.

Виникає питання, як саме буде змінюватись потужність змінного струму та як визначити енергію в колі змінного струму. Для постійного струму закон Джоуля-Ленца можна записати в такому вигляді  $Q = I^2 R t$ . Де:

$Q$  – кількість виділеної теплоти у провіднику;

$R$  – омичний опір провідника;

$t$  – час протікання струму;

$I$  – сила струму.

У випадку протікання змінного струму, кількість виділеної енергії  $dW = i^2 r \cdot dt$ .

У даний вираз підставимо формулу 2:  $dW = I_{\max}^2 R \sin^2 \omega t \cdot dt$ .

Сумарне значення енергії, що виділиться у провіднику за період

$$W = \int_0^T I_{\max}^2 r \sin^2 \omega t \cdot dt; \quad W = I_{\max}^2 r \int_0^T \sin^2 \omega t \cdot dt \cdot \varphi$$

З тригонометрії відомо, що  $\sin^2 \omega t = \frac{1}{2}(1 - \cos 2\omega t)$ . Отже,

$$W = \frac{I_{\max}^2 r}{2} \left( \int_0^T dt - \int_0^T \cos 2\omega t \cdot dt \right). \text{ Звідки } W = \frac{I_{\max}^2 r T}{2}, \text{ так як другий інтеграл дорівнює нулю.}$$

Перепишемо останній вираз у такій формі:  $W = \left( \frac{I_{\max}}{\sqrt{2}} \right)^2 R T$

$$\text{Введемо позначення } I = \frac{I_{\max}}{\sqrt{2}}, \text{ тоді } W = I^2 r T. \quad (4)$$

Де:  $I$  – діюче значення струму.

Діючим (ефективним) значенням змінного струму називають таке значення постійного струму, при якому на однаковому активному опорі кола за той самий час

виділиться така сама кількість енергії, що й при змінному. Діючі значення сили струму, напруги та Е.Р.С. позначають прописними латинськими літерами без індексів –  $I, U, E$ , а їх числове значення можна записати так:  $I = \frac{I_{\max}}{\sqrt{2}}; U = \frac{U_{\max}}{\sqrt{2}}; E = \frac{E_{\max}}{\sqrt{2}}$ .

Можна навести приклад живлення однієї і тієї ж лампи в одному випадку від джерела змінного струму, в іншому – від джерела постійного струму. В обох випадках лампа випромінює однакову потужність. Тобто ми умовно перейшли від параметрів кола змінного струму, розрахунки яких вимагають складних алгебраїчних дій з тригонометричними функціями, до розрахунків з постійними (діючими або ефективними) величинами.

Зауважимо, що електровимірювальні прилади градуують у діючих значеннях згаданих величин.

## **2. Розрахунок параметрів електричних кіл змінного струму методом векторних діаграм.**

Для більшої наочності й полегшення розрахунків при розв'язуванні електротехнічних задач можна скористатися методами векторних діаграм та комплексних чисел.

Розглянемо детальніше суть методу векторних діаграм. Для цього виконаємо певні умовності:

1. Довжина радіус-вектора  $E_{\max}$  або інших параметрів (сили струму, напруги), що обертаються проти годинникової стрілки, дорівнює амплітудному значенню цих параметрів, а їх напрям довільний.

2. Фаза змінної величини (параметра) визначається кутом повороту радіус-вектора відносно довільно вибраної осі.

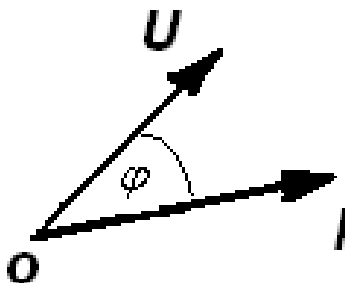
3. На одному рисунку можна зобразити декілька змінних параметрів, зсув за фазою між якими дорівнює куту між радіус-векторами, які ці параметри відображають.

4. Одна і та ж діаграма може відображати змінні періодичні параметри лише однакових частот.

Застосування методу векторних діаграм можна проілюструвати на прикладі.



Нехай ми маємо силу струму і напругу з діючими значеннями  $I$  та  $U$  відповідно, які змінюються з однією частотою  $f$  та зсунуті за фазою на кут  $\varphi$ . На діаграмі очевидно це буде два вектори вибрані за напрямком довільно, розташовані під кутом  $\varphi$  один відносно одного, і за довжиною відкладені у вибраному масштабі (рис. 5).



*Рис. 5. Векторне зображення діючих значень сили струму  $I$  та напруги  $U$  зсунутих за фазою на кут  $\varphi$ .*

### **3. Активно-реактивні навантаження у колах змінного струму**

Як відзначалося вище, електричні кола змінного струму значно відрізняються від електричних кіл постійного струму. Для кола з постійною напругою навантаженням є омичний опір, тоді як у колах змінного струму навантаженням можуть бути активні, індуктивні, ємнісні та повні опори.

#### Активний опір у колі змінного струму.

Опір провідника, як відомо з фізики, залежить від його довжини, площі поперечного перерізу та питомого опору :

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

$\rho$  – питомий опір.

$l$  – довжина провідника.

$S$  – площа поперечного перерізу провідника.

Відзначимо, що один і той же провідник у колах постійного та змінного струму має різну величину. Це пов'язано з явищем поверхневих струмів (скін-ефектом).

Навколо провідника, у якому протікає змінний струм, створюється змінне магнітне поле. На рухомі заряди (наприклад електрони) діє сила Лоренца.

Очевидно, що густина вектора магнітної індукції тим більша, чим ближче до осі провідника, а тому електричний струм розподіляється переважно по поверхні провідника. Особливо це стосується високочастотних струмів.

Отже чим ближче до середини, тим густина струму менша. А це означає, що практично зменшується площа перерізу провідника по якій протікає струм, а отже опір його збільшується. Тоді як у колах постійного струму густина струму на всьому поперечному перерізі провідника однакова. Тому «омічний» опір у колі постійного струму  $R$  завжди менший за активний опір  $r$  у колі змінного струму для одного і того ж провідника. Проте для невеликих частот змінного струму, наприклад для електромережі  $f=50\text{Гц}$  ця різниця не суттєва.

Якщо до електричного кола з активним опором (рис. 6) підвести напругу  $u = U_{\max} \sin \omega t$ , то по ньому протікатиме струм  $i = \frac{u}{r} = \frac{U_{\max} \sin \omega t}{r} = I_{\max} \sin \omega t$ , де амплітудне значення  $I_{\max} = \frac{U_{\max}}{r}$ . Поділивши обидві частини останнього виразу на  $\sqrt{2}$ , одержимо закон Ома для діючих значень струму та напруги  $I = \frac{U}{r}$ .

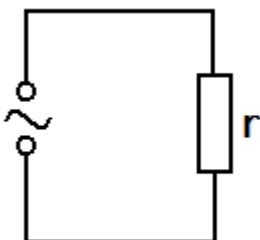


Рис. 6. Активне навантаження

Отже у колі змінного струму з активним опором закон Ома справедливий для миттєвих, амплітудних і діючих значень.

До того ж, на активному опорі миттєві значення сили струму та напруги збігаються за фазою. На графіку та векторній діаграмі вектори струму та напруги накладаються (рис. 7).

Очевидно, що миттєве значення потужності  $P = ui$

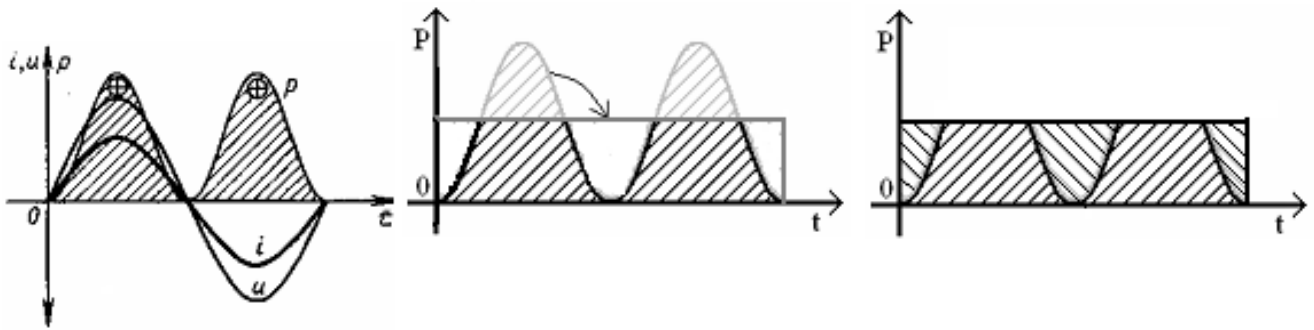


Рис. 7. Графік потужності при активному навантаженні в колі змінного струму.

Миттєве значення потужності  $P = ui$ . Підставивши вирази миттєвих значень струму та напруги, отримаємо рівняння для миттєвого значення потужності:

$$P = U_{\max} I_{\max} \sin^2 \omega t. \text{ Оскільки } \sin^2 \omega t = \frac{1 - \cos 2\omega t}{2}, \text{ то вираз для потужності запишеться}$$

через діючі значення струму і напруги таким чином:  $P = UI(1 - \cos 2\omega t)$  (5).

На рис. 7 зображено графік залежності  $p = f(t)$ . З виразу (5) та графіку слідує, що потужність буде пульсуючою і завжди матиме додатне значення.

Середнє значення діючої потужності за період дорівнює:

$$\bar{P} = \int_0^T UI(1 - \cos 2\omega t) dt; \quad \bar{P} = \frac{1}{T} UI \int_0^T dt - \frac{1}{T} UI \int_0^T \cos 2\omega t \cdot dt.$$

Оскільки другий інтеграл дорівнює нулю, то середнє значення потужності на активному опорі дорівнює добутку діючих значень струму та напруги

$$\boxed{\bar{P} = UI = I^2 R}$$

Активна потужність вимірюється у Вт, кВт, мВт.

Активна енергія, що виділяється на активному споживачі  $W = Pt = UIt = I^2 Rt$ .

Вона вимірюється у ватсекундах (Втс), кіловатгодинах (кВт.год).

Активна електрична енергія необоротно перетворюється в інші види енергії: механічну – у двигунах, теплову – в електронагрівних приладах, у променеву і теплову в освітлювальних лампах тощо.

### Індуктивний опір у колі змінного струму.

Нехай до котушки індуктивності під'єднана напруга, миттєве значення якої  $u = U_{\max} \sin \omega t$  (рис. 8). У результаті протікання змінного струму в котушці (без осердя) виникає змінне магнітне поле, у наслідок чого в ній наводиться ЕРС самоіндукції. При відсутності активного опору ( $R = 0$ ) підведена напруга,

відповідно другому закону Кірхгофа, урівноважується ЕРС самоіндукції. Тобто  $u + e_L = 0$ . Оскільки ЕРС самоіндукції  $e_L = -L \frac{di}{dt}$ , то попередній вираз набуде вигляду:  $u = -e_L = -(-L \frac{di}{dt}) = L \frac{di}{dt}$ . Звідки  $\frac{di}{dt} = \frac{u}{L}$ . Закон залежності величини сили струму від часу  $di = \frac{u}{L} dt = \frac{U_{\max}}{L} \sin \omega t \cdot dt$ . В інтегральній формі останній вираз запишеться так  $i = -\frac{U_{\max}}{\omega L} \cos \omega t = \frac{U_{\max}}{\omega L} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$ . (6)

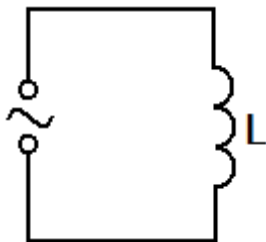


Рис. 8. Індуктивне навантаження.

Очевидно добуток  $L\omega$  є індуктивний опір котушки  $X_L$ , тому вираз 6 запишемо так:  $i = I_{\max} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$  (7).

Отже, у колах змінного струму з індуктивним навантаженням струм відстає від напруги на чверть періоду  $\frac{T}{4}$  або кут  $\frac{\pi}{2}$ .

На векторній діаграмі зсув за фазою зобразиться кутом  $\frac{\pi}{2}$  між вектором напруги і струму (рис. 9).

Для моменту часу  $t=0$  ( $\cos \omega \cdot 0 = 1$ ) вираз 6 запишеться так:

$$U_{\max} = I_{\max} \omega L \quad (8).$$

Отже ми отримали закон Ома для максимальних значень сили струму в котушці та напруги на її кінцях.

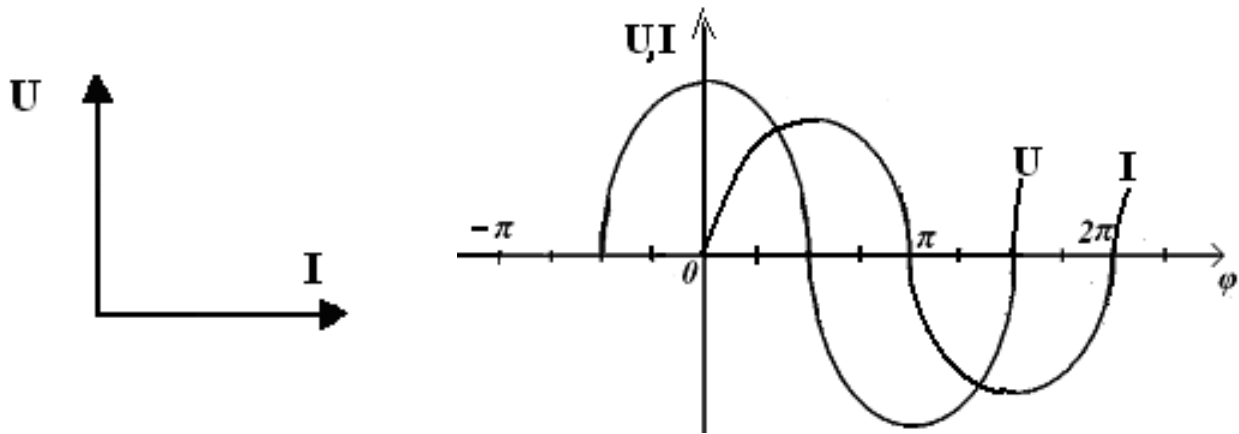


Рис. 9. Векторна діаграма індуктивного навантаження у колі змінного струму.

Поділивши обидві частини рівняння 8 на  $\sqrt{2}$ , отримаємо закон Ома для діючих значень струму та напруги  $I = \frac{U}{X_L} = \frac{U}{\omega L} = \frac{U}{2\pi f L}$ . Де індуктивний опір котушки  $X_L = \omega L = 2\pi f L$ .

Миттєва потужність :

$$p = ui = U_{\max} I_{\max} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \sin \omega t = U_{\max} I_{\max} \sin \omega t \cdot \cos \omega t = -\frac{U_{\max} I_{\max}}{2} \sin 2\omega t = -UI \sin 2\omega t$$

З останнього виразу бачимо, що реактивна потужність пульсує у колі з подвійною частотою. Визначимо її середнє значення за період:

$$\bar{P} = -\frac{UI}{T} \int_0^T \sin 2\omega t \cdot dt = 0$$

Отже реактивна потужність на індуктивному навантаженні буде циркулювати між навантаженням та джерелом струму з подвійною частотою, проте активна потужність за період дорівнює нулю.

### Ємність у колах змінного струму.

Нехай електричне коло складається лише з конденсатора (рис. 10), який не має активного опору і до якого підведена змінна напруга  $u = U_{\max} \sin \omega t$ .

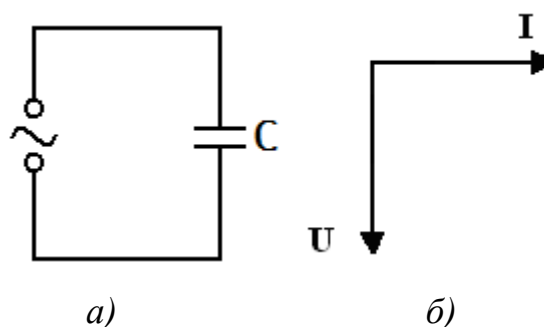


Рис. 10. Електричне коло з ємнісним навантаженням (а) та його векторна

діаграма (б).

З фізики відомо, що ємність провідника (конденсатора)  $C = \frac{q}{u}$  (9).

Де:  $q$  - заряд конденсатора;  $u$  - миттєве значення напруги.

Миттєве значення струму в електричному колі  $i = \frac{dq}{dt}$  або з врахуванням виразу 9

$$i = C \frac{du}{dt} = U_{\max} C \omega \cos \omega t = U_{\max} C \omega \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}).$$

Струм досягне свого амплітудного значення  $I_{\max} = U_{\max} C \omega$  при  $t = 0$  (10)

Позначивши ємнісний опір кола через  $X_c = \frac{1}{\omega C}$  та поділивши обидві частини рівняння 10 на  $\sqrt{2}$ , отримуємо закон Ома для діючих значень струму та напруги  $I = \frac{U}{X_c}$ .

Очевидно миттєве значення потужності:

$$p = U_{\max} I_{\max} \sin \omega t \cdot \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) = \frac{I_{\max} U_{\max}}{2} \sin 2\omega t.$$

Через діючі значення параметрів цей вираз запишеться так:  $p = UI \sin 2\omega t$

Середнє значення потужності за період:

$$\bar{P} = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T UI \sin 2\omega t \cdot dt = \frac{1}{T} UI \int_0^T \sin 2\omega t dt = 0.$$

З цього виразу бачимо, що реактивна енергія в колі з ємнісним навантаженням циркулює з подвійною частотою. Причому, у першу чверть періоду конденсатор заряджається (енергія споживається), а в другу – розряджається, при цьому змінюється знак потужності (енергія віддається назад в електричне коло) і т.д. При цьому споживана колом активна потужність дорівнює нулю.

Послідовне з'єднання активного, ємнісного та індуктивного навантаження в коло змінного струму. Розглянемо електричне коло в якому послідовно з'єднані ємнісне, індуктивне та активне навантаження (рис. 11).

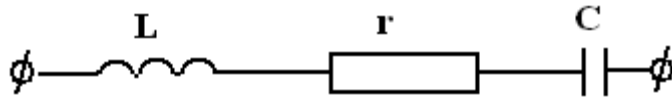


Рис. 11. Послідовне з'єднання індуктивного, активного та ємнісного навантажень.

При послідовному з'єднанні споживачів, очевидно, миттєве значення струму однакове на всіх видах навантаження. Проте значення напруги на кожному із них буде різнитися початковою фазою. У математичній формі закони зміни параметрів від часу запишемо так:  $i = I_{\max} \sin \omega t$ ;  $u_C = U_{\max C} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$ ;

$$u_L = U_{\max L} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}); u_r = U_{\max r} \sin \omega t .$$

За 2 законом Кірхгофа сума миттєвих та діючих значень спадів напруг на окремих ділянках даного кола, дорівнюють сумарній напрузі на всій вітці. Для спрощення розрахунків скористаємось методом векторних діаграм для діючих значень параметрів кола:  $\vec{U} = \vec{U}_C + \vec{U}_L + \vec{U}_R$ .

Побудуємо саму векторну діаграму для суми спадів напруг у колі (рис. 11). За основу беремо діюче значення сили струму  $\vec{I}$ . Напруга на активному навантаженні  $\vec{U}_r$  співпадає за фазою зі струмом, тому розташовуємо обидва вектори горизонтально (вони накладаються).

Спади напруг на ємнісному та індуктивному опорах  $\vec{U}_C; \vec{U}_L$  відповідно відстають та випереджають за фазою струм  $\vec{I}$  на кут  $\frac{\pi}{2}$ . Вектори напруг на індуктивному та ємнісному навантаженнях очевидно розташуються вертикально у протилежних напрямках. Для різних співвідношень напруг на ємнісному та індуктивному опорах отримаємо різні векторні діаграми, що й зображено на рис. 12.

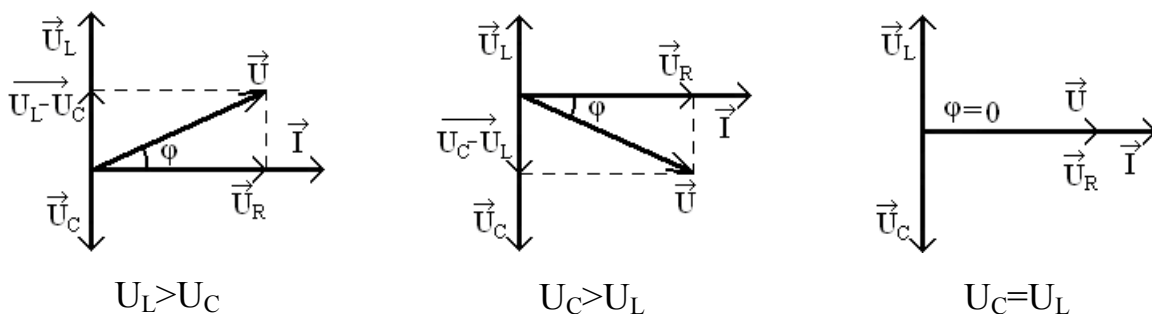


Рис. 12. Векторні діаграми для різних значень ємнісних та індуктивних навантажень електричного кола.

Виконавши дію над векторами, отримаємо так званий трикутник напруг (рис. 13 – а, б, в).

Поділивши або помноживши кожную сторону трикутника напруг на абсолютне значення сили струму у вітці, отримаємо відповідно трикутники опорів (рис. 13,б) або потужностей (рис. 13,в) активно-реактивного навантаження.

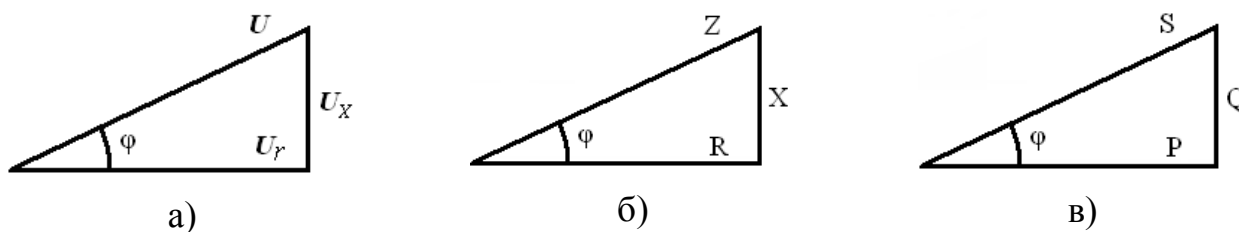


Рис. 13. Трикутники: напруги – а, опорів – б, потужностей – в.

В алгебраїчній формі повний опір вітки  $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}$ .

Закон Ома для такого кола запишеться так:  $I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}}$  (11)

З виразу 11 бачимо, що при рівності індуктивного та ємнісного опорів діюче значення сили струму в колі набуде найбільшого значення. Тобто, активна складова сили струму найбільша при компенсації ємнісного та індуктивного опорів. Таке явище називають резонансом струмів.

З трикутника потужностей (рис. 13, в) слідує те, що сумарне значення потужності для всієї вітки  $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$  або  $S = U \cdot I$ .

Відношення активної складової до повної потужності називають коефіцієнтом потужності:  $\cos \varphi = \frac{P}{S}$ .

Фізичний зміст коефіцієнту потужності полягає в тому, що за його значенням можна судити про долю активного навантаження від сумарної (активно-реактивної) споживаної потужності.

Аналізуючи векторну діаграму та останній вираз, можна зробити висновок, що в електричних колах змінного струму циркулює тим більша потужність, чим більший реактивний опір при однаковій активній складовій потужності  $P$ . Це



явище негативно позначається на роботі електромережі, так як в обмотках генераторів, трансформаторів та споживачів циркулюють високі струми.

Отже для раціонального використання електромережі потрібно домагатися балансу між ємнісним та індуктивним навантаженнями з метою підвищення коефіцієнту потужності. З цією метою на підприємствах, де переважає індуктивне навантаження, ставлять спеціальні компенсатори або блоки ємностей, що дає можливість досягти резонансу струмів або до цього явища наблизитись. У цьому випадку коефіцієнт потужності  $\cos \varphi$  наближається до одиниці і активна потужність мережі  $P \approx UI$ .

Паралельне з'єднання споживачів, резонанс струмів.

При паралельному з'єднанні споживачів (рис. 14), відповідно до першого закону Кірхгофа, діюче значення загального струму дорівнює сумі струмів окремих віток  $I = I_1 + I_2$ . Так як у вітках різного роду навантаження мають різні значення, то попередній вираз потрібно записати у векторній формі  $\vec{I} = \vec{I}_1 + \vec{I}_2$ .

Побудуємо векторну діаграму для цих струмів.

За основу беремо спільну для всіх опорів напругу  $U$ .

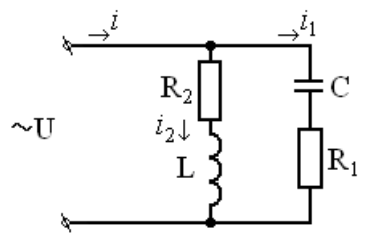


Рис. 14. Паралельне з'єднання споживачів.

З векторної діаграми слідує, що  $I = \sqrt{(I_{a1} + I_{a2})^2 + (I_C - I_L)^2} = \sqrt{I_a^2 + (I_C - I_L)^2}$

При умові рівності струмів  $I_L = I_C$  настає резонанс струмів.

Потужність електричного кола  $S = UI$  є повною потужністю, що виділяється на активному та реактивному опорах. Активна складова потужності  $P = UI_a$ , а відношення активної складової до значення повної потужності дорівнює коефіцієнту потужності:  $\cos \varphi = \frac{P}{S}$ .

У розгалужених електричних колах з різними видами опорів спочатку розраховують повні опори окремих віток, після чого їх додають так, як це

здійснюється при додаванні активних опорів при послідовному та паралельному їх з'єднанні.

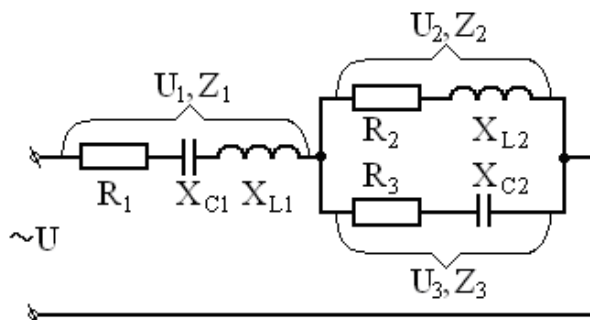


Рис. 15. Схема розгалуженого кола змінного струму.

Наприклад, нехай ми маємо розгалужене коло (рис. 15), в якому відомо прикладену напругу до окремих віток та значення всіх опорів, а невідомими є струми у цих вітках.

Розв'язання цієї задачі здійснюється у такій послідовності:

1. Розраховуємо еквівалентні опори у кожній вітці:

$$Z_1 = \sqrt{R^2 + (X_{L1} - X_{C1})^2}; Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_{L2}^2}; Z_3 = \sqrt{R^2 + X_{C2}^2};$$

2. Додаємо паралельно з'єднані еквівалентні опори у вітках 2 та 3 і до них додаємо послідовно під'єднаний опір у вітці 1:

$$Z = Z_1 + \frac{Z_2 Z_3}{Z_2 + Z_3}; \quad U_1 = IZ_1;$$

3. За законом Ома вираховуємо сили струму у кожній вітці:  $I_1 = \frac{U}{Z}; I_2 = \frac{U - U_1}{Z_2}$ .

4. За 1-м законом Кірхгофа обчислимо струм у 3-й вітці:  $I_3 = I_1 - I_2$

#### **Лекція 4. Трифазні системи змінного струму.**

1. Загальні поняття про створення та використання трифазного змінного струму.
2. З'єднання споживачів зіркою, співвідношення параметрів електричного кола.
3. З'єднання споживачів трикутником, співвідношення параметрів електричного кола.
4. Співвідношення потужностей при перемиканні споживачів з “трикутника” на “зірку” і навпаки.

#### **Література:**

Л-1, с.48-58. Л-2, с. 38-46. Л-3, с. 65-88. Л-5, с. 97-110. Л-8, с. 151-188.

#### **1. Загальні поняття про створення та використання трифазного змінного струму.**

Трифазною системою змінного струму називають систему трьох змінних ЕРС однакової частоти та амплітудних значень, зсунутих за фазою на  $120^{\circ}$ , створених одним джерелом енергії; лінію електропередач і споживачі електроенергії.

Створення трифазного змінного струму здійснюється за допомогою трифазного генератора електричної енергії, схематично зображеного на рис. 1.

Генератор складається з ротора і статора. Ротор є джерелом магнітного поля і являє собою систему постійних магнітів (на рисунку постійний електромагніт), що живляться від джерела постійного струму. Статор, як і ротор, виготовляють з електромагнітної сталі, що має високу магнітну проникність та малі втрати на перемагнічування. У середині статора (в пазах магнітопроводу циліндричної форми) розташовані три однакові котушки (обмотки), ізольовані одна від одної і розташовані по колу під кутом  $120^{\circ}$ . Обмотки статора іноді називають фазами, кожна із яких має початок та кінець, і на схемах відповідно позначені великими літерами А,В,С та Х;У;Z.

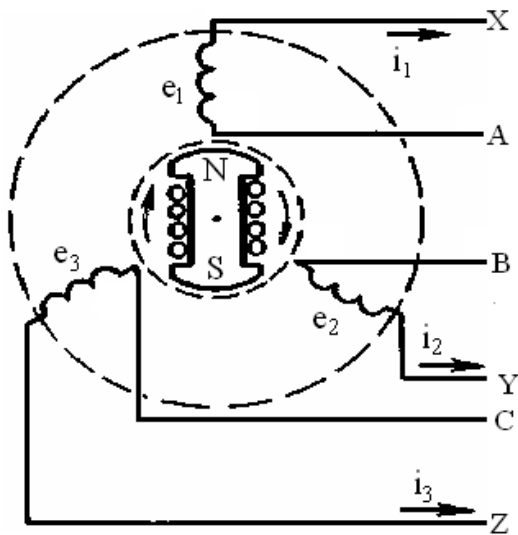


Рис. 1. Будова трифазного генератора змінного струму

Якщо ротор генератора обертати рівномірно з кутовою швидкістю  $\omega$  за годинниковою стрілкою, то в котушках буде індукуватися ЕРС, миттєві значення яких відповідно дорівнюють:

$$e_1 = E_m \sin \omega t;$$

$$e_2 = E_m \sin(\omega t - 120^\circ);$$

$$e_3 = E_m \sin(\omega t - 240^\circ).$$

Генератор, споживачі та лінія електропередач утворюють трифазну (багатофазну) систему. ЕРС трифазної системи можна зобразити графічно та у вигляді векторної діаграми (рис. 2 а, б).

Багатофазну систему називають симетричною, якщо всі ЕРС (напруги, струми) однакові за величиною і кожна із них відстає (або випереджує) за фазою від попередньої на однаковий кут. Якщо ж не задовольняються ці умови, то система ЕРС (напруг, струмів) не симетрична.

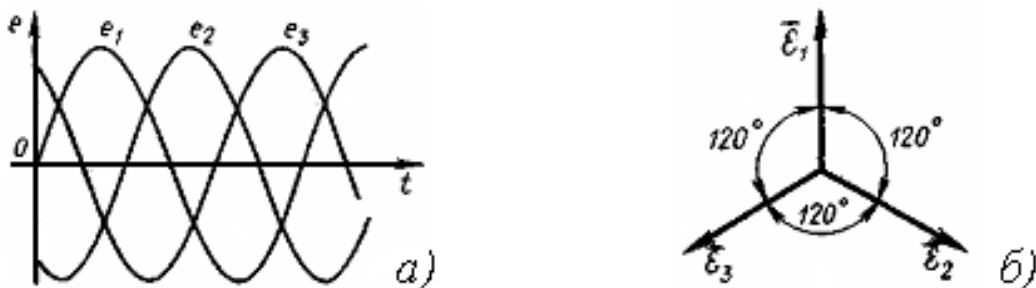


Рис. 2. Хвильова(а) та векторна (б) діаграми змінного струму.

У симетричних трьохфазних системах амплітудні значення напруг, ЕРС та струмів у всіх фазах однакові, а їх миттєві значення зсунуті за фазою на одну третю періоду  $\frac{T}{3}$  або  $\frac{2}{3}\pi$  радіан.

## 2. З'єднання споживачів зіркою, співвідношення параметрів електричного кола

Якщо замкнути всі три фази на рівні за величиною і однакові за характером опорів споживачі електроенергії (рис.3), то матимемо незв'язане трифазне коло, по якому протікають рівні за величиною і зсунуті за фазою система струмів, амплітудні значення яких рівні:  $I_{mA} = I_{mB} = I_{mC}$

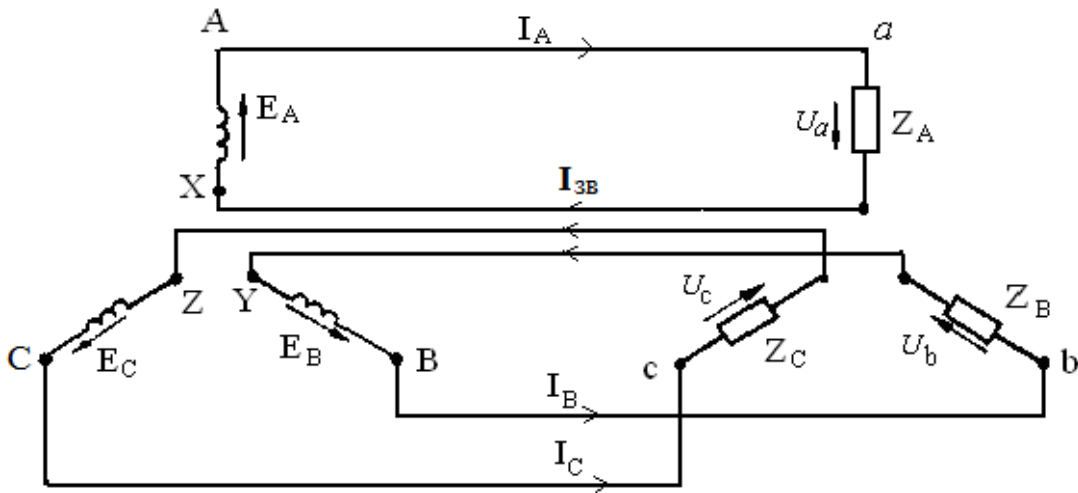


Рис. 3. Незв'язане трифазне електричне коло

Миттєві значення струмів у кожній фазі будуть змінюватись за законами:

$$i_A = I_{mA} \sin \omega t; i_B = I_{mB} \sin(\omega t - \frac{2}{3} \pi); i_C = I_{mC} \sin(\omega t - \frac{4}{3} \pi)$$

Якщо ж усі три зворотні струми пустимо по одному провіднику, який називають нульовим, то матимемо зв'язану трифазну симетричну систему, у якій провідники Аа, Вв, Сс – називають лінійними проводами, а провідник Оо – нульовим проводом (рис. 4).

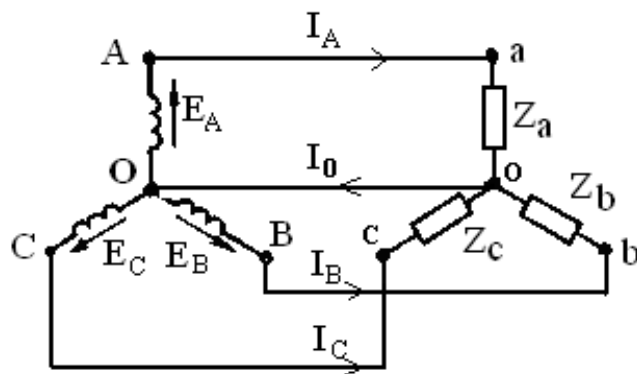


Рис. 4. Трифазна система.

Будемо вважати, що у лінійних проводах струми направлені до споживачів, а в нульовому від споживачів.

Таким чином з шестипровідної одержали чотирьох провідну систему і таке з'єднання називають "зіркою". Можна обійтись і без нульового проводу, якщо навантаження симетричне. При цьому будемо мати трьохпровідну систему.

З'єднання споживачів "зіркою" називають таким, коли кінці споживачів з'єднуються (разом) в один вузол, а їх початки під'єднують до лінійних проводів трифазної системи (рис. 5).

Струми в лінійних провідниках називають лінійними, тобто  $I_A, I_B, I_C \Rightarrow I_L$ .

Струми, що протікають у навантаженнях, називають фазними  $I_a, I_b, I_c \Rightarrow I_\phi$ . При з'єднанні споживачів "зіркою" очевидно  $I_\phi = I_L$ .

Напруги між лінійними проводами  $U_{AB}; U_{BC}; U_{CA}$  називають лінійними, а спади напруг на споживачах (напруги між лінійними проводами і нульовою точкою)  $U_a; U_b; U_c$  називають фазними. При симетричному навантаженні діючі значення фазних напруг і струмів рівні:  $U_a = U_b = U_c = U_\phi$ ;  $I_A = I_B = I_C = I_\phi$ .

Розглянемо окремі контури трифазної системи, що зображена на рис. 5. Запишемо рівняння другого закону Кірхгофа для контурів ОАао; ОВво; ОСсо :

$$U_{AB} = U_a + (-U_b)$$

$$U_{BC} = U_b + (-U_c);$$

$$U_{CA} = U_c + (-U_a)$$

За цими рівняннями побудуємо векторну діаграму для симетричного навантаження (рис. 6).

Розглянувши рівнобедрені трикутники векторної діаграми, можна вирахувати залежність між лінійними і фазними значеннями струмів та напруг:

$$2U_\phi \cos 30^\circ = U_L; \quad U_L = 2U_\phi \frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3}U_\phi. \quad \text{Рівність лінійних і фазних струмів є}$$

очевидним, так як і фазний і лінійний струм є струмом однієї вітки.

Отже при з'єднанні споживачів зіркою :  $U_L = \sqrt{3}U_\phi; I_L = I_\phi$ .

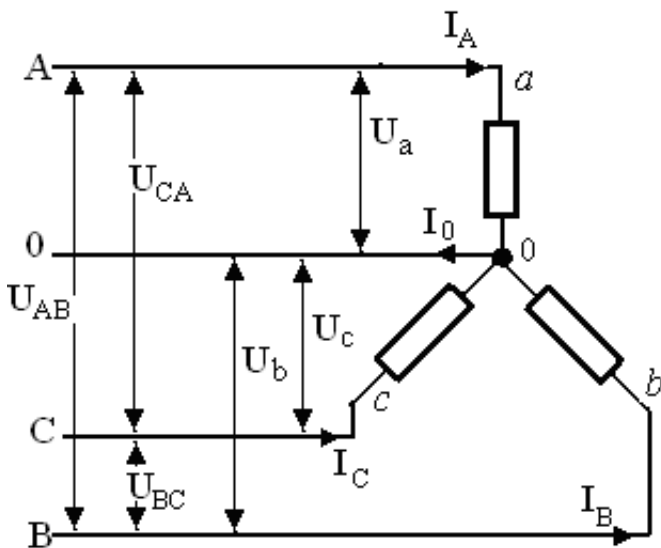


Рис. 5. З'єднання споживачів зіркою.

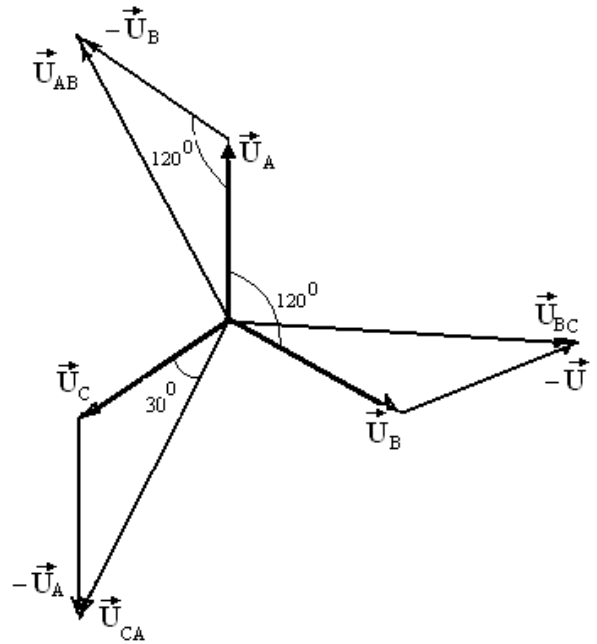


Рис. 6. Векторна діаграма спадів напруг при з'єднанні споживачів зіркою

Розглянемо окремі випадки протікання електричного струму в нульовому проводі О-о:

1. Симетричне навантаження. При симетричному навантаженні струми у всіх резисторах однакові. Векторна діаграма струмів зображена на рис. 7. Відповідно першому закону Кірхгофа сума струмів вузла «о» дорівнює нулю. Тобто, сума фазних струмів, що втікають до вузла, буде дорівнювати струмові нульового проводу. З векторної діаграми слідує, що сума фазних струмів дорівнює нулю. Отже при симетричному навантаженні струм у нульовому проводі відсутній –  $I_0 = 0$ .

2. Обірваний лінійний провід. З векторної діаграми (рис.8) видно, що струм нульового проводу досягає величини струму лінійного проводу  $I_0 = I_n$ .

Очевидно при несиметричному навантаженні струм у нульовому провіднику матиме певне навантаження  $I_0 = \sum I_i$ .

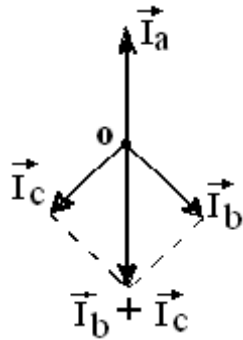


Рис. 7. Діаграма струмів при симетричному навантаженні

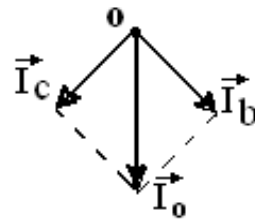


Рис. 8. Діаграма струмів при обриві лінійного провідника.

### 3. З'єднання споживачів трикутником, співвідношення параметрів електричного кола.

З'єднання споживачів трикутником називають таким, коли кінець першого споживача приєднується до початку другого, кінець другого до початку третього, кінець третього до початку першого і вказані точки приєднують до лінійних проводів (рис.7).

Очевидно напруги  $U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}$  та  $U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}$  рівні між собою, тобто  $U_{л} = U_{\phi}$ .

Для знаходження співвідношення між лінійними  $I_A, I_B, I_C$  та фазними  $I_{ab}, I_{bc}, I_{ca}$  струмами запишемо рівняння I закону Кірхгофа у трьох вузлах **а, в та с**:  $I_A = I_{av} - I_{ca}$ ;  $I_B = I_{bc} - I_{ab}$ ;  $I_C = I_{ca} - I_{bc}$ .

Векторну діаграму діючих значень струмів та напруг зображено на рис. 10. Її розпочинають будувати з лінійних та фазних напруг, які рівні між собою:

$$U_{л} = U_{\phi}$$

Потім відкладають фазні струми. Залежно від характеру навантаження фазний струм може співпадати з напругою при активному, відставити від неї при індуктивному та випереджати при ємнісному навантаженнях. Для симетричного індуктивного навантаження, з'єданого трикутником, векторна діаграма зображена на рис. 9. Співвідношення між лінійними та фазними струмами можна визначити із рівнобедрених трикутників, що зображені на діаграмі, сторонами яких є фазні та лінійні струми.



Отже при з'єднанні споживачів трикутником:  $\boxed{U_{\text{Л}}=U_{\phi}} \boxed{I_{\text{Л}}=\sqrt{3}I_{\phi}}$

Так як при симетричному навантаженні активні опори рівні  $r_{ab} = r_{bc} = r_{ca}$ , зсув фаз у всіх вітках однаковий  $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = \varphi$ , рівні діючі значення струмів та напруг, то загальна активна потужність споживачів  $P = 3I_{\phi}U_{\phi} \cos\varphi$ . Враховуючи залежність між фазними та лінійними значеннями струмів та напруг при з'єднанні споживачів “зіркою” і “трикутником”, ми отримаємо один і той же вираз для потужності виражений через лінійні значення струму та напруги:

$$P = 3P_{\phi} = 3U_{\phi}I_{\phi} \cos\varphi = \sqrt{3}U_{\text{Л}}I_{\text{Л}} \cos\varphi.$$

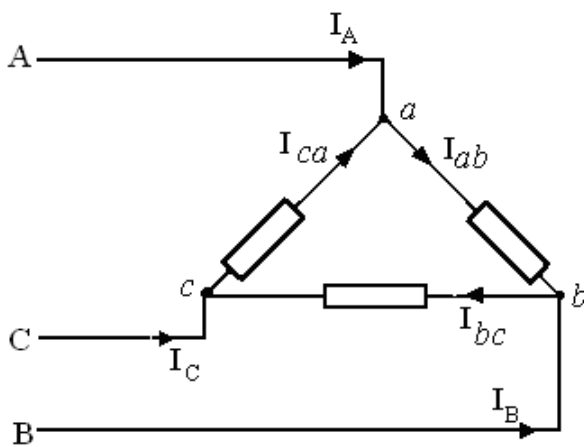


Рис. 9. З'єднання споживачів трикутником.

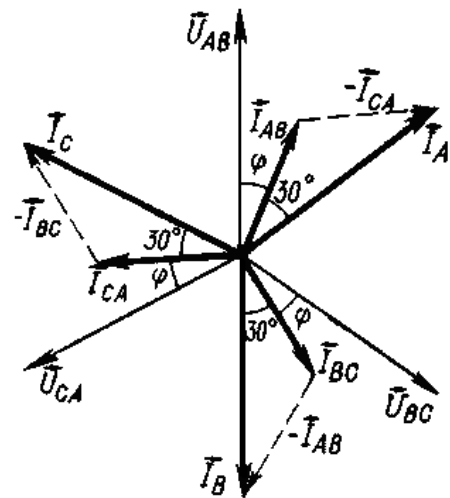


Рис. 10. Векторна діаграма для з'єднання споживачів зіркою.

Таким чином, для симетричного навантаження трифазної системи матимуть місце такі співвідношення для активної, реактивної та повної потужностей:

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

Де:  $P$  - активна (корисна) потужність;

$Q$  - реактивна потужність;

$S$  - повна потужність.

Проте, якщо один і той же споживач спочатку з'єднати «зіркою», а потім «трикутником», то споживана потужність матиме різні значення.

#### 4. Співвідношення потужностей при перемиканні споживачів з

### “трикутника” на “зірку” і навпаки.

При з'єднанні споживачів зіркою та трикутником до електромережі споживана потужність відповідно дорівнює:

$$P_3 = 3I_\phi U_\phi \cos\varphi = 3U_\phi^2 \frac{1}{Z} \cos\varphi = 3\frac{U_\phi^2}{3} \frac{1}{Z} \cos\varphi = U_\phi^2 \frac{1}{Z} \cos\varphi ;$$

$$P_m = 3U_\phi I_\phi \cos\varphi = 3U_\phi^2 \frac{1}{Z} \cos\varphi = 3U_\phi^2 \frac{1}{Z} \cos\varphi .$$

З цих виразів можна отримати співвідношення між потужностями, що споживаються навантаженнями при з'єднанні їх спочатку «зіркою», а потім

«трикутником»:  $\frac{P_m}{P_3} = 3$ .

Отже, якщо приєднати один і той же споживач до електромережі спочатку «трикутником», а потім «зіркою», то споживана потужність зміниться втричі. А це призведе до зростання електричного струму на обмотках споживача, які можуть вийти з ладу. Тому прилади, що приєднують до мережі різними способами, мають позначення –  $\Delta/Y; 220/380$ .

Це означає, що при з'єднанні обмоток споживача трикутником його потрібно вмикати до трифазної мережі напругою 220В, а зіркою – 380В.

## **Лекція 5-6. Електричні вимірювання і прилади. (4 год.)**

1. Значення та особливості електричних вимірювань.
2. Класифікація електровимірювальних приладів.
3. Основні загальні вузли та деталі електровимірювальних приладів.  
(Самостійно)
4. Прилади електромагнітної, магнітоелектричної та електродинамічної систем.
5. Будова і принцип дії фазометра. Вимірювання коефіцієнта потужності.
6. Лічильник індукційної системи. Вимірювання електричної енергії.
7. Цифрові вимірювальні прилади.
8. Методи електричних вимірювань: (Самостійно)
  - 1) Вимірювання струму та розширення меж вимірювання амперметра.
  - 2) Вимірювання напруги та розширення меж вимірювання вольтметра.
  - 3) Способи вимірювання опорів.

### **Література:**

Л-1, с.61-92. Л-2, с. 48-95. Л-3, с. 145-169.

### **1. Значення та особливості електричних вимірювань.**

Всякий технологічний процес включає вимірювання. Ця операція використовується в різних технологіях, майже в усіх виробничих процесах, у всіх галузях виробництва.

Вимірювання – це процес знаходження числового значення фізичної величини дослідним шляхом за допомогою спеціальних технічних засобів. Результати вимірювання визначають числом та назвою одиниці вимірювання.

Особливість електричних вимірювань полягає в тому що:

1) органи чуття людини не можуть безпосередньо визначити електричні параметри. Тому покази електровимірних приладів - основа для визначення параметрів електричного кола та електричних пристосувань;

2) електричні вимірювання відрізняються простотою, високою надійністю, точністю і значною чутливістю. Виходячи з цього електричні вимірювання широко використовують для вимірювання неелектричних величин. Наприклад:

температури, ваги, тиску, тощо. Застосування в сучасній промисловості автоматики та автоматизації виробничих процесів основана на електричних вимірюваннях;

3) електровимірювання може здійснюватись з будь-якою швидкістю на будь-якій відстані.

Відомі вчені М.В.Ломоносов та Г. В. Ріхман у 1745 році вперше продемонстрували прилад для вимірювання потенціалу наелектризованого тіла.

## **2. Класифікація електровимірювальних приладів.**

Електровимірювальними приладами називають електричні пристрої, призначені для вимірювання фізичних величин. Їх класифікують за такими ознаками:

1. За характером відліку:

1) Показуючі. Показчиком у таких пристроях стрілка (стрілочні прилади) або світовий показчик, а також цифрові прилади.

2) Самописи – спеціальні прилади, які автоматично записують вимірювану величину на паперову стрічку. Такі прилади широко використовують для автоматичного контролю та керування, технологічними процесами. Наприклад, прості самописи – барограф, термограф, апарат для записування кардіограми серця, витратоміри тощо.

3) Інтегруючі прилади дають можливість одержати сумарне значення вимірюваних величин протягом певного часу. Наприклад, лічильник електричної енергії.

2. За родом вимірюваної величини. Найпоширенішими серед них є прилади, що представлені в таблиці 1.

Таблиця 1.

| Вимірювана електрична величина  | Назва приладу                             | Умовне позначення приладу  |
|---------------------------------|---|----------------------------|
| Струм                           | Амперметр, міліамперметр, мікрометр       | $A; mA; \mu A;$            |
| Напруга, ЕРС                    | Вольтметр, мілівольтметр, кіловольтметр,  | $V; mV; kV$                |
| Опір                            | Омметр, кілоомметр, мегомметр             | $\Omega; k\Omega; M\Omega$ |
| Потужність                      | Ватметр, кіловатметр, ВАрметр             | $W; kW; Var$               |
| Енергія                         | Лічильники активної та реактивної енергії | $Wh; kWh; Varh$            |
| Частота змінного струму         | Частотомір (герцметр)                     | $Hz$                       |
| Кут зсуву фаз                   | Фазометр                                  | $\varphi$                  |
| Ємність                         | Фарадометр                                | $F$                        |
| Магнітний потік                 | Веберметр                                 | $Wb$                       |
| Малі значення струму та напруги | Гальванометр                              | $G$                        |

3. За призначенням та способом використання:

- 1) щитові (стаціонарні) для використання в нерухомому стані в розподільчих електрощитах та пультах керування енергосистемою тощо;
- 2) переносні (лабораторні) використовуються в будь-якому місці для різних лабораторних досліджень та експериментів з певною точністю.

4. За родом струму що використовується: постійного та змінного струму, постійного та змінного струму в одному приладі; трифазного змінного струму.

5. За класом точності. Ця класифікація здійснюється за ознакою – наскільки адекватні покази приладу дійсному значенню вимірюваної величини.

При електричних вимірюваннях допускаються похибки: – абсолютні та відносні.

Абсолютна похибка – це різниця між показом приладу і дійсним значенням вимірюваної величини:  $\Delta A = A_{\text{вим}} - A_{\text{д}}$

Величину обернену за знаком до абсолютної похибки називають поправкою приладу:  $K = -\Delta A$ .

Дійсне значення вимірної величини, на основі попередніх виразів:

$$A_d = A_{\text{вим}} + K.$$

Абсолютна похибка не дає повного уявлення про точність процесу вимірювання, тому користуються поняттям відносної похибки. Вона визначається відношенням абсолютної похибки до дійсного значення вимірюваної величини:

$$\beta = \frac{\Delta A}{A_d} 100\%$$

Отже, чим більша вимірювана величина, тим менша відносна похибка. Наприклад, якщо  $\Delta A = 0,5A$ , то при вимірюванні сили струму  $I_1 = 1A$  та  $I_2 = 100A$  відносні похибки відповідно рівні:

$$\beta_1 = \frac{0,5}{1} 100\% = 50\%; \quad \beta_2 = \frac{0,5}{100} 100\% = 0,5\%$$

Отже, при вимірюванні одним і тим же приладом відносна похибка на початку шкали на два порядки більша ніж у її кінці. Тобто, точнішим було вимірювання тоді, коли покажчик знаходився у другій, правій, половині шкали приладу.

Для оцінки точності вимірювання приладу використовують так звану зведену похибку, яка визначається відношенням максимальної абсолютної похибки вимірювання до межі вимірювання, взятої у відсотках. Тобто:

$$\gamma = \frac{\Delta A_{\text{max}}}{A_{\text{max}}} 100\%$$

Максимальне значення  $A_{\text{max}}$  ще називають номінальним значенням  $A_{\text{ном}}$ .

Для приладів з двохсторонньою шкалою (таких, що мають нуль у середині шкали) номінальне, або граничне, значення приймається, як сума верхньої і нижньої меж вимірювання.

За клас точності приладу береться величина зведеної похибки, яка позначається на шкалі приладу. Розрізняють 8 класів точності приладів: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0.

Ціна поділки визначається відношенням номінального значення цього приладу

(межі вимірювання) до кількості поділок на його шкалі:

$$C_n = \frac{A_n}{N}$$

Номинальне значення найчастіше позначається біля клеми вмикання приладу або встановлюється на корпусі спеціальним перемикачем.

Властивість приладу реагувати на мінімальні зміни вимірюваної величини називають чутливістю. Вона визначається відношенням максимального лінійного переміщення покажчика приладу, вираженого в поділках шкали, до номінального значення вимірюваної величини (або чутливість приладу – це величина, обернена до ціни поділки):  $S = \frac{N}{A_{\text{вим}}}$ .

6. Залежно від зовнішньої температури та вологості повітря прилади поділяють на 3 групи (табл.2).

Таблиця 2.

| Група | Температура      | Відносна вологість |
|-------|------------------|--------------------|
| А     | Від + 10 до + 35 | 80%                |
| Б     | Від – 20 до + 50 | 80%                |
| В     | Від – 40 до + 60 | 98%                |

7. За ступенем захисту від дії зовнішніх магнітних та електричних полів прилади поділяють на три категорії:

- 1) Перша категорія – додаткова помилка не перевищує 0,5%.
- 2) Друга категорія – додаткова помилка не перевищує 1,0%.
- 3) Третя категорія – додаткова помилка не перевищує 2,5%.

8. За принципом дії електровимірювальні прилади поділяють на магнітоелектричні, електромагнітні, електродинамічні, феродинамічні, індукційні, електростатичні.

### **3. Основні загальні вузли та деталі електровимірювальних приладів.**

Електровимірювальні прилади будь-якої системи складаються з вимірювального механізму, вимірного кола, що визначається призначенням

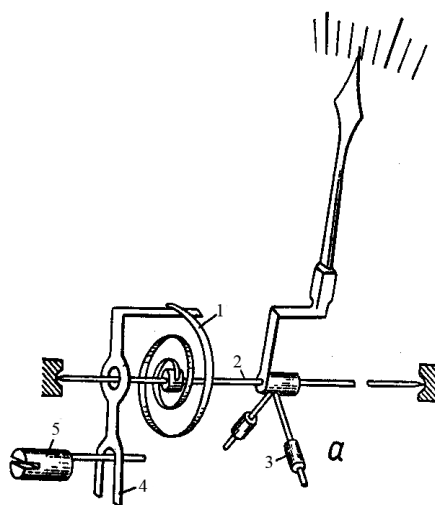
приладу, пристосування для відліку вимірюваної величини, заспокоювача, пристрою для створення протидіючого моменту тощо.

Вимірювальний механізм – це електричний пристрій, що перетворює підведену електроенергію у механічну енергію обертання рухомої частини на деякий кут. Електроенергія при цьому споживається з вимірюваного електричного кола.

Пристосування для відліку фізичної величини складається з шкали та покажчика. Шкали можуть бути рівномірними – з однаковою відстанню між поділками та нерівномірними. Для кращого сприймання іноді використовують плоску дзеркальну пластину.

Покажчик може бути у вигляді звичайної стрілки або пучка світла “зайчика” з темною вертикальною рисочкою.

Пристрій для створення протидіючого механічного моменту складається з осі 2, що вільно обертається в підп’ятниках; пружини 1, що власне і створює протидіючий механічний момент; коректора 5 та поводка коректора 4 (рис. 1).



*Рис. 1 Пристрій для створення протидіючого механічного обертового моменту аналогових приладів.*

У приладах-логометрах протидіючий та обертовий моменти створюються електромагнітними силами. Кут відхилення залежить від співвідношення між струмами, що протікають по двох котушках, які з’єднані між собою під кутом  $90^{\circ}$  або  $60^{\circ}$  і розташованих між полюсами постійного магніту (рис. 2). Котушки ввімкнені зустрічно, а тому обертові моменти направлені у протилежних напрямках.



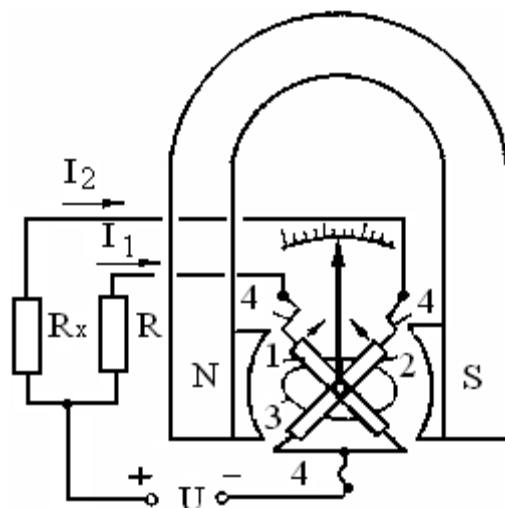


Рис. 2. Будова приладів логометричного типу.

При відсутності струму в котушках, стрілка розташовується в будь-якому положенні, а не повертається на нульову поділку, як у приладах з механічною протидією.

Для того, щоб рухома частина швидше зупинялась використовують заспокоювачі. Найпоширеніші серед них повітряні та магніто динамічні, рідинні (рис. 3).

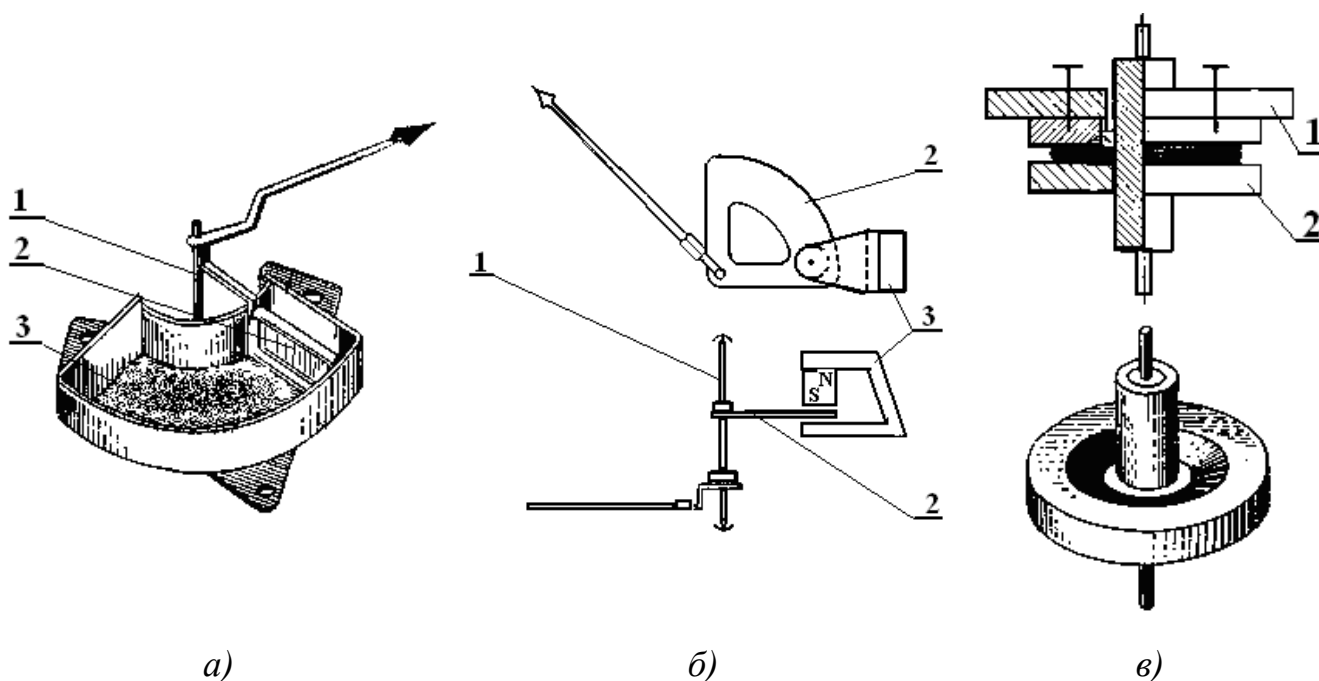


Рис. 3. Будова повітряного заспокоювача – а; магнітодинамічного заспокоювача – б; рідинного – в.

Принцип дії повітряного заспокоювача зображено на рисунку 3,а. На протилежному кінці покажчика (стрілки) легка пластинка (поршень), яка розташована у криволінійному циліндрі. При коливаннях стрілки, а отже і

поршня, останній зазнає опору з боку повітря у замкненому об'ємі, що зумовлює швидке затухання коливань стрілки.

Магнітодинамічний заспокоювач – це алюмінієвий сегмент на осі, що розташований між полюсами постійного магніту. При коливаннях стрілки сегмент зазнає гальмування внаслідок дії магнітного поля постійного магніту на колові струми, що утворюються в алюмінієвій пластині.

Кожний прилад має корпус, клеми для з'єднання в електричному колі, коректор установлення стрілки приладу на нульову поділку, перемикачі для зміни межі вимірювання тощо.

За принципом дії розрізняють такі найпоширеніші системи електровимірювальних приладів: магнітоелектрична, електромагнітна, електродинамічна, індукційна, електростатична та інші.

#### **4. Прилади електромагнітної, магнітоелектричної та електродинамічної систем.**

Прилад магнітоелектричної системи (рис. 4) складається з нерухомої та рухомої частин. Нерухому частину складає підковоподібний магніт М з полюсними наконечниками N та S. Стальний барабан 1 разом з постійним магнітом утворюють однорідне магнітне поле у повітряному зазорі між полюсними наконечниками і стальним барабаном.

Рухома частина приладу складається з осі або двох півосей  $O-O^1$ , легенької алюмінієвої рамки 3, прикріпленої до осі. На рамку намотана котушка з тонкого мідного дроту діаметром 0,02 – 0,2 мм.

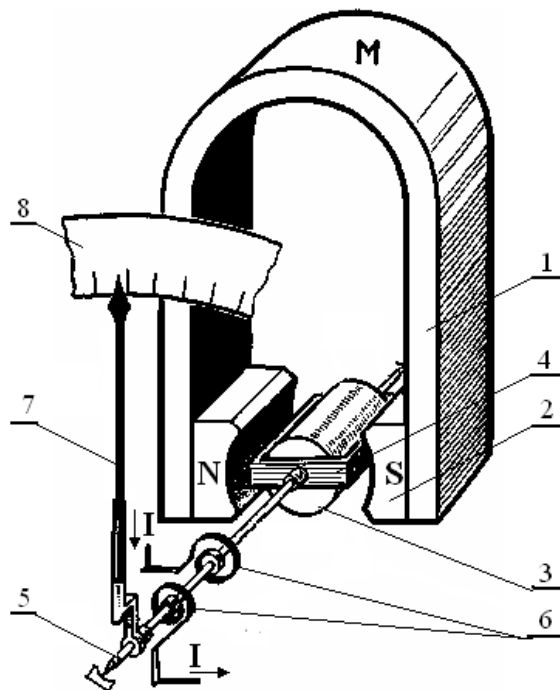


Рис. 4. Прилад магнітоелектричної системи.

Через пружини 5, що створюють притидіючий механічний обертовий момент, до котушки 3 підводиться вимірюваний струм. Унаслідок взаємодії магнітного поля постійного магніту зі струмом в котушці, виникає обертовий момент, тому рамка повертається на величину кута, пропорційного силі струму.

При протіканні електричного струму в обмотці приладу, на рамку діє обертовий електромагнітний момент чисельно рівний:

$$M_{em} = Fd = BIl\omega d = CI$$

Де:  $B$  – магнітна індукція поля створеного постійним магнітом;

$I$  – сила струму в котушці;

$\omega$  – кількість витків котушки;

$d$  – діаметр траєкторії обертання діючої частини рамки.

Так як магнітна індукція, кількість витків у рамці, довжина діючої частини рамки та її ширина постійні, то добуток цих величин позначили літерою  $C$ . Отже, обертовий момент, що діє на рамку зі струмом з боку магнітного поля, прямопропорційний силі струму.

Електромагнітному обертовому моменту  $M_{em}$  протедіє механічний момент сил  $M_{mex}$ . На основі закону Гука:  $M_{mex} = -k\lambda$ , де:

$k$  - коефіцієнт пружності пружини;

$\lambda$  - кут повороту рамки.

Стрілка приладу зупиниться при умові, що:  $M_{\text{мех}} = M_{\text{ем}}$  або  $k\lambda = CI$ . Звідси:

$$\lambda = \frac{C}{k} I = ZI, \text{ де: } Z - \text{чутливість приладу.}$$

З виразу  $\lambda = ZI$  випливає те, що кут повороту рамки прямопропорційний силі струму в котушці приладу, а це означає, що його шкала вимірювань по всій довжині рівномірна. Прилади цієї системи мають певні переваги та недоліки при їх використанні.

Переваги: рівномірна шкала, на точність вимірювань не впливають зовнішні поля, мало споживає енергії, високий клас точності приладу (близько 0,1).

Недоліки: призначені лише для вимірювання параметрів кіл постійного струму, висока чутливість до перевантаження, значна собівартість.

Прилади електромагнітної системи бувають з плоскою або круглою котушками (рис. 5 а, б). Принцип дії таких приладів базується на взаємодії магнітного поля котушки, що створюється вимірюваним струмом, зі стальним осердям, яке по міщене в це поле.

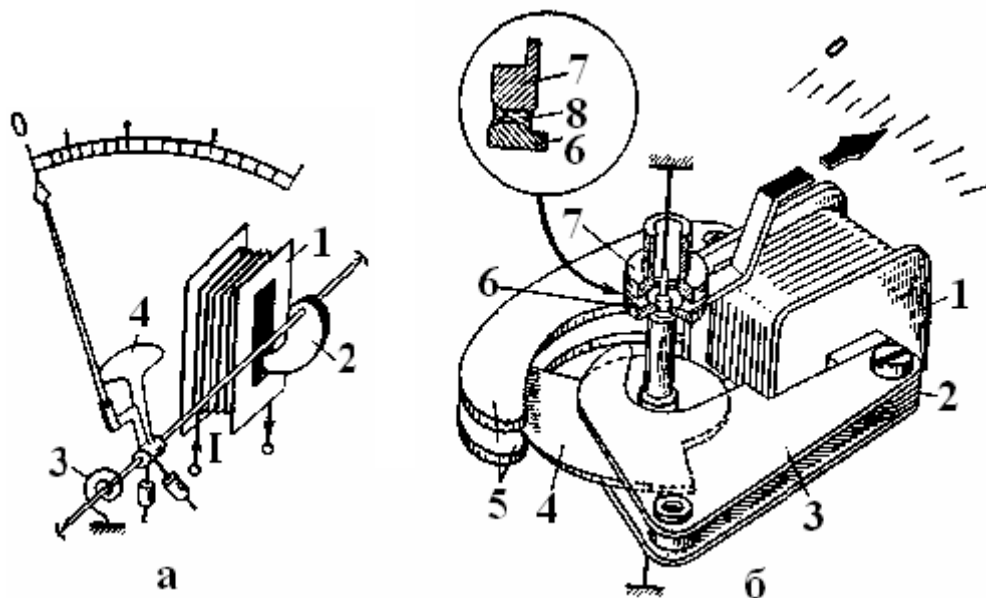


Рис. 5. Прилади електромагнітної системи: а) з плоскою котушкою;

б) з круглою котушкою

Будова приладу з плоскою котушкою (рис. 5 а) простіша порівняно з приладами магнітоелектричної системи.

Основними деталями є плоска котушка 1, вісь до якої кріпиться фігурне осердя 2, виготовлене з пермаллю або магнітомякої сталі, (рис. 5, а) пружина 3,

яка створюють протидіючий механічний момент та постійний магніт-заспокоювач.

При протіканні вимірюваного електричного струму в котушці, створюється магнітне поле, яке втягує стальне фігурне осердя завдяки чому виникає електромагнітний обертовий момент. Стрілка приладу зупиниться на поділці, коли електромагнітний момент зрівноважиться з механічним обертовим моментом пружини, яка спричиняє протидію.

На рис. 5 б) зображено будову електромагнітного приладу із замкненим феромагнітним осердям. Принцип його дії аналогічний до попереднього, але магнітні силові лінії котушки 1 замикаються не через повітря, а через нерухомий магнітопровід 2, полюсні наконечники 3, рухоме осердя 4 та полюсні наконечники 5. При наявності струму в котушці осердя 4 втягується між полюсних наконечників 5, повертаючи вісь до якої кріпиться стрілка приладу.

З фізики відомо, що енергія магнітного поля соленоїда  $W = \frac{L}{2} I^2$ . За рахунок зміни цієї енергії  $dW = \frac{I^2}{2} dL$  виконується механічна робота проти сил пружності при повороті осі приладу:  $dA = F dl_{\cup}$ ,  $F$  – сила, що діє на осердя;  $l_{\cup}$  – довжина дуги, яку описує осердя.

При малих значеннях довжини дуги  $dl = R d\lambda$ , де  $R$  – радіус повороту осердя (відстань від осі до точки прикладання сили). Тому значення роботи проти сил пружності набуде вигляду:  $dA = FR d\lambda$ , де  $\lambda$  – кут повороту рамки приладу.

Враховуючи те, що робота проти сил пружності виконується за рахунок зміни енергії магнітного поля  $dW = dA$ , то прирівнявши їх значення отримаємо вираз  $FR d\lambda = \frac{I^2}{2} dL$ .

До того ж добуток сили  $F$  на плече  $R$  є обертовим моментом сили, що діє на осердя. Тобто  $FR = M_{ос}$ .

Цей момент зрівноважується механічним моментом, створеним пружиною:  $M_{мех} = -k\lambda$ . Прирівнюючи останні вирази, визначимо залежність кута повороту стрілки приладу від величини сили струму, що протікає в котушці:

$$M_{\text{мех}} = M_{\text{ел}} ; \quad \kappa\lambda = I^2 \frac{dL}{d\lambda}. \quad (1)$$

Зміна індуктивності котушки залежить від форми та глибини втягування осердя в неї. Тому форму осердя конструюють такої форми, щоб при його втягуванні в котушку відношення  $\frac{dL}{d\lambda} = \text{const}$ . Тоді вираз 1 можна записати у такій формі  $\lambda = CI^2$ , де  $C = \frac{1}{2k} \frac{dL}{d\lambda}$  – постійна величина.

З виразу  $\lambda = CI^2$  слідує, що кут повороту стрілки приладу знаходиться у квадратичній залежності від сили струму в котушці. Отже шкала приладів електромагнітної системи не рівномірна

При зміні напрямку струму в котушці змінюється полярність намагніченого осердя, тому напрям обертового моменту не змінюється. Отже такі прилади використовують для вимірювання як постійного так і змінного струмів. Вони мають певні переваги та недоліки порівняно з приладами інших систем.

Переваги: проста конструкція, надійність, мала собівартість, стійкість до перевантаження – прилад не виходить з ладу при  $I_{\text{вим}} = 20I_{\text{ном}}$ , придатні для вимірювання постійного та змінного струму.

Недоліки: чутливість до зовнішніх полів (їх поміщають в металевий екрануючий корпус), нерівномірність шкали, велика власна споживана потужність 2-8Вт., невисокий клас точності вимірювань 1,5 – 2,5.

Крім розглянутих вище приладів у електротехніці широко застосовують прилади електродинамічної системи. Відомо, що активну потужність споживачів обчислюють за формулою  $P = UI$ . Очевидно для вимірювання потужності потрібно мати прилад, який одночасно фіксує 2 параметри електричного кола – напругу і силу струму.

Такими приладами є ватметри електродинамічної системи. Принцип їх дії базується на взаємодії нерухомої та рухомої котушок, розташованих на нерухомій 1 та рухомій 2 рамочках, у яких протікає вимірюваний електричний струм (рис. 6). Рухома рамочка вільно обертається на осі.

Для створення протидіючого механічного обертового моменту до осі прикріплено дві спіральні пружини 4 та повітряний заспокоювач 3.

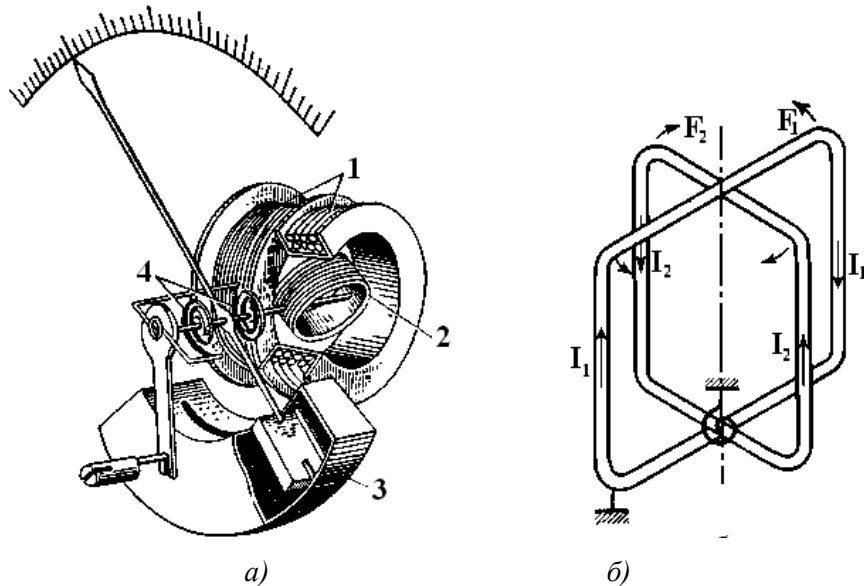


Рис. 6. Прилад електродинамічної системи: а) будова; б) виникнення моментів сил при взаємодії котушок.

Нерухома котушка 1 (рис. 6) намотана товстим мідним проводом, має малий опір, вмикається в коло послідовно і її називають котушкою струму. Інша, рухома котушка, має великий опір  $R$  вмикається в коло паралельно і називається котушкою напруги. При протіканні вимірюваного струму в обох котушках, вони взаємодіють з силою Ампера.

Силу їх взаємодії математично відобразимо виразами:  $F_{12} = B_1 I_2 l_2$  та  $F_{21} = B_2 I_1 l_1$ .

На рухому котушку одночасно діє електричний обертальний момент та механічний момент сили з боку пружин. Зміна напрямку струму не впливає на напрям обертального моменту, тому що струм змінює свій напрям одночасно в обох котушках.

Тобто магнітне поле нерухомої рамки діє з силою  $F_{12}$  на рухому рамку по якій протікає струм  $I_2$ , а магнітне поле рухомої рамки діє з силою  $F_{21}$  на нерухома рамку зі струмом  $I_1$ . Причому  $F_{12} = F_{21} = F$ . Значення сили можна виразити на основі закону Ампера:  $F = \frac{\mu_0}{2\pi} l \omega \frac{I_1 I_2}{R}$ , де  $l$  – довжина активної частини рамки,  $\omega$  – кількість витків у котушці. Запишемо останній вираз у такій формі:  $F = C I_1 I_2$ , де

$C = \frac{\mu_0 l \omega}{2\pi R}$  – постійна величина.

Обертовий момент, що діє на рухому рамку дорівнюватиме добутку сили на плече:  $M_{об} = Fd = Cdl_1I_2 = k_1I_1I_2$ , де  $d$  – ширина рамки.

Йому протидіє механічний обертовий момент з боку пружин:  $M_{мех} = -k\lambda$ .

У процесі вимірювань обидва моменти зрівноважуються  $M_{мех} = M_{ел}$ , або  $k_1I_1I_2 = k\lambda$ . Звідси кут повороту стрілки приладу  $\lambda = \frac{k_1}{k}I_1I_2 = ZI_1I_2$ . Де:  $Z = \frac{k_1}{k}$  – чутливість приладу.

Отже шкала у таких приладах теж нерівномірною, так як залежність кута  $\alpha$  знаходиться у квадратичній залежності від струму –  $I_1I_2$ .

Прилад цієї системи можна використовувати для вимірювання постійного та змінного значень струму, напруги, активної складової потужності та коефіцієнту потужності.

Дійсно, нехай у котушках протікає електричний струм, що змінюється за законом:

$$i_1 = I_{1m} \sin \omega t \text{ для випадку, коли } R \gg X_L \text{ (котушка струму);}$$

$$i_2 = I_{2m} \sin(\omega t - \varphi) \text{ для випадку, коли } X_L \gg R \text{ (котушка напруги).}$$

*Миттєве значення обертового моменту, що діє на рухому рамку*

$$m = k_1i_1i_2 = k_1I_{1m}I_{2m} \sin \omega t \sin(\omega t - \varphi);$$

$$\sin \omega t \sin(\omega t - \varphi) = \cos(\omega t - \omega t + \varphi) - \cos \omega t \cos(\omega t - \varphi) = \cos \varphi - \cos \omega t \cos(\omega t - \varphi).$$

Середнє значення обертового моменту за період

$$M_{cp} = \frac{kI_{1m}I_{2m}}{T} \int_0^T \sin \omega t \sin(\omega t - \varphi) dt = kI_1I_2 \cos \varphi$$

Так як у котушці струму  $R \gg X_L$ , то  $I_2 = \frac{U}{R}$ . Тому  $M_{cp} = \frac{k_1}{R}UI \cos \varphi$ , або

$$\boxed{M_{cp} = k_2P}$$

Прирівнюючи значення обертового магнітного моменту та протидіючого механічного моментів, отримаємо залежність між кутом повороту стрілки приладу та значенням потужності:  $\lambda = \frac{k_2}{k}P$ .

Отже, кут повороту стрілки приладу прямо пропорційний споживаній потужності. До того ж його шкала рівномірною.



Прилади електродинамічної системи можна використовувати в якості амперметрів (обидві котушки вмикаються послідовно у коло), вольтметрів (котушки вмикаються в коло паралельно до споживача), ватметрів (котушки вмикаються одна послідовно інша паралельно до споживача). Схеми вмикання приладів у коло зображено на рис. 7.

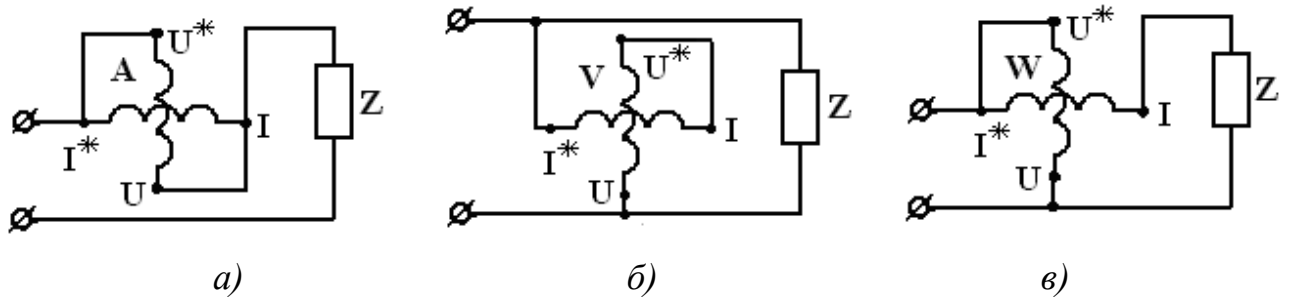


Рис. 7. Схеми ввімкнення котушок приладу: а) – амперметра; б) – вольтметра; в) – ватметра.  $I^*$  та  $U^*$  – початки котушок струму і напруги;  $I$  та  $U$  – кінці котушок струму і напруги.

## 5. Будова і принцип дії фазометра. Вимірювання коефіцієнта потужності.

На основі електродинамічної системи побудовано прилад для вимірювання коефіцієнта потужності  $\cos \varphi$ , який називається фазометром.

Фазометр (рис. 8) складається з нерухою котушки  $K$ , яку часто виготовляють із двох секцій і підключають до навантаження послідовно, та двох рухомих котушок  $K_1$  і  $K_2$  жорстко з'єднаних між собою під певним кутом, розташованих між двома симетричними половинами нерухої котушки струму.

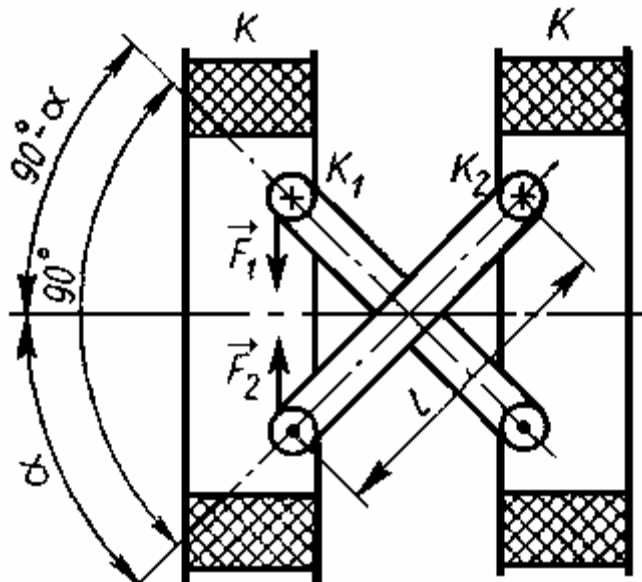


Рис. 8. Розташування котушок в приладах електродинамічної системи.

Стрілка приладу та обидві рухомі котушки кріпляться на одній осі і мають змогу вільно обертатися. Котушки  $K_1$  і  $K_2$  вмикаються в коло паралельно. До того ж до однієї із них послідовно вмикається активний опір  $R$ , до іншої – великий індуктивний опір  $X_L$  (рис. 9а).

Протидіючої пружини в таких приладах немає і стрілка постійно обертається навколо осі, займаючи будь-яке положення. Під час вимірювань натискується кнопка, що замикає коло котушок і стрілка фіксує значення  $\cos \varphi$ .

Принцип дії такого приладу можна пояснити на основі векторної діаграми (рис. 10 б). Нехай у колі напруга на споживачі  $U$ , а споживаний струм -  $I$ . Струм відстає від наруги за фазою на кут  $\varphi$ . Відкладемо ці величини у такій послідовності – вертикально розташуємо вектор наруги  $U$ , під кутом  $\varphi$  вектор споживаного струму  $I$ , а також магнітний потік  $\Phi$ , який він збуджує.

Струм  $I_1$  у котушці  $K_1$  співпадає за фазою з напругою завдяки лише активному опором, а в котушці  $K_2$  (з послідовно ввімкненим індуктивним опором) струм  $I_2$  відстає від наруги на кут  $90^\circ$ . Відкладемо вектори цих фізичних величин відповідно у напрямі вектора наруги, та горизонтально праворуч.

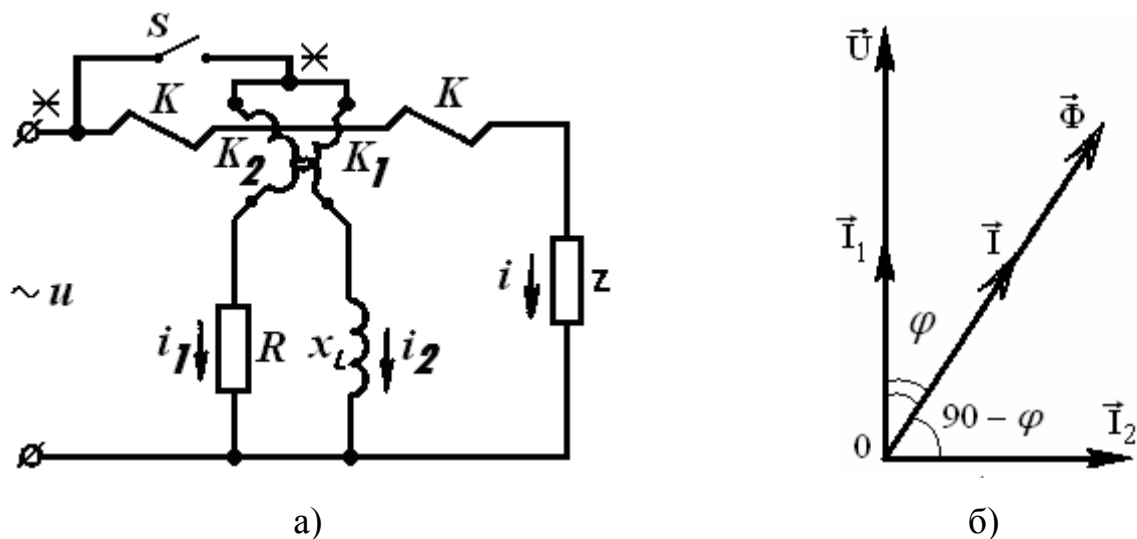


Рис.9. Будова фазометра – а, векторна діаграма – б.

При ввімкненому в мережу приладі, на котушки буде діяти пара сил (рис. 8), направлених у протилежні сторони, так як їх обмотки намотані зустрічно. На

основі векторної діаграми (рис. 9 б) запишемо значення цих сил:  $F_1 = k_1 I_1 \Phi \cos \varphi$ ;  
 $F_2 = k_2 I_2 \sin \varphi$ .

Моменти цих сил відповідно дорівнюють:  $M_1 = k_1 I_1 \Phi l \cos \varphi \sin \alpha$ ;  
 $M_2 = k_2 I_2 \Phi l \sin \varphi \cos \alpha$ .

Стрілка приладу буде повертатися до тих пір, поки моменти не зрівноважаться:  $k_1 I_1 \Phi l \cos \varphi \sin \alpha = k_2 I_2 \Phi l \sin \varphi \cos \alpha$ , звідки  $\frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = \frac{I_2 \sin \varphi k_2}{I_1 \cos \varphi k_1}$ .

При рівності активного та реактивного опорів у обох вітках буде виконуватись умова  $I_1 = I_2$ , тому попередній вираз набуде такого вигляду:  $\operatorname{tg} \alpha = K \operatorname{tg} \varphi$ , або  $\alpha = f(\varphi)$

Отже зсув фаз між струмом та напругою в колі навантаження визначається кутом повороту стрілки приладу, а тому ним можна вимірювати коефіцієнт потужності  $\cos \varphi$ .

Фізичну суть цього приладу можна пояснити таким чином: якщо по черзі від'єднувати рухомі котушки з послідовно ввімкненими відповідно активним або індуктивним опором, то одержимо не що інше як ватметр активної та реактивної потужності, але без протидіючого механічного моменту пружних сил.

Якщо ж вмикати такий прилад в коло з активним навантаженням, то обертовий момент котушки з індуктивністю буде дорівнювати нулю, а котушки з індуктивним опором – максимальний. І, навпаки, якщо навантаження реактивне, то нулю дорівнюватиме обертовий момент котушки з активним опором.

Пояснити це явище можна на основі правила Ленца. На індуктивному навантаженні струм співпадатиме за фазою зі струмом у рухомій котушці  $I_2$ , до якої послідовно ввімкнено додатковий індуктивний опір. Тому струм цієї котушки буде взаємодіяти з магнітним полем нерухомої котушки внаслідок чого виникне обертовий момент.

Проте в іншій рухомій котушці, яка чинить активне навантаження, струм  $I_1$  співпадатиме за фазою з напругою, а отже випереджатиме струм навантаження на кут  $90^\circ$ . Тому на цю котушку в дану мить обертовий момент не буде діяти.

При змішаному навантаженні очевидно стрілка займатиме проміжні значення на шкалі приладу.

Переваги: високий клас точності (0,1-0,5), розраховані на постійний та змінний струми, рівномірність шкали ватметра.

Недоліки: чутливі до перевантаження, нерівномірна шкала вольтметра та амперметра, реагує на вплив зовнішніх полів, споживає відносно велику потужність, висока собівартість.

## **6. Лічильник індукційної системи. Вимірювання електричної енергії.**

Електричну енергію спожиту протягом певного часу можна розрахувати за формулою  $W = Pt = UIt \cos \varphi$ . Очевидно для вимірювання електричної енергії необхідно мати прилад, який одночасно фіксує три параметри – силу струму, напругу і час.

Таким приладом є лічильник електричної енергії індукційної системи. Принцип дії такого лічильника базується на взаємодії змінного магнітного потоку з індукційним струмом, що збуджується магнітними потоками двох котушок, в легкому алюмінієвому диску, який має вісь обертання. Котушки такого приладу фіксують напругу і силу струму, а кількість обертів диска еквівалентно часу.

Схематично будову однофазного індукційного лічильника зображено на рис. 10, а пояснення принципу дії на рис. 11. Легкий алюмінієвий диск Д має можливість вільно обертатися на осі С в підп'ятниках К. Диск з'єднаний з лічильним механізмом через черв'ячну передачу.

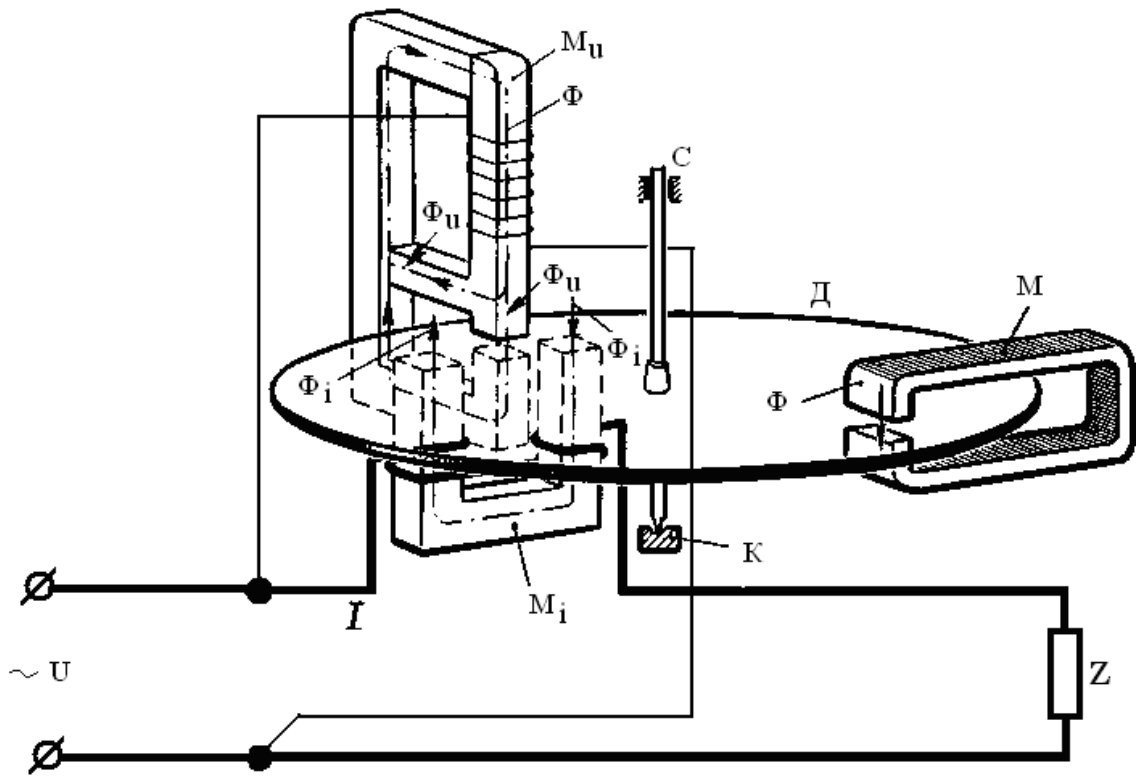


Рис. 10. Однофазний електричний лічильник індукційної системи.

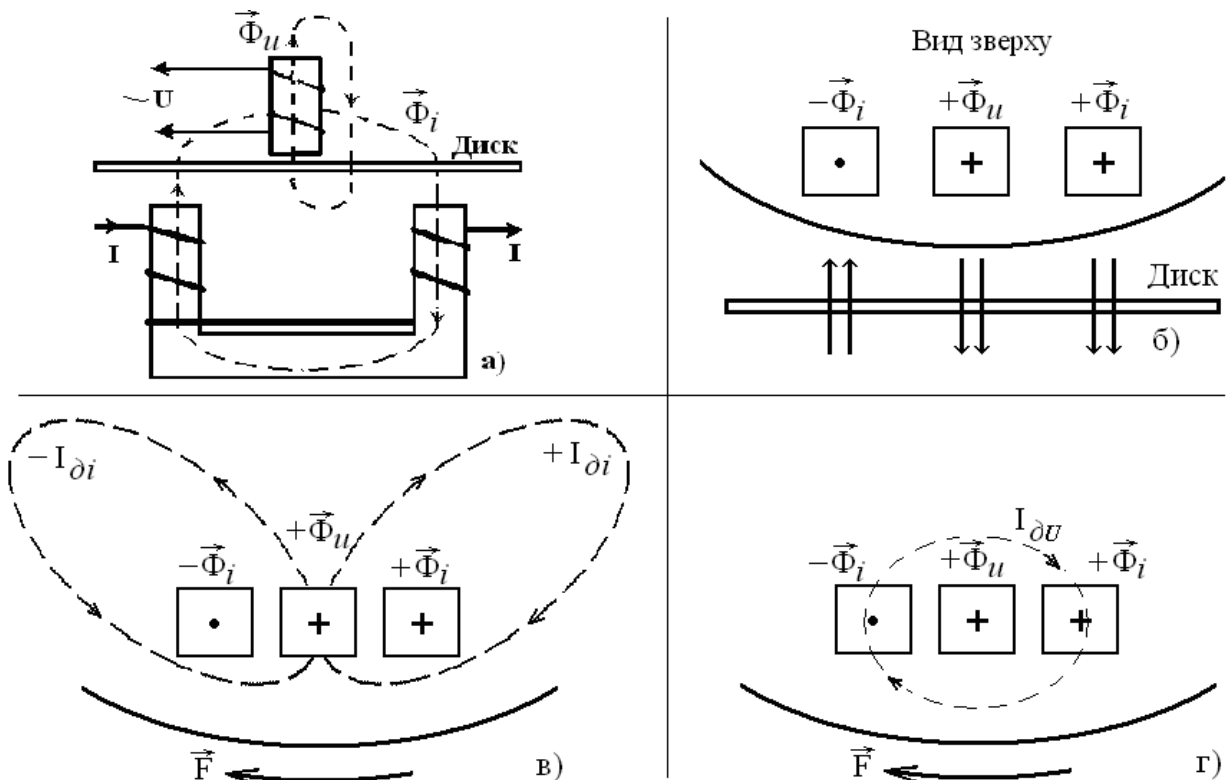


Рис. 11. Схематичне пояснення умов виникнення електромагнітного обертового моменту, що діє на алюмінієвий диск лічильника.

Біля краю диску розташовані два електромагніти  $M_i$  та  $M_u$  – котушки струму та напруги відповідно. Осердя магніту  $M_u$  має форму перевернутої літери **Б** і розташоване так, що магнітний потік замикається через повітря та алюмінієвий диск під кутом  $90^\circ$ .

Інший електромагніт  $M_i$ , що має U-подібну форму, розташований під диском так, що кінці магнітопроводу розташовані в одну лінію з кінцями магнітопроводу Б-подібного електромагніту. Магнітний потік  $\Phi_i$  замикається через повітря, пронизуючи диск у двох місцях.

Котушка струму  $M_i$ , що розташована під диском має незначну кількість витків мідного дроту великої площі поперечного перерізу і вмикається послідовно до навантаження. Очевидно через неї проходить увесь струм навантаження. Інша котушка має велику кількість витків тонкого дроту. Вона ввімкнена паралельно до навантаження і фіксує спад напруги на споживачах.

Принцип дії такого приладу можна пояснити, зобразивши схематично напрям магнітних потоків, індукційних струмів та сил, що діють на алюмінієвий диск.

Якщо у приладі вимкнути одну із котушок, то інша створюватиме змінний магнітний потік, і діюча сила стискатиме або розтягуватиме коловий індукційний струм у диску, а сам диск обертатися не буде. Тому, для обертання диска створюють магнітні потоки двома котушками. До того ж котушка напруги має великий індуктивний опір порівняно з її активним опором, а котушка струму має більше значення активного опору. Тому магнітні потоки, що ними створюються, зсунуті за фазою на кут  $90^\circ$ .

Ці потоки індукують у диску вихрові струми  $I_{\partial i}$  та  $I_{\partial U}$ , напрям яких зображено на рис. 11 а,б. При цьому відбувається взаємодія магнітного потоку створеного котушкою напруги  $\Phi_U$  зі струмами, індуктованими котушкою струму  $-I_{\partial i}$  та  $+I_{\partial i}$ . Магнітний потік, створений котушкою струму та зображений на рисунку  $-\Phi_i$  і  $+\Phi_i$ , буде взаємодіяти зі струмом  $I_{\partial U}$ , що індукується в диску котушкою напруги.

Враховуючи явище наростання або зменшення магнітних потоків, що пронизують диск приладу та використовуючи правило Ленца і правило лівої руки, приходимо до висновку, що сили обох потоків  $F_1; F_2$  спрямовані в одну сторону, а тому обертатимуть диск у нашому випадку проти годинникової стрілки.

Моменти цих сил відповідно дорівнюють:

$$M_1 = c_1 \Phi_i I_{\partial U} \cos(180^\circ - \varphi)$$

$$M_2 = c_2 \Phi_U I_{\partial i} \cos \varphi$$

Результуючий момент дорівнює сумі моментів сил, спрямованих в одну сторону  $M_{об} = M_1 + M_2 = c_1 \Phi_i I_{\partial U} \cos(180^\circ - \varphi) + c_2 \Phi_U I_{\partial i} \cos \varphi$ .

Оскільки існує пряма пропорційна залежність між величинами  $I_{\partial i} \sim \Phi_i \sim I$ , а  $I_{\partial U} \sim \Phi_U \sim U$ , то обертальний момент дорівнюватиме  $M_{об} = (-c_1 I U + c_2 I U) \cos \varphi = c' U I \cos \varphi$ .

Отже  $M_{об} = c' P$ . Де:  $c_1, c_2, c'$  – константи - коефіцієнти пропорційності.

Таким чином, обертальний момент, що діє на диск приладу прямо пропорційний величині споживаної активної складової потужності. Якщо електромережа навантажена лише індуктивним опором, то  $\cos \varphi = 0$ , обертальний момент теж дорівнює нулю і диск приладу стоятиме на місці.

Протидіючий момент чинитиме магнітний потік, що створює постійний магніт, при взаємодії з коловим струмом, який він індукуює в диску приладу.

#### Параметри електричного лічильника:

1. Дійсна стала величина лічильника –  $C = \frac{W}{N} = \frac{Pt}{N}$ .

Де:  $W$  – дійсне значення спожитої енергії за час одного повного повороту диска, визначена за допомогою контрольних приладів;

$N$  – кількість обертів диска;

$t$  – час протягом якого диск здійснив обертів;

$P$  – споживана потужність.

2. Номінальна постійна лічильника – це кількість енергії, що фіксує лічильний механізм за час одного повороту диска. Вона вираховується за даними паспорта приладу:  $C_n = \frac{1000 \cdot 3660}{N}$ .

3. Величина обернена до номінальної сталої називається передаточним числом:  $A_n = \frac{1}{C_n}$ ;

4. Відносна похибка лічильника розраховується за таким виразом:

$$\beta = \frac{C_n - C}{C_n} \cdot 100\% ;$$

5. Чутливість лічильника  $\delta = \frac{I_{\min}}{I_n} 100\%$ ;  $\delta = \frac{P_{\min}}{P_n} 100\%$ .

Де:  $I_{\min}$  – мінімальний струм при якому працює лічильник при номінальному значенні напруги в електромережі;

$I_{nom}$  – номінальний струм приладу.

6. Самохід приладу – поворот диску (більше одного повного повороту) без навантаження в електричному колі.

## 6. Цифрові вимірювальні прилади.

Аналогові прилади, побудовані на явищі електромагнетизму, зі стрілочними або «зайчиковими» показчиками мають низку недоліків. Насамперед, вони не досить точні, мають відносно малий омичний опір (котушка струму в таких приладах має дуже малий опір), споживають відносно велику потужність та ін.

Останнім часом користуються електронними приладами при вимірюванні параметрів електричних кіл. Вони не мають тих вад, які притаманні аналоговим приладам.

Такі прилади мають значно вищі, у порівнянні з електромеханічним вимірювальним механізмом, вхідні опори. Наприклад, електронні вольтметри сягають  $1 \text{ МОм}$  у приладах широкого розповсюдження, а у спеціальних приладах до  $1000 \text{ МОм}$ .

Вони споживають мізерну потужність завдяки тому, що мають у своєму складі підсилювачі.

Нарешті, електронні прилади дають можливість представити виміряне значення у зручній цифровій формі, фіксувати час і виміряну величину у внутрішній пам'яті, передавати ці дані на комп'ютер для обробки даних вимірювань тощо.

На рис. 12 показана структурна схема цифрового вольтметра, а на рис. 13 – часові діаграми вихідних напруг блоків структурної системи. Принцип дії такого приладу полягає у наступному: блок керування є ключом за допомогою якого подається сигнал –  $U_{\text{керув}}$  для запуску генератора пилоподібних імпульсів напруги –  $U_{\text{ГЛПНЗ}}$  і селектора; пилоподібний сигнал разом з постійною напругою



$U_{вх}$ , значення якої потрібно виміряти, подається у порівняльний блок; величина вимірювальної напруги в порівняльному блоці відсікає частину пилкоподібного сигналу.

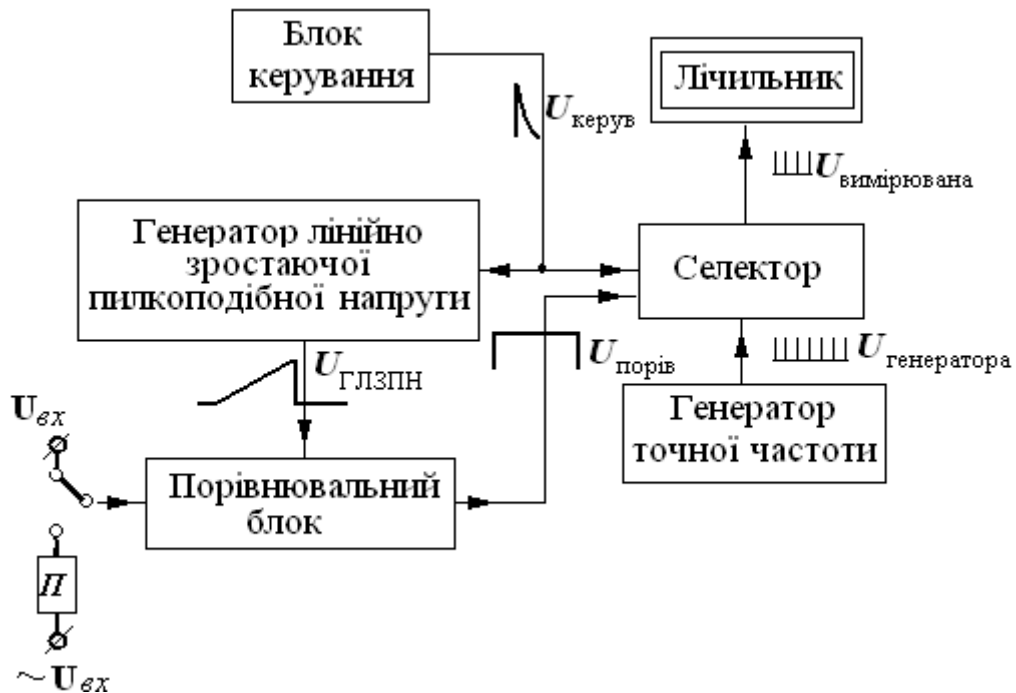
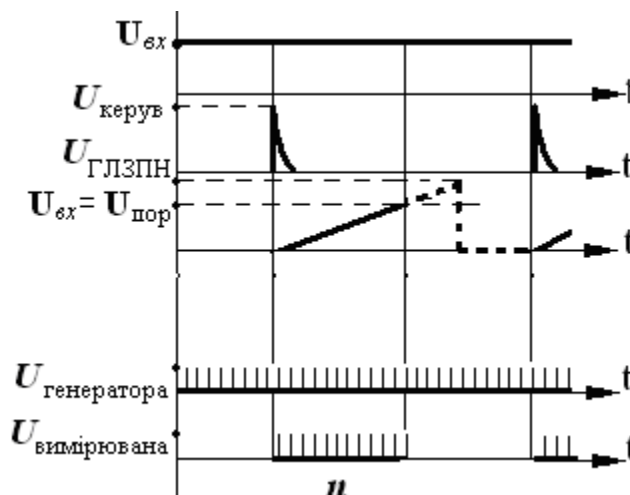


Рис. 12. Структурна схема електронного вимірювального приладу.

На графіку (рис. 13) видно, що вищі значення вимірюваної напруги зумовлюють продовження тривалості пилкоподібного сигналу. Отже, на виході ми отримуємо сигнал  $U_{порівняльне}$ , який протягом певного проміжку часу подається до селектора. Одночасно до селектора подається неперервний імпульсний сигнал від високочастотного генератора  $U_{генератора}$ , а також сигнал запуску від блоку керування. У селекторі порівняльна напруга існує протягом певного часу, що видно із графіка, і за цей час селектор пропускає ту кількість високочастотних імпульсів до лічильника, протягом якого існує порівняльна напруга у ньому.



*Рис. 13. Графіки напруг в окремих блоках електронного приладу.*

Після такого циклу настає черговий цикл. Блок керування подає імпульс до генераторів і селектора, порівняльний блок задає тривалість існування пілкоподібного сигналу залежно від вхідної вимірюваної напруги, тривалість порівняльної напруги у селекторі визначає кількість високочастотних імпульсів, які надходять до лічильника. Лічильник на ЖК або ламповому моніторі висвітлює значення вимірюваної величини.

Цифрові вимірювальні прилади широко використовуються у науково-дослідних лабораторіях, виробництві, лабораторіях, що займаються перевіркою та ремонтом приладів, автоматиці тощо.

Останнім часом широко розповсюджені комбіновані цифрові прилади, так звані мультиметри, які дозволяють вимірювати декілька параметрів: постійну та змінну напругу, постійний та змінний струм, частоту, інтервали часу, ємність конденсатора, температура і інше.

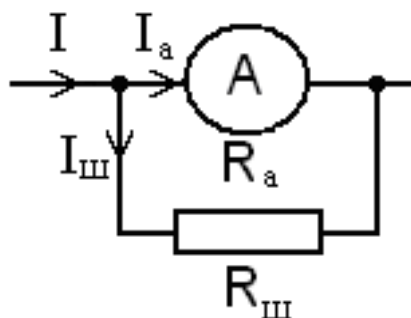
## **8. Методи електричних вимірювань**

### Вимірювання струму та розширення меж вимірювання амперметра.

Для вимірювання сили струму в споживачеві, необхідно щоб через нього протікала така ж кількість електрики, що й через амперметр. Отже, прилад та навантаження повинні бути увімкнені послідовно.

Іншою необхідною умовою точності вимірювання сили струму є усунення впливу опору амперметра на параметри електричного кола, тому його опір повинен бути досить малим.

На практиці для вимірювання постійного струму використовують прилади магнітоелектричної системи, а прилади електромагнітної або цифрові для вимірювання змінного і постійного струмів. Опір амперметрів близький до 0,1-0,2 Ом, а цифрових і того менший.



Мал. 14. Схеми вмикання шунта.

Для розширення меж вимірювання аналогових амперметрів паралельно до них приєднують шунти (рис. 14). Шунти використовують головним чином у колах постійного струму в приладах магнітоелектричної дії.

З рисунка видно, що спад напруги на амперметрі та шунтові однаковий, тобто  $U_a = U_{ш}$ . Скориставшись законом Ома цей вираз можна записати в іншій формі  $I_a R_a = I_{ш} R_{ш}$  (1)

За 1 законом Кірхгофа сила струму в шунті дорівнює різниці між загальним струмом та силою струму, що протікає через амперметр  $I_{ш} = I - I_a$ . Підставимо останній вираз у вираз 1 і визначимо з нього значення опору шунта

$$R_{ш} = \frac{I_a R_a}{I - I_a}. \text{ Поділивши чисельник та знаменник останнього виразу на } I_a,$$

отримаємо формулу для розрахунку опору шунта:  $R_{ш} = \frac{R_a}{\frac{I}{I_a} - 1} = \frac{R_a}{N - 1}$ .

Де:  $N = \frac{I}{I_a}$  – число, що показує у скільки разів розширені межі вимірювання амперметра.

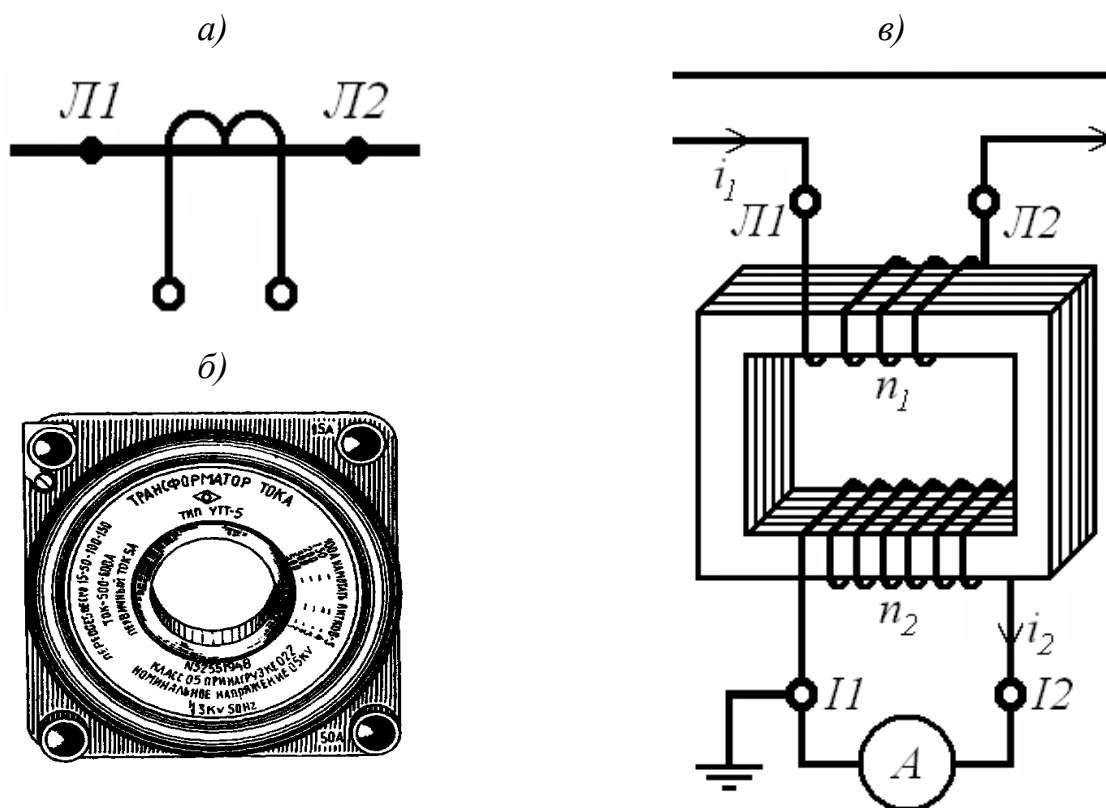
Шунти виготовляють з манганіну. У приладах розрахованих на вимірювання малих струмів (до 30А) шунти поміщають у корпусах амперметрів, а для великих - використовують зовнішні шунти. Їх використовують головним чином у колах постійного струму тому, що в колах змінного струму вони споживають багато енергії. Для таких кіл використовують трансформатори струму.

Принцип дії такого трансформатора подібний до звичайного силового трансформатора. Особливість конструкції полягає в тому, що первинна обмотка

має мале число витків дроту великої площі поперечного перерізу. Тому спад напруги на первинній обмотці досить малий. Вторинна обмотка має більшу кількість витків тонкого дроту і на ній отримуємо вищу напругу при меншому струмові. Трансформатор працює фактично в режимі короткого замикання, так як амперметр має малий опір.

Широке використання отримали універсальні трансформатори струму УТТ-5, які складаються із залізного осердя і двох котушок (рис. 15). Кількість витків первинної обмотки  $-w_1$ , вторинної  $-w_2$ . Коефіцієнт трансформації

$K = \frac{w_1}{w_2} = \frac{I_1}{I_2}$ , звідки  $I = KI_2$ . Де:  $I$  - величина вимірюваного струму..



Мал. 15. Розширення меж вимірювання амперметра за допомогою трансформатора струму: а – схематичне зображення;

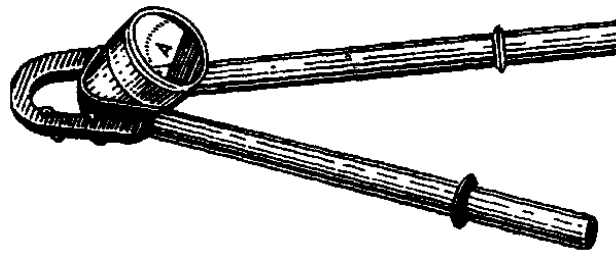
б – зовнішній вигляд; в – схема ввімкнення.

Отже розширення межі вимірювання амперметра збільшується у стільки разів, числове значення якого дорівнює коефіцієнту трансформації  $N = K$ .

Вторинну обмотку трансформатора не можна залишати розімкнутою. При потребі заміни приладу її закорочують тому, що на її кінцях, при ввімкненому трансформаторі, появиться висока напруга, що небезпечна для людини.

Номінальний вторинний струм завжди дорівнює 5А.

Серед переносних трансформаторів струму найзручнішими є вимірні кліщі (рис. 16). Точність їх не велика, проте вони надзвичайно зручні при користуванні

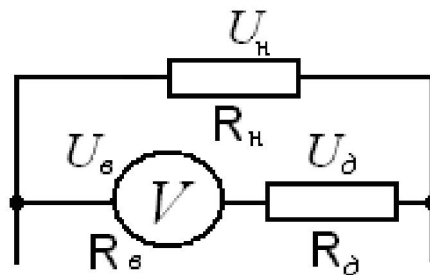


Мал. 16. Вимірювальні кліщі

### Вимірювання напруги та розширення меж вимірювання вольтметра.

Для вимірювання напруги між двома точками електричного кола використовують вольтметр, його вмикають паралельно до тієї ділянки кола, напругу на якій потрібно визначити. Щоб вольтметр не впливав на параметри кола, його опір повинен бути значно більшим опору тієї ділянки кола, паралельно до якої прилад увімкнутий.

При розширенні меж вимірювання вольтметра використовують додатковий опір, який вмикається послідовно до вимірювального приладу (рис. 17). Такими вольтметрами вимірюють напругу до 30 кВ. постійного та змінного струмів.



Мал. 17. Схема для вимірювання напруги вольтметром з додатковим опором.

Розрахунки величини додаткового опору здійснюються за формулою, отриманою на основі наступних міркувань. При розширенні меж вимірювання вольтметра в  $m$  раз повинна виконуватись умова  $m = \frac{U_n}{U_v}$ . Спад напруги на навантаженні дорівнює сумі спадів напруг на вольтметрі та додатковому опорі  $U_n = U_v + U_d$ . Поділимо ліву і праву сторони рівняння на силу струму, що протікає через вольтметр, а отже і через додатковий опір. При цьому отримаємо вираз

$\frac{U_n}{I_\epsilon} = \frac{U_\epsilon}{I_\epsilon} + \frac{U_\delta}{I_\epsilon} = R_\epsilon + R_\delta$ . Скориставшись законом Ома, запишемо значення сили

струму на вольтметрі через спад напруги на ньому та його опір  $I_\epsilon = \frac{U_\epsilon}{I_\epsilon}$  і

підставимо у попередній вираз:  $\frac{U_n}{U_\epsilon} R_\epsilon = m R_\epsilon = R_\epsilon + R_\delta$ . З останнього виразу

визначимо додатковий опір

$$R_\delta = R_\epsilon(m - 1)$$

Де:  $m$  – число, що показує у скільки разів розширені межі вимірювання приладу.

Для вимірювання високих напруг, використовують трансформатори напруги. Принцип його дії такий же, що і в трансформатора струму. Різниця між ними в тому, що трансформатор напруги є понижувальним, і вмикається він у коло паралельно.

Вторинна обмотка трансформатора напруги завжди розімкнута, якщо до неї не вмикається вимірювальний прилад. В іншому разі може виникнути коротке замикання і трансформатор вийде з ладу.

### Способи вимірювання опорів.

Вимірювання опорів має велике значення в електротехніці і здійснюється різними способами:

1. Вимірювання опорів за допомогою лінійки, мікрометра та таблиці питомих опорів здійснюють за формулою для розрахунку опорів:  $R = \rho \frac{l}{s}$ .

Де:  $\rho$  – питомий опір провідника;  $l$  та  $s$  – довжина і площа поперечного перерізу провідника.

2. Опір провідника можна визначити за законом Ома, якщо відомі сила струму, що протікає по ньому та напруга на його клеммах. Для різних величин опорів використовують різні способи ввімкнення амперметра та вольтметра. На рисунку 18а зображено схему для вимірювання опорів, що значно більші за опір вольтметра. За схемою, що зображена на рис. 18б здійснюють вимірювання малих опорів, значення яких значно менші опору амперметра.

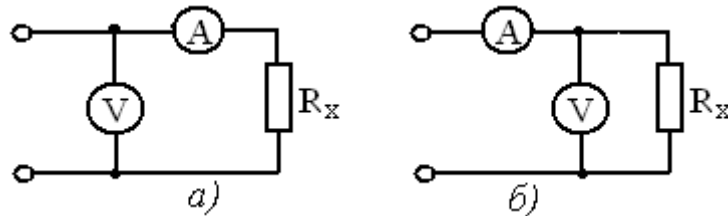


Рис. 18. Схеми вимірювання опорів: а – великих, б – малих

Дійсно, вимірюваний опір  $R$ , підрахований за показами приладів, буде відрізнятися від дійсного значення  $R_x$ , тобто

$$R_{\text{вим}} = \frac{U_x + IR_a}{I} = R_x + R_a$$

Із цього видно, що дана схема може бути використана тоді коли  $R_x \geq R_a$

Для вимірювання малих опорів вимірні прилади краще вмикати по іншій схемі (рис. 18,б). У цьому випадку  $R_{\text{вим}} = \frac{U}{I + I_g} = \frac{U}{\frac{U}{R_x} + \frac{U}{R_g}} = \frac{U}{U(\frac{1}{R_x} + \frac{1}{R_g})} = \frac{R_x}{1 + \frac{R_x}{R_g}}$

З останнього виразу видно, що вимірювання опору  $R_{\text{вим}}$  буде тим точніше, чим більша нерівність  $R_x \ll R_g$

### 3. Вимірювання опору за допомогою омметра.

У приладі, зображеному схематично на рис. 19 використано вимірювальний механізм магнітоелектричної системи. До нього послідовно ввімкнено джерело струму  $E_1$  та додатковий опір  $R_d$ . При замиканні електричного кола без резистора  $R_x$  стрілка гальванометра відхиляється до нульової поділки вліво. При короткому замиканні електричного кола (без резистора  $R_x$ ) по гальванометру протікатиме максимальний струм і стрілка відхилиться на максимальну поділку шкали приладу. При вмиканні в коло резисторів сила струму буде залежати від їх опорів. Шкала градуйована в омах.

З часом ЕРС батарейки зменшується, тому перед кожним вимірюванням натискають кнопку  $K$  і встановлюють стрілку на нуль.

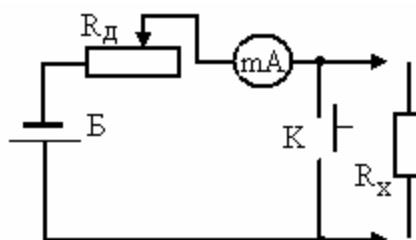


Рис. 19. Схематичне зображення принципу дії омметра.

#### 4. Вимірювання опору за містковою схемою

Для виключення впливу джерела живлення на результати вимірювань використовують місткову схему вимірювань (рис. 20). Прилад, що працює за цією схемою називають вимірювальним містком.

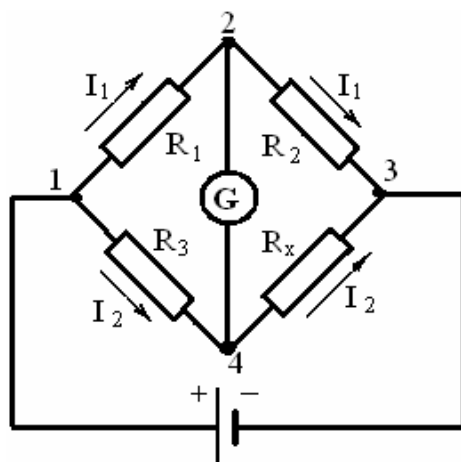


Рис. 20. Схема вимірювання опору містковим приладом.

У момент вимірюванні опору  $R_x$  стрілку міліамперметра  $G$  встановлюють у нульове положення. Тобто, різниця потенціалів між точками 2-4 у цей час дорівнює нулю. Запишемо умову рівності потенціалів математично:  $U_{1-2}=U_{1-4}$ , а також  $U_{2-3}=U_{4-3}$ . Перепишемо ці вирази відповідно до позначень схеми (рис. 20):

$$I_1 R_1 = I_2 R_3; \quad I_1 R_2 = I_2 R_x.$$

Розділимо ліву та праву частини одного рівняння відповідно на ліву та праву частини іншого рівняння:  $\frac{R_x}{R_3} = \frac{R_2}{R_1}$ . З останнього виразу визначимо

вимірюваний опір  $R_x = R_3 \frac{R_2}{R_1}$ . Якщо опори, взяті під номерами 1 та 2, однакові, то

вимірюваний опір чисельно дорівнює опору під номером 3:  $R_x = R_3$ .

Отже, під'єднавши провідник з невідомим опором до клем містка, набираємо за допомогою ручок на його панелі таке істинне значення опору, при якому стрілка гальванометра встановиться на нуль. Встановлене на панелі число і є значенням вимірюваного опору провідника  $R_x$ .

#### 5. Вимірювання опору за допомогою мегомметра.

Для вимірювання дуже великих опорів, наприклад ізоляції обмоток приладів та електричних машин, опору між проводами тощо використовують мегомметри (рис. 21). Ними можна мірювати опори до 100 МОм.



Оскільки такими приладами вимірюють міцність ізоляції машин і інших пристроїв та апаратів високих напруг, то живленням для мегомметра мусить бути джерело такої ж напруги. Тому в мегомметрі, на відміну від омметра, замість батареї постійного струму використовують маленькі генератори постійного струму з ручним приводом напругою в 500В, 1000В, 2000В.

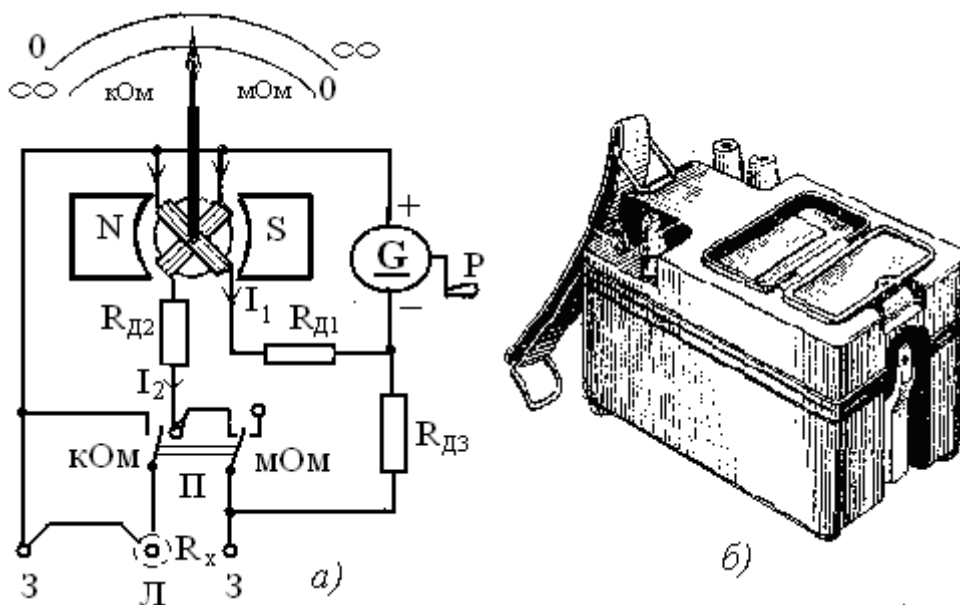


Рис. 21. Мегомметр: а – схематичне зображення; б- зовнішній вигляд.

Для того, щоб прилад і його показ не залежав від напруги джерела (частоти обертання ручки або інших характеристик такого генератора) використовують логометричну будову.

Прилад складається з двох рамок-катушок, розташованих під кутом  $90^{\circ}$  в полі постійного магніту. У катушках протікають струми  $I_1$  та  $I_2$  і створюють протидіючі моменти. Покази таких приладів не залежать від зміни напруги джерела, так як напруга одна і та ж на обох катушках і її зміна викликає одночасну зміну струмів  $I_1$  та  $I_2$ . Тому протидіючі моменти змінюються в однаковій мірі.

Отже, кут на який повертається рухома рамка і прикріплена до неї стрілка залежить лише від співвідношення струмів у них і не залежить від джерела струму. Шкалу приладів градуюють в омах, кілоомах та мегомах.

## Лекція 7. Електричні джерела освітлення.

1. Лампи розжарення, їх види та основні характеристики.
2. Будова і принцип дії люмінесцентних ламп низького тиску та ртутних ламп високого тиску.
3. Схеми увімкнення люмінесцентних ламп з баластами 1 покоління.
4. Сучасні енергозберігаючі (інноваційні) лампи.

### Література:

Л-1, с.288-292.

### 1. Лампи розжарення, їх види та основні характеристики.

Джерелами електричного світла є лампи розжарення, люмінесцентні лампи низького тиску і ртутні лампи високого тиску. За способом перетворення електричної енергії на світлове випромінювання їх поділяють на дві групи: *телові* (лампи розжарювання) і *газорозрядні* (люмінесцентні, ртутні).

В сучасних лампах розжарювання (рис.1) використовується вольфрамова нитка 6, температура плавлення якого близько  $3400^{\circ}\text{C}$ . В розжареному стані температура нитки становить  $2500\text{--}2700^{\circ}\text{C}$ , що забезпечує світлове випромінювання енергії. Захист від згоряння нитки забезпечується викачуванням повітря з колби 5 або, ще краще, наповненням колби інертним газом – криптоном, або сумішшю інертних газів азоту, аргону і ксенону.

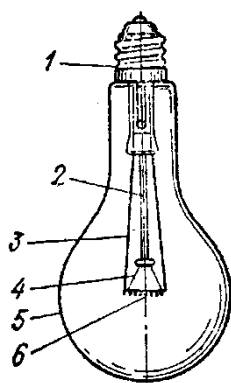


Рис. 1. Лампа розжарення: 1 – цоколь, 2 – ніжка, 3 – електрод,  
4 – гачок, 5 – колба, 6 – спіраль.

Для зменшення теплових втрат і компактності ламп розжарення нитку скручують у спіраль. В окремих видах ламп цю нитку скручують у подвійну спіраль. Такі лампи називають біспіральними.

При роботі ламп їх нитки розжарювання спрацьовуються (вольфрам випаровується), нитки стають тоншими і врешті перегорять. Пари вольфраму осідають на поверхні колби і роблять її менш прозорою. Для зменшення випаровування вольфрамової нитки та запобігання її перегорання колбу заповнюють інертними газами.

Лампи розжарення загального призначення випускаються переважно для живлення від стандартної напруги 220 В. Промисловість випускає лампи на напругу 230-240 В для користування в місцях, де напруга тривалий час буває вище номінальної (наприклад поблизу трансформаторної підстанції).

Лампи потужністю 15 і 25 Вт виготовляються вакуумні, наприклад: В220-15, В220-25 з різьбовим цоколем діаметром 27 мм. Лампи потужністю 40-100 Вт виготовляють газонаповненими з біспіральною ниткою, наприклад: Б220-40, Б220-100. Стандартні потужності ламп: 15, 25, 40, 60, 75, 100 Вт. Лампи потужністю вище 100 Вт виготовляють газонаповненими з спіральною ниткою розжарювання, наприклад: Г220-150, Г220-1500 і з стандартними потужностями 150, 200, 300, 500, 1000, 1500 Вт.

Для ламп потужністю 500 Вт і більше різьбовий цоколь має діаметр 40 мм. На кожній колбі позначається напруга і потужність лампи, наприклад: 230-240 В, 40 Вт.

Для місцевого освітлення виготовляють лампи з напругою 12 і 36 В потужністю 15, 25, 40, 60 і 100 Вт з різьбовим цоколем діаметром 27 мм, наприклад: МО12-15, МО12-60, МО36-25, МО36-100.

Середній термін служби ламп розжарювання загального призначення 1000-1200 годин при номінальній напрузі сітки.

До основних характеристик ламп розжарювання відносяться напруга, потужність і випромінюваний світловий потік. Чим більша потужність, тим більший світловий потік, наприклад, для ламп напругою 220 В і потужністю 15 Вт світловий потік  $\Phi=105$  лм, а для 100 Вт.  $\Phi=1320$  лм.

Економічність лампи характеризується світловою віддачею  $H=\Phi/P$  (лм/Вт); де  $\Phi$  – світловий потік в люменах,  $P$  – активна потужність лампи у ватах. Світлова віддача характеризує величину світлового потоку, що припадає на 1 Вт витраченої електричної потужності. Для сучасних ламп розжарювання світлова віддача складає 2-4 %, решта енергії переходить у тепло. Світлова віддача ламп розжарювання складає 7-19,7 лм/Вт.

Кращу світлову віддачу мають так звані галогенні лампи розжарювання з вольфрамовою ниткою, наповнені парами йоду. Пари йоду розчиняють пари вольфраму і сприяють його поверненню на поверхню нитки. Цей процес відбувається лише при високих температурах, тому галогенні лампи виготовляють з тугоплавкого скла циліндричної форми діаметром 10,75 мм і довжиною 190-335 мм. Потужність галогенних ламп 1000-2000 Вт зі світловою віддачею 22 лм/Вт і терміном служби 2000 годин.

Економнішими є газорозрядні лампи – трубчасті люмінесцентні низького тиску і дугові ртутні люмінесцентні високого тиску (ДРЛ).

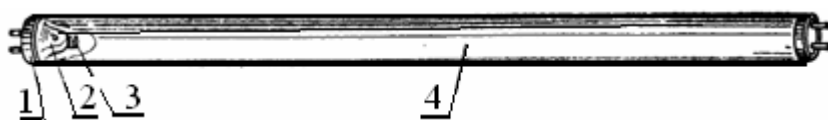
## **2. Будова і принцип дії люмінесцентних ламп низького тиску та ртутних ламп високого тиску.**

Люмінесцентна лампа – газорозрядне джерело світла, світловий потік якого створюється переважно свіченням люмінофора під дією ультрафіолетового випромінювання газового розряду у парах ртуті; видима частина фіолетового випромінювання складає декілька відсотків.

Люмінесцентна лампа низького тиску (рис. 2) складається з циліндричної скляної трубки 4, яка запаяна з обох кінців, з нанесеним шаром люмінофору з внутрішньої сторони. З обох кінців трубки розміщені електроди 3, виготовлені з вольфрамового дроту у вигляді подвійної спіралі, яка вкрита шаром оксидів барію, кальцію і стронцію для полегшення розряду. Лампи холодного свічення бувають різних конструкцій (рис. 3).

З лампи викачане повітря і заповнено газом аргоном з краплею ртуті. Тиск в лампі встановлюють незначний, тому вони називаються лампами низького тиску. При подачі імпульсу підвищеної напруги на попередньо підігріті електроди в

лампи відбувається розряд в парах ртуті. Напругу до лампи підводять до штиркових контактів, розміщених у цоколях 1. За кольором випромінювання випускають лампи: денного світла (ЛД), денного світла кращої світловіддачі (ЛДЦ), холодно-білого світла (ЛХБ), білого світла (ЛБ) і теплобілого світла (ЛТБ).



*Рис. 2 Люмінесцентна лампа низького тиску: 1 – цоколь, 2 – ніжка, 3 – електрод, 4 – скляний балон.*



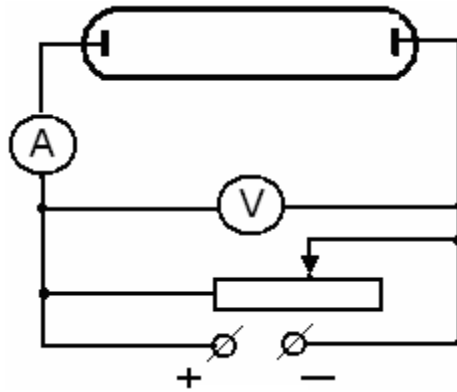
*Рис. 3. Лампи холодного свічення бувають різних конструкцій*

Для пояснення принципу дії газорозрядних ламп скористаємось основами теорії провідності газів. У газах електронна провідність (як у металах) поєднується з іонною провідністю (подібною до провідності водних розчинів або розплавів електролітів).

Проте між провідністю газів та електролітів існує істотна відмінність. Так іони розчинів електролітів утворюються внаслідок ослаблення внутрішньо молекулярних зв'язків іонів у молекулах внаслідок дії молекул розчинника (молекул води). У газах іони утворюються або від нагрівання, або внаслідок дії зовнішнього іонізатора.

Для дослідження струму в газах при різних тисках зручно використати скляну трубку з двома металевими електродами (рис. 4).

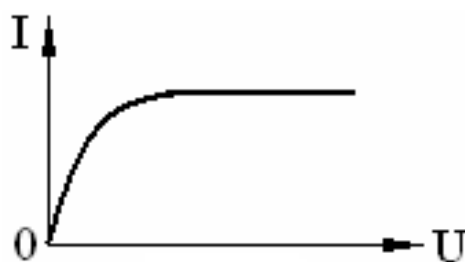
Нехай за допомогою якого-небудь іонізатора в газі утворюється за одиницю часу певне число пар заряджених частинок: позитивних іонів та електронів. Якщо різниця потенціалів на електродах трубки дорівнює нулеві, то в трубці встановлюється динамічна рівновага, при якій число пар іонів, що утворюються, дорівнюватиме числу пар іонів, які зникають внаслідок рекомбінації.



*Рис. 4. Схема установки для дослідження протікання електричного струму в газах*

Утворивши невелику різницю потенціалів між електродами трубки, позитивно заряджені іони переміщуються до негативного електрода, а негативно заряджені – до позитивного електрода. Внаслідок цього в трубці виникає електричний струм. Таке явище називають газовим розрядом.

Не всі іони, що утворилися, досягають електродів: частина їх рекомбінують, утворюючи молекули газу. В міру збільшення різниці потенціалів між електродами трубки частка заряджених частинок, що досягають електродів, збільшується. Зростає і струм у колі. Нарешті, настає момент, коли всі заряджені частинки, що утворюються в об'ємі газу, досягають електродів. При цьому струм досягає насичення, тобто далі не зростатиме (рис. 5). Якщо дія іонізатора припиняється, то струм зникає. З цієї причини розряд називають несамостійним.



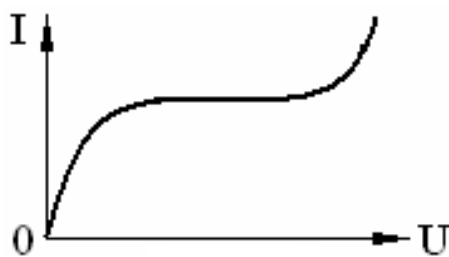
*Рис. 5. Графік залежності струму від напруги в газорозрядній трубці.*

Із збільшенням різниці потенціалів між електродами, починаючи з деякого значення, струм знову зростає (рис. 6). Це означає, що у газі виникають додаткові іони, крім тих, які утворюються за рахунок іонізатора. Струм може зростати в сотні і тисячі разів, а кількість іонів, що виникають у процесі розряду, може стати такою великою, що зовнішній іонізатор уже не потрібний для підтримання

розряду. Якщо вимкнути іонізатор, то розряд уже не припиниться. Оскільки розряд не потребує для свого підтримання зовнішнього іонізатора, його називають самостійним розрядом.

Причина виникнення самостійного газового розряду – іонізація електронним ударом.

Механізм іонізації пояснюється просто. Вільний електрон, що виник при дії іонізатора починає рухатися до позитивного електрода – анода. На своєму шляху він зустрічає іони і нейтральні атоми. У проміжках між двома послідовними зіткненнями енергія електрона збільшується внаслідок роботи сил електричного поля. Чим більша різниця потенціалів між електродами, тим більша напруженість електричного поля. Кінетична енергія електрона перед черговим зіткненням пропорційна напруженості поля і довжині вільного пробігу електрона (шляхи між двома послідовними зіткненнями):  $\frac{mv^2}{2} = eEl$ .



*Рис. 6. Графік залежності струму від напруги в газорозрядній трубі при самостійному розряді.*

Якщо кінетична енергія електрона переважає роботу  $A_i$ , яку треба виконати, щоб іонізувати нейтральний атом, тобто  $\frac{mv^2}{2} \geq A_i$ , то під час його зіткнення з атомом відбувається іонізація. Отже під час іонізації одного атома з'являється уже два вільних електрони (той, що налітає на атом, і той, що виривається з атома) та позитивно заряджений іон.

Вони у свою чергу дістають енергію в полі й іонізують зустрічні атоми і т. д. Внаслідок цього число заряджених частинок швидко наростає, виникає електронна лавина. Описаний процес називають іонізацією електронним ударом.

Проте сама іонізація електронним ударом не може підтримати самостійний розряд. Справді, адже всі електрони, що виникають таким чином, рухаються у

напрямі до анода і після досягнення анода «вибувають з гри». Для підтримання розряду потрібна емісія електронів з катода («емісія» українською мовою означає випромінювання). Емісія електронів може бути зумовлена кількома причинами. Позитивні іони, що утворилися внаслідок зіткнення електронів з нейтральними атомами, рухаючись до катода, набувають під дією поля великої кінетичної енергії. Коли такі швидкі іони удараються об катод, то з поверхні катода вибиваються електрони.

Крім того, катод може випромінювати електрони під час нагрівання до великої температури. Цей процес називають термоелектронною емісією.

Його можна розглядати як випаровування електронів з металу. У багатьох твердих речовинах термоелектронна емісія відбувається при таких температурах, коли випаровування самої речовини ще незначне. З таких речовин і виготовляють катодаи.

При самостійному розряді катод може нагріватися в процесі бомбардування його позитивними іонами. Якщо енергія іонів не дуже велика, то електрони не вибиваються з катода і все обмежується розігріванням катода.

Залежно від властивостей і стану газу, характеру і розміщення електродів, а також від прикладеної до електродів напруги виникають різні види самостійного розряду в газах.

Чим менший тиск у газі, тим більша середня відстань між його атомами. Тому із зниженням тиску в газі збільшується довжина вільного пробігу електронів. Згідно з формулою це означає збільшення кінетичної енергії електрона перед черговим зіткненням і, отже, його іонізуючої здатності.

Тому найпростіше викликати самостійний розряд у трубці при низьких тисках (десяті частки міліметра ртутного стовпа). Для цього досить мати різницю потенціалів між електродами у кілька сот (а іноді й значно менше) вольтів. При даних умовах у трубці відбувається так званий тліючий розряд.

Безпосереднє спостереження тліючого розряду показує, що він неоднорідний. Якщо не звертати уваги на тонкі деталі будови розряду, то можна виділити три ділянки: катодну ділянку, однорідне тліюче світіння – позитивний стовп, анодну ділянку.



Основною причиною емісії електронів з катода в тліючому розряді є удари позитивних іонів об катод і дія на катод власного випромінювання розряду.

На катодній ділянці масивні іони, що рухаються до катода, проходять цю ділянку за значно більший час, ніж легкі електрони. Внаслідок цього поблизу катода утворюється хмара позитивного заряду. На малій відстані потенціал різко змінюється від мінімального значення на негативно зарядженому катоді до максимального значення у ділянці позитивної хмари просторового заряду. Цей різкий спад потенціалу поблизу катода дістав назву катодного спаду потенціалу (рис. 7). Саме в цій ділянці позитивні іони набувають енергії, достатньої для вибивання електронів з поверхні катода. Наявність катодного спаду потенціалу – найважливіша ознака тліючого розряду.

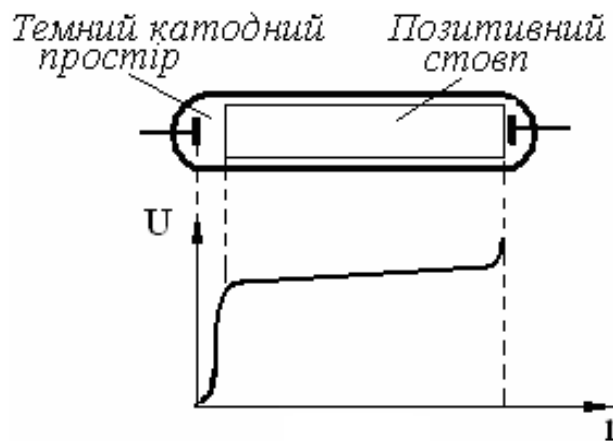


Рис. 7. Розподіл спаду потенціалу при тліючому розряді в газорозрядній трубці.

У ділянці позитивного стовпа електрони виникають за рахунок ударної іонізації. Електрони, що утворилися в процесі іонізації, рухаються до анода, а позитивні іони – до катода і вибивають з нього електрони.

Для позитивного стовпа характерно, що його параметри (концентрація заряджених частинок, напруженість електричного поля) не змінюються на всій цій ділянці.

Тліючий розряд використовують у люмінесцентних лампах, трубках для реклам тощо. Оранжево-червоне світіння виникає, якщо трубки наповнені неоном. Позитивний стовп в аргоні має синювато-зеленуватий колір. В лампах денного світла використовують розряд у парі ртуті. Найважливіше застосування

тліючий розряд дістав у порівняно недавно створених квантових джерелах світла – газових лазерах.

Звичайно, широке використання газового розряду використано в люмінесцентних лампах.

Люмінесцентні лампи низького тиску старого зразка виготовляють потужністю 30, 40, 80, 120 Вт на напругу 220В. Останнім часом у продажі є лампи й інших потужностей, а також цокольні під патрони E27 і E14 (рис. 9.). Термін служби сучасних компактних енергозберігаючих ламп може сягати 20000 годин порівняно з лампами розжарення у 1000 годин роботи при номінальній напрузі і стабільній температурі оточуючого середовища 15-25 °С, а економія електроенергії сягає 80%.

Час роботи люмінесцентних ламп залежить у значній мірі від стабільності напруги, кількості комутацій (кількості вмикань і вимикань лампи) і якості пускорегулювальних пристроїв (баластів).

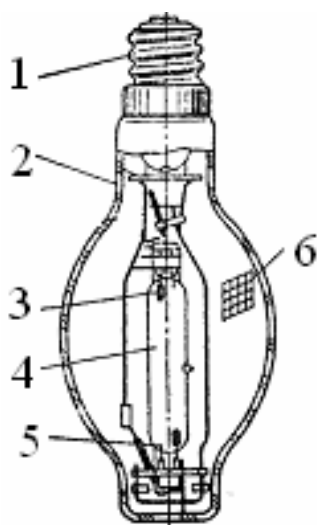


Рис. 8. Дугова ртутна лампа: 1 – цоколь, 2 – скляний балон, 3 – основний електрод, 4 – кварцова трубка, 5 – додатковий електрод, 6 – люмінофор.

Дугові ртутні лампи високого тиску ДРЛ (рис.8) відрізняються тим, що в них газовий розряд відбувається всередині прямої кварцової трубки 4, наповненої аргоном з добавкою невеликої кількості ртуті. У трубку впаяні основні 3 і додаткові 5 електроди. При подачі напруги між додатковими і основними електродами виникає тліючий розряд, що полегшує іонізацію парів ртуті і розряду між основними електродами при тиску 5-10 кгс/м<sup>2</sup>. Кварцова трубка вміщена в скляний балон 2, внутрішні стінки якого вкриті шаром люмінофору 6.

Світлове випромінювання люмінофору доповнює синьо-зелене випромінювання газового розряду у кварцовій трубці і дозволяє одержати необхідну кольорову гаму світла. Лампи ДРЛ з цоколем  $\varnothing 40$  мм випускають потужністю 80, 125, 250, 400, 700 і 1000 Вт на напругу 125-145 В.

#### 4. Схеми увімкнення люмінесцентних ламп з баластами 1 покоління.

Існує два види баластів. Баласты першого покоління – це дросель (катушка індуктивності з сердечником), стартер і конденсатори. Баласты 2 покоління це електронні пускорегулювальні пристрої, які мають ряд переваг над баластами 1 покоління.

Розглянемо принцип дії люмінесцентної лампи з баластом першого покоління, схема ввімкнення якої зображена на рис. 9. Стартер *Ст*, призначений для автоматичного вмикання та вимикання електродів люмінесцентної лампи. Він складається з неонові лампи тліючого розряду, в якому один з електродів прямий, а інший – біметалевий (дугоподібний). При вмиканні електричного кола в мережу, між електродами стартера виникає тліючий розряд, який нагріває їх (рис. 10 а). Біметалевий електрод деформується, замикає коло (рис. 10 б), після чого остигає і знову розмикає його.

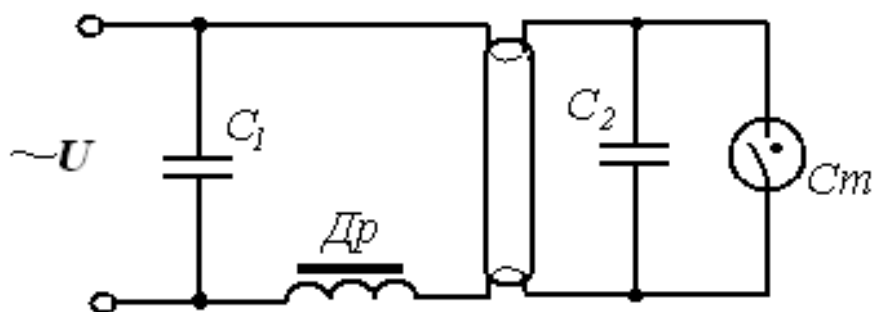


Рис. 9. Схема ввімкнення люмінесцентної лампи.

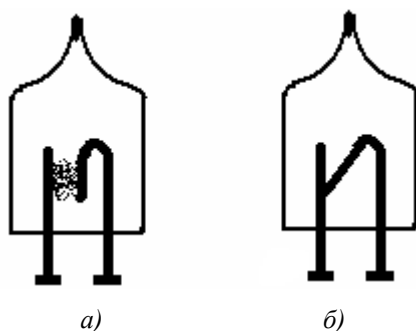


Рис. 10. Принцип дії стартера: а) електроди розімкнені, між ними виникла електрична дуга; б) електроди замкнені унаслідок нагрівання їх дугою.

Процеси нагрівання та охолодження електродів стартера (замикання і розмикання кола) відбуваються до того часу, поки засвітиться люмінесцентна лампа.

Дросель *Др.* (рис. 11) виконує в електричному колі дві функції: по-перше, в момент розмикання електричного кола стартером утворюється висока миттєва ЕРС на кінцях котушки; по-друге, обмежує силу струму через лампу під час її свічення. Дросель повинен відповідати потужності лампи.



*Рис. 11. Дросель.*

Коротко пояснимо дію такого електричного кола. При вмиканні кола в електричну мережу, через електроди люмінесцентної лампи протікає електричний струм. Між електродами стартера виникає електрична дуга, яка нагріває їх. Біметалевий електрод деформується, торкається іншого електрода (коло замикається) і по електродах (спіралях) люмінесцентної лампи протікає номінальний струм. Останні нагріваються до температури 800 °С і навколо них утворюється хмаринка електронів внаслідок термоелектронної емісії.

У стартері, після того як тліючий розряд припинився, електроди охолоджуються і розмикаються. Напруга мережі разом з імпульсом ЕРС, наведеної дроселем в момент розмикання кола стартером, викликає самостійний газовий розряд у трубці люмінесцентної лампи. Через 1-2 секунди лампа засвічується. Якщо лампа не засвітилася з першого розмикання електродів стартера, то процес його увімкнення і розмикання буде повторюватися до тих пір, поки в лампі виникне самостійний газовий розряд.

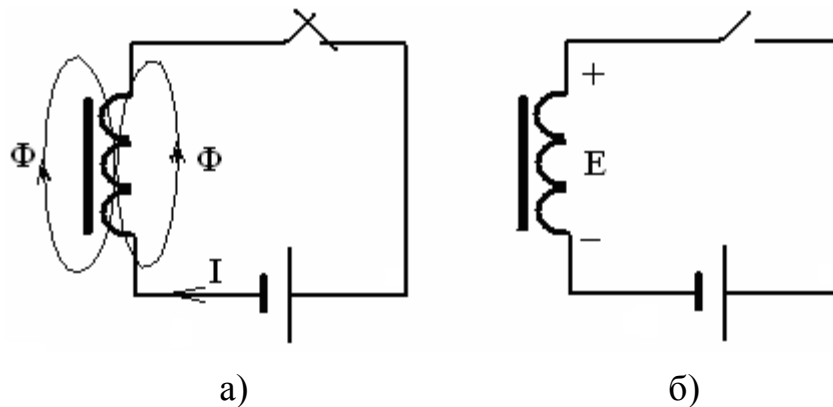


Рис. 12. а) – виникнення магнітного потоку  $\Phi$  в дроселі під час замикання кола;  
 б) – виникнення ЕРС на кінцях котушки дроселя під час розмикання кола.

Виникнення імпульсу високої ЕРС пояснюється явищем самоіндукції, яка виникає в момент розмикання електричного кола стартером (рис. 12). З фізики відомо, що ЕРС самоіндукції  $e = -L \frac{di}{dt}$ , де  $L$  - індуктивність котушки, її значення велике, так як дросель має велику кількість витків дроту і стальне осердя;  $\frac{di}{dt}$  швидкість зміни струму в котушці в момент розмикання кола. Ця величина теж велика, так як процес комутації відбувається миттєво.

Під час розряду в лампі, її опір дуже малий, тому струм має бути надто високим. Але дросель має великий індуктивний опір і виконує свою другу функцію – обмежує силу струму в колі лампи.

Конденсатор  $C_1$  служить для зменшення радіоперешкод під час запалювання неонові лампи в стартері (іскріння), а конденсатор  $C_2$  – для підвищення коефіцієнта потужності схеми.

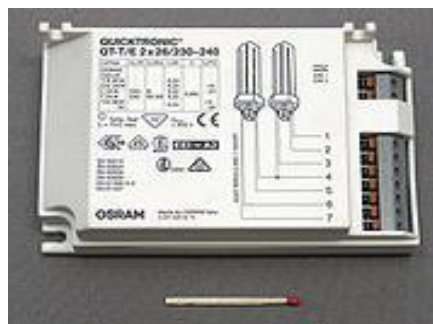
#### **4. Сучасні енергозберігаючі лампи на електронних пускорегулювальних пристроях.**

Сучасні цокольні енергозберігаючі лампи (рис. 13) мають електронні баласты (рис. 14), які «пакують» в цоколь лампи. Переваги їх насамперед у тому, що вони не зменшують коефіцієнт потужності  $\cos \varphi$  в електромережі, на відміну від дроселя. Інша перевага полягає у збільшенні частоти мигань за рахунок генерування частоти струму частотою (20-60 кГц) на відміну від дросельних у 50

Гц. Варто зазначити, що мигання з частотою 50 Гц викликають втомлюваність зору, на виробництві викликають явище стробоскопічного ефекту тощо.



*Рис. 13. Компактна енергозберігаюча люмінесцентна лампа з цоколем E27*



*Рис. 14. Зразок електронного пуско-регулювального пристрою.*

Електронні пуско-регулювальні пристрої мало споживають електроенергії, забезпечують плавний запуск лампи, що зумовлює довший термін роботи, усувають гул, вони компактні і мають малі розміри та масу.

Іншим інноваційним джерелом світла є світлодіодні лампи. Можливість отримання світіння за допомогою використання напівпровідникових матеріалів була відкрита ще в 1907 році експериментатором з Британії Генрі Раундом. Перший світлодіод з видимим спектром випромінювання з'явився лише в 1962 році. Професорові Іллінойського університету Ніку Холоньяку з групою своїх учених тоді вдалося домогтися червоного світлового потоку. Таким чином, головна заслуга в розробці напівпровідникових джерел світла належить саме даному вченому і винахідникові.

Трохи раніше, у 1961 році, Гару Питманом і Робертом Байардом була розроблена технологія створення інфрачервоних світлодіодів.

Після відкриття напівпровідникових лампочок з червоним випромінюванням поступово стали изобретатися зелені, жовті, оранжеві, сині джерела світла. Перший білий світлодіод з'явився тільки в самому кінці 20-го століття. Насправді він являє собою джерело синього випромінювання, на поверхню колби якого завдано люмінофор, перетворюючий синє світіння в біле. Сині світлодіоди з'явилися на світ в 1995 році завдяки японським винахідникам.

Головним елементом кожного світлодіода є штучно створений напівпровідниковий кристал. Цей елемент безпосередньо перетворює електричний струм у випромінювання. У світлодіодах велика частина енергії йде в світловий потік (втрат практично немає), оскільки напівпровідникові джерела світла не потребують нагрівання, як, приміром, лампи розжарювання.



*Рис. 15. Світлодіодні лампи.*

Функціонування цих приладів засновано на принципі р-п переходу. Світлодіодний кристал включає в себе напівпровідники з різною провідністю. Під впливом електричного струму в області контакту даних елементів відбувається рекомбінація носіїв негативних і позитивних зарядів (електронів і дірок), в результаті чого відбувається випускання фотонів, завдяки яким і створюється випромінювання.

У світлодіодах напівпровідниковий кристал з'єднується з анодом у вигляді золотої нитки і розміщується в мідній або алюмінієвої відполірованої чашечці, яка одночасно служить катодом і рефлектором. Вся ця конструкція поміщається в невелику колбу або заливається спеціальним матеріалом, яким надають певну форму. Від форми захисної оболонки світлодіода залежить кут його випромінювання. Чим більше плоский вигляд у колби, тим більше розсіяно

світіння (до 120-130 градусів). У опуклих джерел світла розглянутого типу кут світіння становить від 8 до 60 градусів.

У ході експериментів лампи розжарювання споживали 60 Вт електроенергії, в той час як світлодіодні лампи - тільки 12,5 Вт, при приблизно однаковій кількості світла. Люмінесцентні лампи теж виявилися вельми економічні - 15 Вт . Якби людство відмовилося від ламп розжарювання на користь світлодіодів або компактних люмінесцентних ламп, то негативний вплив на навколишнє середовище, пов'язане зі спалюванням викопного палива, зменшилася б в 3-10 разів. Проте вчені зосередилися не лише на очевидних перевагах світлодіодів (економії електроенергії). Вони визначили "екологічну ланцюжок": вплив різних джерел світла на навколишнє середовище на всьому протязі життя лампочки, тобто від видобутку сировини для неї, до утилізації відпрацьованого пристрою.

Виявляється, якщо з точки зору енергоспоживання люмінесцентні і світлодіодні лампи схожі, то в плані загальних екологічних характеристик світлодіоди однозначно виграють.

За більшістю критеріїв компактні люмінесцентні лампи завдають навколишньому середовищу не більше шкоди, ніж світлодіодна лампа. Але основна складність - утилізація люмінесцентних ламп, які містять токсичні речовини.

У світлодіодів також є серйозний екологічний недолік: алюмінієвий радіатор, що охолоджує компоненти світлодіодним лампочки. Справа в тому, що процес видобутку, очищення й обробки алюмінію є дуже енергоємним і створює кілька побічних продуктів, таких як сірчана кислота. Це створює додаткове навантаження на навколишнє середовище, що знижує "екологічна якість" світлодіодних джерел світла.

Вчені вважають, що в найближчі п'ять років будуть розроблені більш ефективні світлодіоди з набагато менш масивними радіаторами.



## **Лекція 8. Основні поняття про трансформатори.**

1. Історія винаходу трансформатора.
2. Призначення, будова та основні параметри силових трансформаторів.
3. Класифікація та маркування трансформаторів. (Самостійно)
4. Рівняння ЕРС трансформатора.
5. Робота трансформатора в режимі холостого ходу (XX).

### **Література:**

Л-1 с. 111-116, Л-2 с. 96, 107-109.

### **1. Історія винаходу трансформатора.**

Широке використання електричної енергії в промисловості, сільському господарстві, побуті – зумовлює використання різної за величиною напруги. Наприклад, один лише телевізор або інший електронний прилад вимагає одночасного використання різних за величиною напруг. Прогрес електротехніки, поряд з іншими факторами, пов'язаний з можливістю передачі електроенергії високої напруги в електромережі, а використання її споживачами – нижчої.

У 1876 році російським інженером П.М. Яблочковим вперше було створено трансформатор з розімкнутим магнітопроводом. Такий апарат служив для зміни величини напруги при незмінній частоті електричного струму та споживаної потужності, і використовувався для живлення електросвічок.

У 1882 році І.П. Усачов демонстрував удосконалений трансформатор із замкненим магнітопроводом, який також використовувався для живлення свічок Яблочкова.

У 1891 році Доліво–Добровольським М.О. була створена і набула широкого використання трифазна система змінного струму, елементом якої був трифазний трансформатор.

Отже трансформатором називають статичний електромагнітний апарат, призначений для перетворення електричного струму однієї напруги в електричний струм іншої напруги при незмінній його частоті та потужності.

## 2. Призначення, будова та основні параметри силових трансформаторів.

Принцип дії трансформатора базується на явищі електромагнітної індукції. Трансформатори мають широке застосування в ЛЕП, радіоелектронних виробках, апаратах живлення тощо.

Відомо, що генератори виробляють електричний струм напругою 3,15; 6,5; 10,5; 15,7 кВ. Для передачі електроенергії на відстань, при мінімальних втратах, використовують значно вищу напругу. У ЛЕП напруга сягає 35, 110, 220, 500, 750 кВ, що здійснюють за допомогою трансформаторів.

Економічна вигода передачі електроенергії високих напруг над низькими очевидна. Наприклад, потрібно передати електроенергію потужністю  $S=10000$  кВА. Здійснимо таку передачу при напругах 6 та 110 кВ.

Відомо, що активна потужність  $P = UI \cos \varphi$ . Звідси  $I = \frac{P}{U \cos \varphi}$ .

$$\text{Для 6кВ: } I_1 = \frac{10000}{6000\sqrt{3}} = \frac{5}{3\sqrt{3}} \text{ (А).}$$

$$\text{Для 110кВ: } I_2 = \frac{10000}{110000\sqrt{3}} = \frac{1}{11\sqrt{3}} \text{ (А).}$$

Втрати на нагрівання проводів електромережі можна розрахувати за законом Джоуля-Ленца:  $Q = I^2 R t$

Співвідношення між втратами в лінії електропередач при різних напругах дорівнює:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{I_1^2}{I_2^2} = \frac{25 \cdot 121}{9} \approx 336 \text{ раз.}$$

Отже втрати в ЛЕП при нижчій напрузі більші у 336 раз.

Трансформатори широко застосовують у різних сферах діяльності.

Зокрема в техніці зв'язку, автоматиці, вимірних приладах та трансформаторах, у спеціальній технології (зварювання, охорона здоров'я) тощо.

Запорізькі вчені науководослідного інституту трансформаторного будівництва розробили конструкції трансформаторів, що мають потужність від десятих долей до мільйонів Вольтампер.

На електросхемах трансформатори мають умовні позначення, зображені на рис. 1.

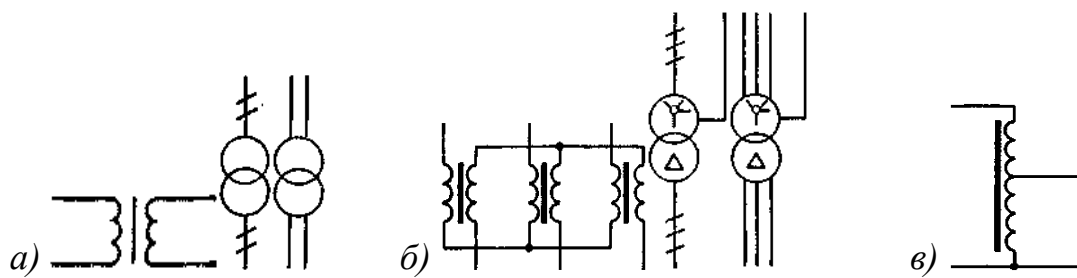


Рис. 1. Умовні зображення трансформаторів: а – однофазні;  
б – трифазні; в – автотрансформатори.

На щитках трансформаторів прикріплюють паспорти, де вказується їх номінальну напругу, номінальну потужність, частоту, кількість фаз, схему з'єднання, режим роботи (довготривалий чи короткочасний), спосіб охолодження.

Трансформатор являє собою замкнутий магнітопровід на якому розташовані дві або декілька обмоток (рис. 2).

У малопотужних трансформаторах (високочастотних), що використовують у радіотехніці, магнітопроводом може бути і повітряне середовище.

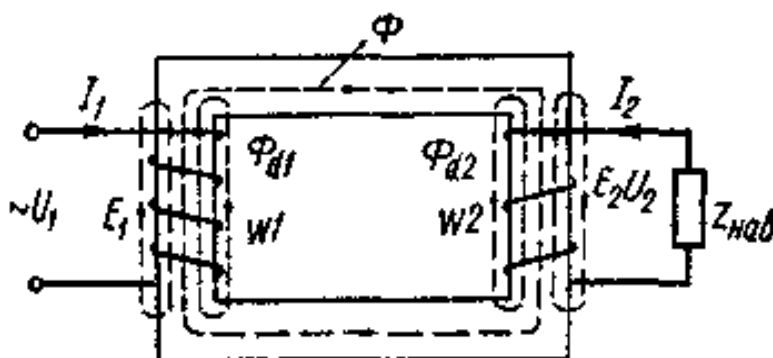


Рис. 2. Принципова схема одно-фазного трансформатора

З метою зменшення втрат на гістерезис, магнітопровід виготовляють з магнітом'якого матеріалу – трансформаторної сталі, що має вузьку петлю намагнічування.

Для зменшення втрат на вихрові струми до матеріалу магнітопроводу вводять домішки кремнію, що підвищує їх опір і набирають його з пластин листової сталі завтовшки 0,35-0,5мм, ізольованих одна від одної теплостійким лаком або спеціальним папером.

Обмотки (катушки) трансформаторів виготовляють з мідного або алюмінієвого дроту, ізольованого лаком. Катушки до яких підводять напругу,

називають первинними, а ті до яких приєднується навантаження – вторинними. На осерді може бути декілька вторинних обмоток, що дає можливість отримувати декілька напруг різної величини.

Якщо вторинну обмотку розімкнути, а до первинної обмотки підвести змінну синусоїдальну напругу  $U_1$ , то в обмотці виникає струм холостого ходу  $I_0$ , який створить в осерді змінний магнітний потік  $\Phi_0$ .

Якщо миттєве значення напруга становить  $u_1 = U_m \sin \omega t$ , то в ідеальному трансформаторі (без втрат) його первинна обмотка являтиме собою чисто індуктивне навантаження, при цьому миттєве значення струму:

$$i_{01} = I_{m1} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$$

Магнітний потік співпадає за фазою зі струмом, що його створює:

$$\Phi_0 = \Phi_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$$

Цей потік, будучи пов'язаний з витками обох обмоток, наведе в них

електрорушійні сили (ЕРС):

$$e_1 = -n_1 \frac{d\Phi_0}{dt};$$

$$e_2 = -n_2 \frac{d\Phi_0}{dt}.$$

Звідси ЕРС у первинній обмотці  $e_1 = -n_1 \frac{d\Phi_0}{dt} = -n_1 \Phi_m \cos \omega t$ . Відповідно для ЕРС у вторинній обмотці запишемо вираз:  $e_2 = -n_2 \Phi_m \cos \omega t$

Відповідно 2 закону Кірхгофа, нехтуючи втратами в первинній обмотці при

малому значенні струму холостого ходу, отримаємо вирази:

$$U_1 = -E_1;$$

$$U_2 = -E_2 .$$

Розв'язок системи цих рівнянь дає таке співвідношення:  $\frac{U_2}{U_1} = \frac{E_2}{E_1} = \frac{n_2}{n_1} = k$ .

Де:  $k$  – коефіцієнт трансформації трансформатора.

Якщо  $U_2 > U_1$ , то коефіцієнт трансформації  $k > 1$  – трансформатор підвищувальний. Якщо ж  $k < 1$  – трансформатор понижувальний.

### 3. Класифікація та маркування трансформаторів. (Самостійно)

Промисловість випускає різноманітні види трансформаторів, що класифікуються за певними ознаками:

1. За призначенням: силові; вимірювальні; спеціальні.
2. За кількістю фаз: однофазні; трифазні; багатофазні.
3. За напругою на вході-виході: понижувальні; підвищувальні.
4. За способом охолодження: сухі; масляні.
5. За значенням напруги: низьковольтні, напругою до 1000В; високовольтні, напругою більше 1000В.
6. За формою магнітопроводу: стержневі; броньові.

Найпоширеніші трансформатори – стержньові (рис. 3 а). Вони складаються з магнітопроводу у вигляді замкненого сталюого осердя, на якому розташовані обмотки низької та високої напруги, або первинної і вторинної. Первинна і вторинна обмотки електрично не з'єднані між собою.

У броньованих трансформаторах магнітний потік розгалужується на два потоки, тому обмотки таких трансформаторів не товсті і розташовують їх на стержні (рис. 3). Стержнем називають ту частину магнітопроводу, на якій розташовані обмотки, а іншу частину – ярмом. Використовують їх у сучасних радіотехнічних установках і для силових трансформаторів. Ярма у броньованих трансформаторах пронизуються невеликими потоками, зменшують наводки від змінного струму. Крім того вони захищають обмотки від механічних пошкоджень.

Різновидністю броньованих є трансформатори, осереддя яких виготовляють навіть з холоднокатаної сталі. Такі осердя дають економію матеріалів на 15-20% порівнюючи з броньованими, їх використовують у трансформаторах потужністю до 500кВА.

Кожен тип трансформатора має своє позначення на схемі:

Т – трифазний ; М – масляний ; О – однофазний ; С – сухий; А – алюмінієва обмотка; Ц – циркуляція масла примусова; Н – регулятор напруги; Р – для ртутного випрямляча; Д – примусова циркуляція повітря тощо. Наприклад, якщо на схемі позначено “ТМА –  $\frac{20}{6}$ ”, то це означає, що трансформатор масляний, з алюмінієвими обмотками потужністю 20кВА, первинна напруга 6кВ.

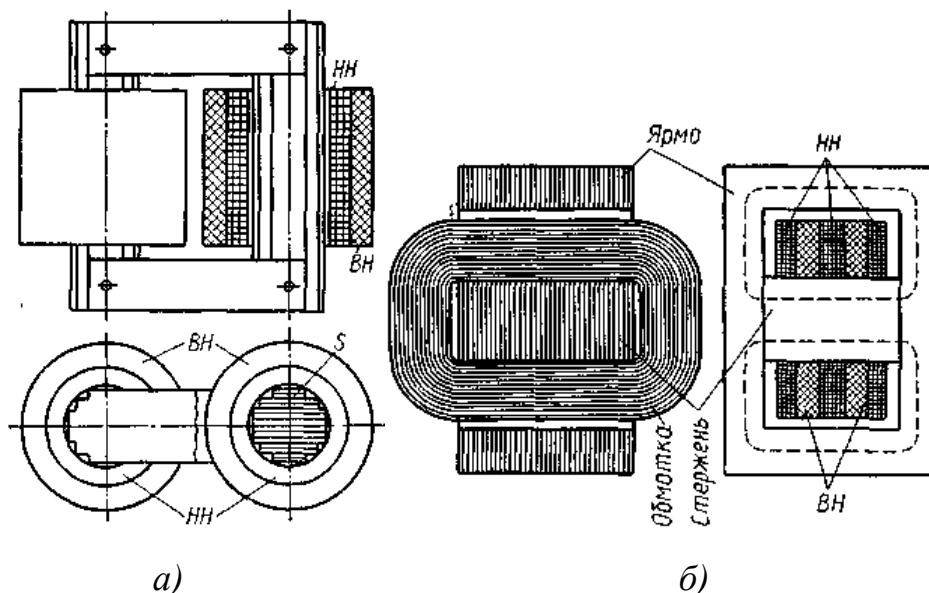


Рис. 3. Будова однофазного трансформатора: а) – стержньовий, з концентричною обмоткою, б) – броньовий.

Тема “Трансформатори” вивчається в курсі фізики, та в розділі “Електротехнічні роботи” на заняттях трудового навчання. При поясненні учням, необхідно звернути увагу на те, що в принципі роботи трансформаторів лежить принцип взаємодукції та працюють вони тільки на змінному струмі.

#### 4. Рівняння ЕРС трансформатора

Вище було зазначено, що до основних параметрів трансформаторів відносяться: напруга первинної та вторинної обмоток  $U_1$  та  $U_2$ , електрорушійні сили первинних та вторинних обмоток  $E_1$  та  $E_2$ , кількість витків обмоток  $n_1$  та  $n_2$ , струми первинної та вторинної обмоток  $I_1$  та  $I_2$ .

З курсу фізики відомо, що при подачі напруги на первинну обмотку трансформатора, по ній протікатиме електричний струм, який у свою чергу створить навколо неї основний змінний магнітний потік  $\Phi$ . Цей потік, будучи зв'язаним з вторинною котушкою за допомогою магнітопроводу збуджуватиме в

$$\text{них ЕРС} - e_1 = -n_1 \frac{d\Phi}{dt}; e_2 = -n_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad (1).$$

Якщо до первинної котушки підведена змінна напруга, що змінюється за законом  $u = U_m \sin \omega t$ , то при нехтуванні активним опором, втратами на гістерезис та вихровими струмами, напруга буде врівноважуватися з ЕРС самоіндукції  $u = -e$

. Очевидно, що й ЕРС самоіндукції буде змінюватися за тим же законом –  $e = E_m \sin \omega t$  (2).

Скориставшись виразами 1 та 2 отримаємо  $E_m \sin \omega t = -n_1 \frac{d\Phi}{dt}$ . Звідки  $d\Phi = -\frac{1}{n_1} E_m \sin \omega t \cdot dt$ . Обчислимо сумарний магнітний потік в осерді трансформатора, проінтегрувавши останній вираз:

$$\Phi = \int -\frac{E_m}{n_1} \sin \omega t \cdot dt = \frac{E_m}{\omega n_1} \cos \omega t + A. \quad (3)$$

Тут А (постійна інтегрування) дорівнює нулю, бо синусоїдальна ЕРС не може створювати постійну складову магнітного потоку.

У виразі (3) введемо позначення:

$$\Phi_m = \frac{E_m}{\omega n_1} \quad (4)$$

де  $\Phi_m$  – амплітуда основного змінного магнітного потоку в осерді котушки.

Виразимо амплітудну ЕРС через її діюче значення  $E_m = E\sqrt{2}$ , а циклічну частоту через частоту коливань ЕРС та магнітного потоку  $\omega = 2\pi f$  і підставимо ці значення у вираз 4. Отже  $\Phi_m = \frac{\sqrt{2}E}{2\pi f n_1}$ ; звідки  $E_1 = \frac{2\pi f \Phi_m n_1}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \Phi_m f n_1$ ; Де  $E_1$  – діюче значення ЕРС.

$$\text{Так як } \frac{2\pi}{\sqrt{2}} = 4,44 \text{ то } \boxed{E_1 = 4,44 f n_1 \Phi_m} \quad (5)$$

Аналогічним буде вираз і для вторинної обмотки трансформатора:

$$\boxed{E_2 = 4,44 f n_2 \Phi_m} \quad (6)$$

Вирази 5, 6 пов'язують діючі значення ЕРС в обмотці з амплітудою магнітного потоку в осерді, їх називають – формулою трансформації за ЕРС і має важливе значення в теорії трансформаторів та електричних машин змінного струму.

## 5. Робота трансформатора в режимі холостого ходу (XX).

Холостим ходом (ХХ) трансформатора називають такий режим його роботи, при якому коло вторинної обмотки розімкнене, а до первинної підведена номінальна напруга (рис. 4).

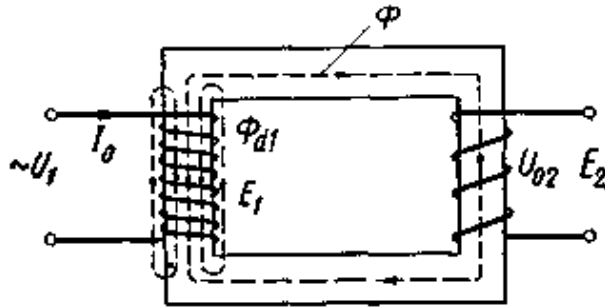


Рис.4. Схема роботи трансформатора при холостому ході

В режимі ХХ у первинній котушці протікає електричний струм, а тому нею споживається певна потужність, тоді як у вторинній обмотці струм відсутній і споживана нею потужність дорівнює нулю.

Це явище можна продемонструвати на прикладі електричного кола, схема якого зображена на рис. 5. При відсутності навантаження в колі вторинної обмотки в первинній обмотці протікає струм ХХ, на що вказує слабке свічення лампочки Л. При замиканні ключів К<sub>1</sub>-К<sub>3</sub> у вторинній обмотці протікатиме струм навантаження (лампочки Л<sub>1</sub>-Л<sub>3</sub> світяться), при цьому зростатиме й струм у первинній обмотці.

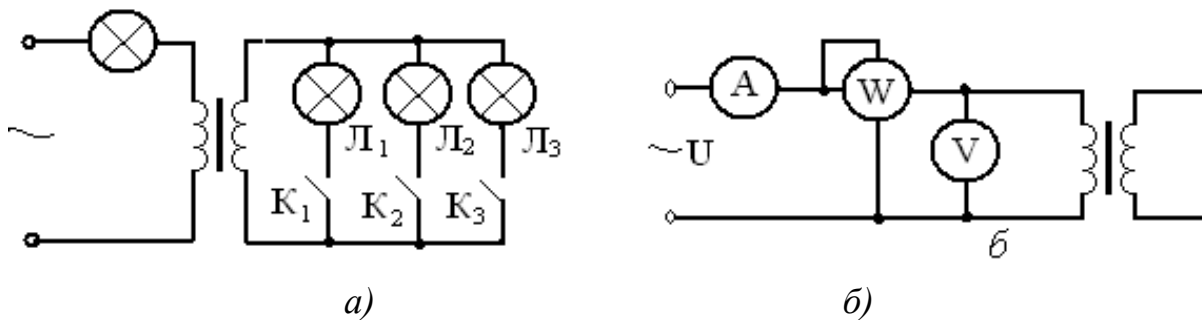


Рис. 5. Схеми електричних кіл для дослідження роботи трансформатора в режимі Х.Х.

Очевидно потужність трансформатора, що він одержує від джерела при розімкнутій вторинній обмотці витрачається на перемагнічування магнітопроводу (гістерезис), споживання активної енергії первинною обмоткою (нагрівання провідників), створення струмів Фуко (колових струмів) та магнітних потоків розсіювання.



Струм  $I_{01}$ , що вимірюється амперметром (рис. 5), називають струмом ХХ трансформатора. Він складає 2,5-10% від номінального струму первинної обмотки. Цей струм створює магнітний потік  $\Phi_0$ , який переважно замикається через осердя трансформатора. Проте частина його силових ліній охоплює саму котушку і замикається через повітря, створюючи при цьому так званий магнітний потік розсіювання. Він становить приблизно 0,25% від основного потоку, тобто  $\Phi_{1p} = 0,0025\Phi_0$ .

Перетинаючи витки первинної та вторинної обмоток магнітний потік індукує в них електрорушійні сили  $e_1$  та  $e_2$ .

Електричний струм  $I_0$ , що протікає у первинній котушці спричиняє спад напруги на активному опорі  $I_0R_1$ , що призводить до її нагрівання. Тому котушки намотують з мідних або алюмінієвих провідників, що мають добру провідність, цим самим запобігають значним втратам електроенергії, та можливого виходу з ладу трансформатора внаслідок його перегріву.

Частина енергії в трансформаторі тратиться на перемагнічування сталюого осердя (гістерезис).

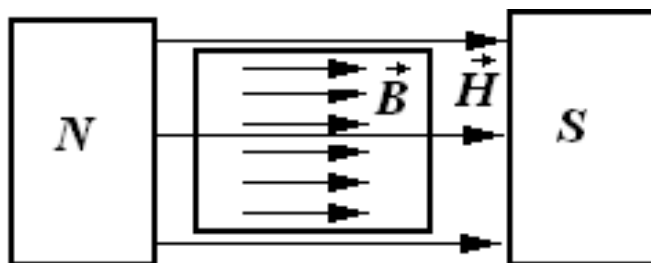


Рис. 6. Феромагнітний стержень між полюсами магніту.

З фізики відомо, що магнітне поле здатне намагнічувати фероматеріали, з яких і виготовляють осердя трансформаторів. Процес намагнічування відбувається завдяки орієнтації спінових магнітних моментів електронів окремих атомів в одному напрямку.

На рис. 6 зображено сталюий стержень між полюсами магніту. Магніт створює зовнішнє магнітне поле з напруженістю  $H$ . Атоми заліза утворюють так звані «домени» - невеликі області в яких самовільно (спонтанно) магнітні диполі орієнтуються в одному напрямку. Магнітним диполем є електрон, який має некомпенсований спіновий магнітний момент. У наслідок теплового руху домени

орієнтовані хаотично, тому стержень не виявляє зовнішніх ознак намагніченості. Якщо ж на стержень подіяти зовнішнім магнітним полем з напруженістю  $H$ , то домени почнуть орієнтуватись у напрямку зовнішнього поля і створюватимуть внутрішнє магнітне поле з індукцією  $B$ . Магнітна індукція у феромагнітному стержні може переважати зовнішнє магнітне поле у тисячі разів.

На рис. 7 зображено залежність внутрішньої магнітної індукції  $B$  сталю стержня від напруженості  $H$  зовнішнього магнітного поля. графіка бачимо, що намагніченість осердя розпочалось у точці  $O$ . Стан насичення (всі магнітні моменти зорієнтувалися в напрямку зовнішнього поля) настає в точці  $a$ , при напруженості зовнішнього поля  $H_m$  (рис. 7). Зменшуючи напруженість зовнішнього поля до нуля, орієнтація домен не стане хаотичною. Частина із них збереже попередню орієнтацію і стержень матиме так званий залишковий магнетизм  $B_s$ .

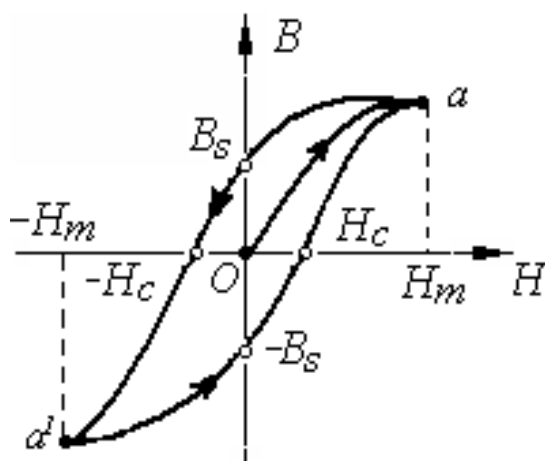


Рис. 7. Петля гістерезису.

При зміні напрямку магнітного потоку зовнішнього поля відбувається переорієнтація домен (молекулярних струмів). Збільшуючи напруженість зовнішнього магнітного поля у протилежному напрямку, стержень розмагнітиться при певній величині напруженості —  $H_c$ , яку називають коерцитивною силою.

Подальше зростання магнітного потоку у зворотному напрямку знову призведе до стану насичення (точка  $a'$ ), після чого процес повторюється у прямому напрямку до точки  $a$ . Отриманий графік намагнічування феромагнетиків називають петлею гістерезисну. Різні сплави феромагнітних матеріалів мають різні значення коерцитивної сили, а отже й площі петель гістерезисну.

Перемагнічування феромагнетиків у зворотному напрямку, що відповідає частині графіка  $a - a^1$ , не співпадає з процесом, що відбувався прямому напрямку (частина графіка  $O - a$ ). Отже на перемагнічування осердя буде витрачатися енергія зовнішнього магнітного поля, а отже електроенергія споживана первинною котушкою. Чим більша площа петлі гістерезису, тим більші втрати на перемагнічування магнітопроводу. Тому в трансформаторах використовують осердя з так званої магнітом'якої електротехнічної сталі з малою площею петлі гістерезису.

Втрати в сталі можливі ще й за виникнення колових струмів Фуко, які його нагрівають. Щоб запобігти їх утворенню осердя набирають з тонких пластин електротехнічної сталі, кожна з яких покрита ізолюючою речовиною.

Для цілісного аналізу параметрів трансформатора в режимі ХХ побудуємо векторну діаграму. Для цього запишемо 2 закон Кірхгофа або рівняння електромагнітної рівноваги для первинної обмотки трансформатора:  $\vec{U}_1 = -\vec{E}_1 + \vec{I}_0 R + \vec{I}_0 X_{1L}$ . Векторна діаграма трансформатора (рис. 8) будується в такій послідовності:

1. За основу беремо магнітний потік  $\vec{\Phi}_0$ , відклавши його на малюнку горизонтально. Він відстає від струму  $I_{01}$ , що його створює, на кут  $\delta = 5^\circ - 7^\circ$  за причини втрат на гістерезис та вихрові струми в сталі.
2. Магнітний потік, як відомо, перетинаючи первинну та вторинну котушки трансформатора індукує в них електрорушійні сили  $E_1$  та  $E_2$ , що відстають від магнітного потоку на  $\frac{\pi}{2}$ . На рис. 7 ці вектори напрямлені вертикально вниз.
3. Потік розсіювання співпадає зі струмом холостого ходу  $\vec{I}_0$ , та як він не здійснює перемагнічування осердя, а замикається навколо витків котушок через повітря та індукує в них ЕРС розсіювання  $-\vec{E}_p$ . На діаграмі ЕРС розсіювання напрямлене під кутом  $90^\circ$  до  $\vec{I}_0; \vec{\Phi}_p$ .
4. Спад напруги на активному опорі котушки  $\vec{I}_0 R$ , як відомо, співпадає зі струмом  $\vec{I}_0$ , а отже випереджає електрорушійну силу в первинній котушці. На

малюнку активний спад напруги проведено з кінця вектора  $(-\vec{E}_1)$  паралельно до вектора струму  $\vec{I}_0$ .

5. Спад напруги на індуктивному опорі, як відомо, випереджає силу струму в котушці на кут  $90^\circ$ . Отже з кінця активної складової спаду напруги під кутом  $90^\circ$  проводимо вектор індуктивної складової  $\vec{I}_0 X_{l1}$ . За 2 законом Кірхгофа – вираз (8) вектор напруги, що підводиться до первинної обмотки -  $\vec{U}_1$  буде з'єднувати початок вектора  $(-\vec{E}_1)$  з кінцем спаду напруги на індуктивному опорі котушки  $\vec{I}_0 X_{l1}$ .

З векторної діаграми видно, що кут  $\varphi$  між силою струму в первинній котушці та підведеною до неї напругою становить приблизно  $90^\circ$ . Отже коефіцієнт потужності в режимі роботи ХХ прямує до нуля –  $\cos \varphi \rightarrow 0$ , а тому трансформатор створює для електромережі реактивне навантаження.

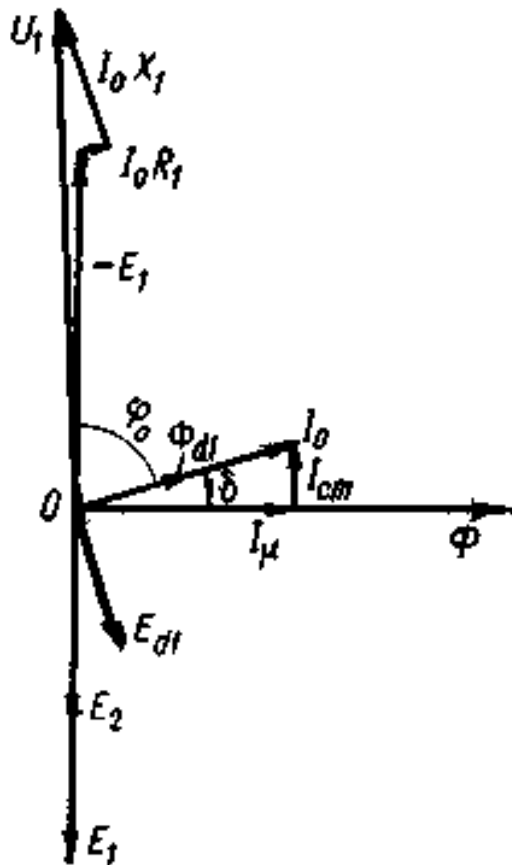


Рис. 8. Векторна діаграма холостого ходу трансформатора

## Лекція 9. Робота силового трансформатора в режимі навантаження.

1. Векторна діаграма трансформатора в режимі навантаження. Явище саморегулювання.
2. Зміна вторинної напруги трансформатора при зміні навантаження.
3. Втрати і ККД трансформаторів.
4. Трифазні трансформатори

### Література:

Л-1, с. 94-120. Л-2, с. 96-110. Л-3, с. 173-196.

### 1. Векторна діаграма трансформатора в режимі навантаження. Явище саморегулювання.

Трансформатор працюватиме в режимі навантаження, якщо до вторинної обмотки трансформатора приєднати навантаження опором  $Z$ . Під дією електрорушійної сили  $E_2$ , що збуджується магнітним потоком, по навантаженню, а отже й по вторинній обмотці протікатиме струм  $I_2$ . Цей струм, за правилом Ленца, збуджує магнітний потік  $\Phi_2$ , який направлений зустрічно магнітному потоку  $\Phi_1$  (рис. 1), створеному струмом первинної обмотки.

Тому в осерді циркулюють два зустрічні магнітні, які в кінцевому результаті утворюють сумарний магнітний потік  $\vec{\Phi} = \vec{\Phi}_1 + \vec{\Phi}_2$ . (1)

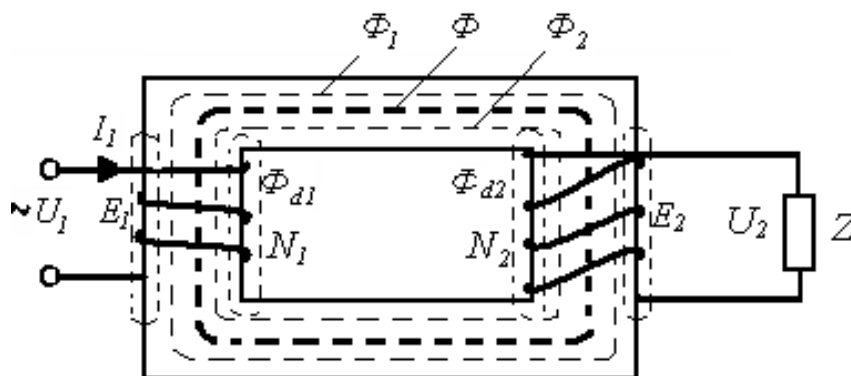


Рис. 1. Схема трансформатора

За 2 законом Кірхгофа напруга  $U_1$  на первинній обмотці наближається до величини електрорушійної сили  $E_1$  у ній. Враховуючи формулу ЕРС трансформатора 2 закон Кірхгофа запишеться так:  $U_1 \approx -E_1 = 4,44n_1f\Phi_m$  (2)

Так як добуток  $4,44n_1f$  постійна величина, то при стабільній напрузі в мережі  $U_1$  сумарний магнітний потік  $\Phi$  буде залежати лише від величини цієї напруги і не залежатиме від навантаження. Отже магнітний потік холостого ходу буде таким же, як і при навантаженні:  $\vec{\Phi}_0 = \vec{\Phi}$ .

Очевидно величина магнітних потоків в обох котушках прямо пропорційні значенням сили струмів та кількості витків у них, тобто величинам намагнічуючих сил. Запишемо вираз 1 через намагнічуючі сили:  $I_0n_1 = I_1n_1 + I_2n_2$ .

Поділивши обидві сторони рівняння на  $n_1$ , отримаємо вираз:  $I_0 = I_1 + I_2 \frac{n_2}{n_1}$

. (3). Позначимо другий доданок через  $I_2^1 = I_2 \frac{n_2}{n_1}$  і назвемо його струмом вторинної обмотки зведеним до первинної обмотки. Підставимо останній вираз в рівняння 3:  $I_1 = I_0 + (-I_2^1)$ . Отже величина сили струму у первинній обмотці трансформатора дорівнює векторній сумі намагнічуючого струму  $\vec{I}_0$  ( $\vec{I}_0$  – струм ХХ) і струму навантаження  $\vec{I}_2$  приведенного до первинної обмотки, взятого з протилежним знаком. Тобто, чим більше навантажений трансформатор, тим більший струм він автоматично буде споживати від мережі. Це явище носить назву принципу саморегулювання трансформатора.

Процеси, що відбуваються в навантаженому трансформаторі можна проілюструвати на векторній діаграмі, для побудови якої спочатку запишемо 2 закон Кірхгофа для обох котушок.

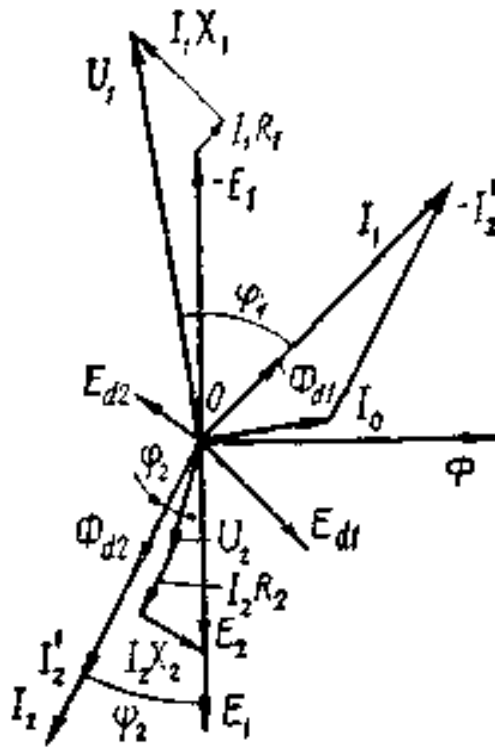


Рис. 2. Векторна діаграма навантаженого трансформатора.

$$\bar{U}_1 = -\bar{E}_1 + \bar{I}_1 r_1 + \bar{I}_1 X_{L1}$$

$$\bar{U}_2 = \bar{E}_2 - \bar{I}_2 r_2 - \bar{I}_2 X_{L2}$$

За цими рівняннями побудуємо векторну діаграму у такій послідовності:

1. За основу беремо сумарний магнітний потік  $\vec{\Phi} = \vec{\Phi}_0$ , і розташуємо його на рис. 2. горизонтально.
2. Під кутом магнітного запізнення  $\delta$  відкладаємо струм холостого ходу  $\vec{I}_0$ .
3. Електрорушійна сила, що виникає в обох котушках, відстає від магнітного потоку на  $\frac{\pi}{2}$ . Тому вектори  $\vec{E}_1, \vec{E}_2$  спрямовуємо вертикально вниз, під кутом  $90^\circ$  до вектора  $\vec{\Phi}$ .
4. Під кутом  $\psi$  до вектора  $\vec{E}_2$  відкладаємо силу струму навантаження  $\vec{I}_2$ . Сила струму у вторинній обмотці  $I_2 = \frac{U_2}{X_{L2}}$ , так як котушка має індуктивне навантаження  $X_{L2}$ .
5. Сила струму у первинній обмотці  $\vec{I}_1 = \vec{I}_0 + (-\vec{I}_2')$ . Отже до струму ХХ у первинній обмотці, який відстає від магнітного потоку на кут  $\delta$  ( $5^\circ-7^\circ$ ), додається зведений струм, взятий з протилежним знаком. Відкладаємо його від кінця вектора  $\vec{I}_0$ . Результуючий струм у первинній обмотці дорівнює сумі

зведеного струму та струму ХХ і на векторній діаграмі зображено вектором, що сполучає початок  $\vec{I}_0$  та кінець  $I_2^1$ .

6. Відобразимо векторно вираз  $U_1 = -E_1 + I_1 r_1 + I_1 X_{L1}$ . До зворотної ЕРС ( $-\vec{E}_1$ ) додамо суму спадів напруг на активному опорі  $\vec{I}_1 R_1$  та індуктивному опорі  $\vec{I}_1 X_{L1}$ , сума яких дорівнює напрузі у мережі  $\vec{U}_1$ .

7. Відобразимо векторно вираз  $U_2 = -E_2 + I_2 r_2 + I_2 X_{L2}$ . На кінці вектора електрорушійної сили вторинної котушки  $\vec{E}_2$  добудовуємо трикутник спадів напруг  $\vec{I}_2 r_2$  та  $\vec{I}_2 X_{L2}$ . При чому  $\vec{I}_2 r_2$  паралельно, а  $\vec{I}_2 X_{L2}$  перпендикулярно до  $\vec{I}_2$ . Результируючий вектор  $\vec{U}_2$  і буде напругою на кінцях вторинної котушки.

З векторної діаграми слідує:

1. При холостому ході трансформатора коефіцієнт потужності  $\cos\varphi$  прямує до нуля, так як кут  $\varphi \approx 90^\circ$ .
2. При збільшенні навантаження зростає сила струму  $I_2$ , а отже й приведений струм  $I_2^1$ . Тому сумарний струм у первинній обмотці  $I_1$  теж збільшується, а кут  $\varphi$  зменшується і відповідно  $\cos\varphi$  (коефіцієнт потужності) зростає, і досягає максимального значення при номінальному навантаженні трансформатора.

## **2. Зміна вторинної напруги трансформатора при зміні навантаження.**

При зміні навантаження трансформатора, струм  $I_2$  змінюється, що призводить до зміни напруги  $U_2$ . Залежність  $U_2 = f(I_2)$  називають зовнішньою характеристикою трансформатора (рис. 3). З графіка слідує - чим більше значення  $I_2$  тим менше значення напруги на клеммах трансформатора  $U_2$  при активному та індуктивному навантаженні. При ємнісному навантаженні навпаки, напруга збільшується при зростанні навантаження вторинної обмотки.

Пояснити це явище можна на основі рівняння електричного стану трансформатора  $\vec{U}_2 = \vec{E}_2 - \vec{I}_2 r_2 - \vec{I}_2 X_{L2} = \vec{E}_2 - \vec{I}_2 (r_2 + X_{L2})$ . Дійсно, при збільшенні струму навантаження  $I_2$  зростає від'ємник  $\vec{I}_2 (r_2 + X_{L2})$ , а тому число  $U_2$  зменшиться. Це означає, що при зростанні струму навантаження зростатиме спад напруги на



активному та індуктивному опорах котушки, а напруга на клеммах трансформатора зменшиться.

Зміну напруги  $U_2$  можна виразити в процентах від її номінального значення за такою формулою:  $\Delta U\% = \frac{U_{2H} - U_2}{U_{2H}} 100\%$ , де  $\Delta U$  – відносна процентна зміна вторинної напруги.

Для сучасних трансформаторів  $\Delta U = (2-4)U_{ном}$ .

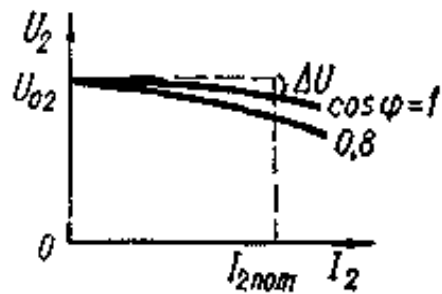


Рис. 3. Зовнішня характеристика навантаженого трансформатора

### 3. Втрати і ККД трансформаторів.

Як уже відзначалося, при побудові векторної діаграми, у процесі роботи трансформатора відбуваються втрати електроенергії на активному опорі та індуктивному опорах котушок, гістерезисі та розсіюванні магнітних потоків.

Для дослідження втрат використовують різні режими роботи трансформаторів, зокрема режим короткого замикання (КЗ) та холостого ходу (ХХ).

#### Дослідження роботи трансформатора в режимі КЗ.

Нехай вторинна обмотка трансформатора замкнена на коротко (рис. 4). До первинної обмотки підводиться така напруга короткого замикання  $U_{1К}$ , при якій струм вторинної обмотки дорівнює номінальному його значенню  $I_{2К} = I_{2Н}$ , що відповідає номінальному навантаженню трансформатора.

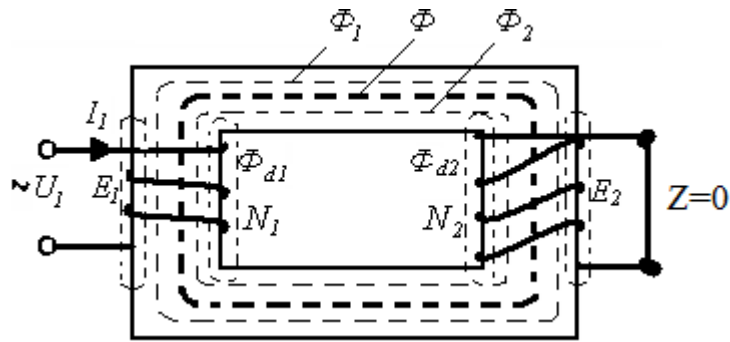


Рис. 4. Схема роботи трансформатора в режимі КЗ.

Струм називають номінальним, якщо при його протіканні зберігається температурний режим обмоток трансформатора. Виходячи з того, що  $U_{2K} \approx 0,05U_{ном}$ , то й магнітний потік дуже малий, а отже втратами на перемагнічування можна знехтувати. Таким чином потужність, що споживає трансформатор, витрачається переважно на нагрівання обмоток трансформатора і її називають втратами в міді  $P_M$ .

Враховуючи те, що в цьому досліді  $U_{1K}$  становить лише 5% від  $U_{1H}$  дослід проводиться обережно, тому що навіть при малих напругах, що становлять 5% номінального значення вторинна обмотка вийде з ладу (перегріється).

Отже при короткозамкненій вторинній обмотці споживання енергії відбувається лише на активному її опорі:  $P_{KЗ} = P_M$ .

Крім втрат у міді можна відзначити втрати трансформатора і в сталі – перемагнічування осердя (на гістерезис) та вихрові струми.

Дослідження втрат у сталі здійснюють при роботі трансформатора в режимі холостого ходу, тобто при розімкненій вторинній обмотці. У такому досліді на первинну обмотку подають номінальну напругу і вимірюють потужність, яка споживається лише трансформатором при відсутності інших споживачів. Втрати у первинній обмотці зумовлені струмом холостого ходу незначні, а тому ними можна знехтувати; у вторинній обмотці струм відсутній, а отже і втрати в ній. Тому споживається потужність на гістерезис і розсіювання, що і є втратами в сталі.

Розглянемо залежність втрат і ККД від навантаження трансформатора. Нехай  $P_1$  – потужність, що споживає трансформатор;  $P_2$  – потужність

навантаження на виході трансформатора – потужність підключених до нього споживачів. Тоді сумарні втрати потужності:

$$\Delta P = P_1 - P_2 = P_{CT} + P_{IM} + P_{2M} = P_{CT} + I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2$$

Коефіцієнт корисної дії трансформатора можна виразити через відношення:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P} = \frac{P_2}{P_2 + P_{CT} + P_{1M} + P_{2M}} = \frac{P_2}{P_2 + P_{CT} + I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2} = \frac{U_2 I_2 \cos \varphi_2}{U_2 I_2 \cos \varphi_2 + P_{CT} + I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2}$$

Введемо поняття ступеня завантаженості трансформатора

$$\beta = \frac{S_2}{S_{2H}} = \frac{I_2}{I_{2nom}} = \frac{I_1}{I_{1nom}}, \text{ де: } S_2 - \text{дійсне значення потужності; } S_{2H} - \text{номінальне}$$

значення потужності.

Причому  $S_2 = U_2 I_2$ , а  $\beta = \frac{U_2 I_2}{S_{2nom}}$ ,  $U_2 I_2 = \beta S_{2nom}$ . З урахуванням ступеня

завантаженості трансформатора, розрахуємо вираз для коефіцієнта корисної дії

(ККД):  $P = I_1 R_1$ ,  $\beta = \frac{I_1 R_1}{P_{1M}}$ ,  $I_1^2 R_1 = \beta P_{1M}$ ,  $I_2^2 R_2 = \beta P_{2M}$ ,

$$\eta = \frac{\beta S_{2nom} \cos \varphi_2}{\beta S_{2nom} \cos \varphi_2 + P_{XX} + \beta^2 P_{1M} + \beta^2 P_{2M}}$$

Де:  $S_H = U_{1H} I_{1H}$  - номінальна потужність трансформатора.

Аналіз виразу доводить, що ККД досягає максимальних значень при коефіцієнті завантаження  $\beta = 0,6$  тобто коли  $P_{CT} < P_M$  (рис. 5). Для потужних трансформаторів ККД складає близько 99%, а для малопотужних 50-75%.

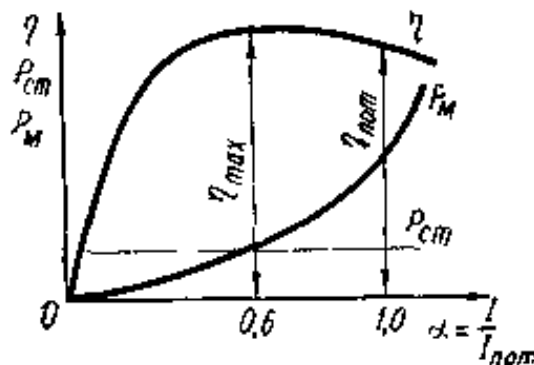


Рис. 5. Графік залежності ККД трансформатора від його завантаженості.

#### 4. Трифазні трансформатори

Трансформувати енергію трифазної системи можна двома способами: а) за допомогою трьох силових однофазних трансформаторів або одним трифазним. Другий спосіб вигідніший за рахунок того, що трифазний трансформатор легший, витрачається менше матеріалів і менший за габаритами від трьох однофазних.

Трифазний трансформатор – це система трьох однофазних силових трансформаторів із спільним магнітопроводом (рис. 6 а). Його обмотки можуть з'єднуватись зіркою або трикутником. Для зручності встановлені чотири різних варіанти (групи) з'єднання:  $Y/\Delta$ ;  $Y/Y$ ;  $\Delta/Y$ ;  $\Delta/\Delta$ .

З'єднання обмоток зіркою доцільно використовувати при високих напругах, т.я. лінійна напруга розподіляється на дві обмотки.

З'єднання обмоток трикутником потрібно виконувати при низьких напругах і великих струмах споживання, т.я. фазний струм менший від лінійного в  $\sqrt{3}$  разів.

Групи з'єднань обмоток трансформаторів мають свої позначення. Наприклад, однолінійне і багатолінійне зображення на електричних схемах, з'єднання обмоток трифазних трансформаторів «зірка» з виведеною нейтраллю – «трикутник» показано на рис. 6 б-г.

Різні групи з'єднань мають свої цифрові позначення, що відповідають принципу годинника. Хвилину стрілку годинника встановлюють на поділку 12 і з нею суміщають вектор лінійної напруги.

Маленьку стрілку, що вказує години, встановлюють за напрямом однойменного вектора вторинної обмотки. На рис. 7 зображені схеми з'єднання «зірка – зірка» та «зірка-трикутник» і відповідні позначення  $Y/Y_0$  ( $Y/Y_0 - 12$ ) та  $Y/\Delta - 11$ .

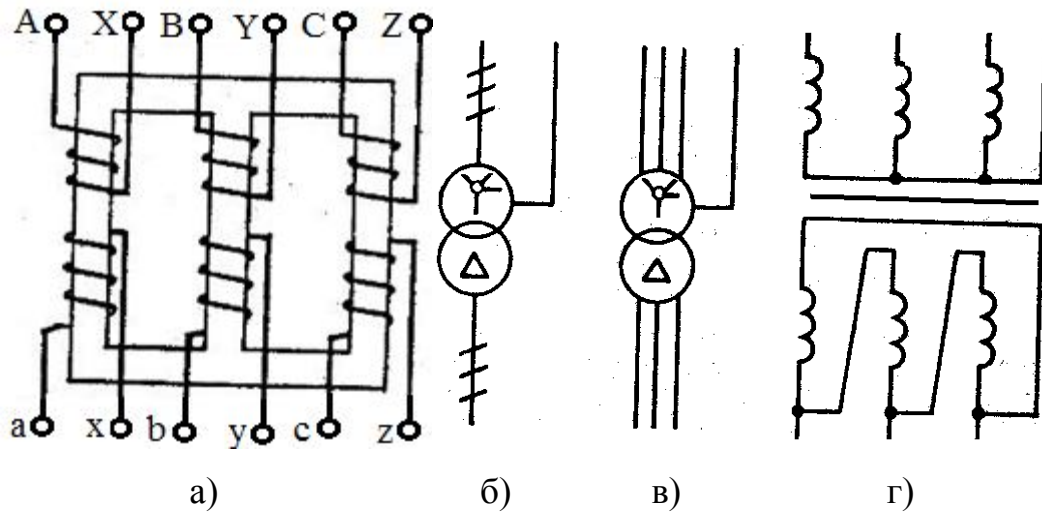


Рис. 6. Зображення трифазного трансформатора.

Важливим є питання паралельного вмикання трансформаторів до електромережі. На практиці всі трансформатори в ЛЕП працюють паралельно. Тому з'єднання трансформаторів на паралельну роботу має відповідати таким умовам:

1. Первинні і вторинні номінальні напруги трансформаторів повинні бути однаковими.
2. Коефіцієнти трансформації також однакові. Відмінність може складати не більше 0,5%.
3. Групи з'єднань обмоток трансформаторів однакові.
4. Напруги КЗ трансформаторів однакові (допускається відхилення до 10%).
5. Первинні і вторинні обмотки трансформаторів з'єднані однойменними фазами.

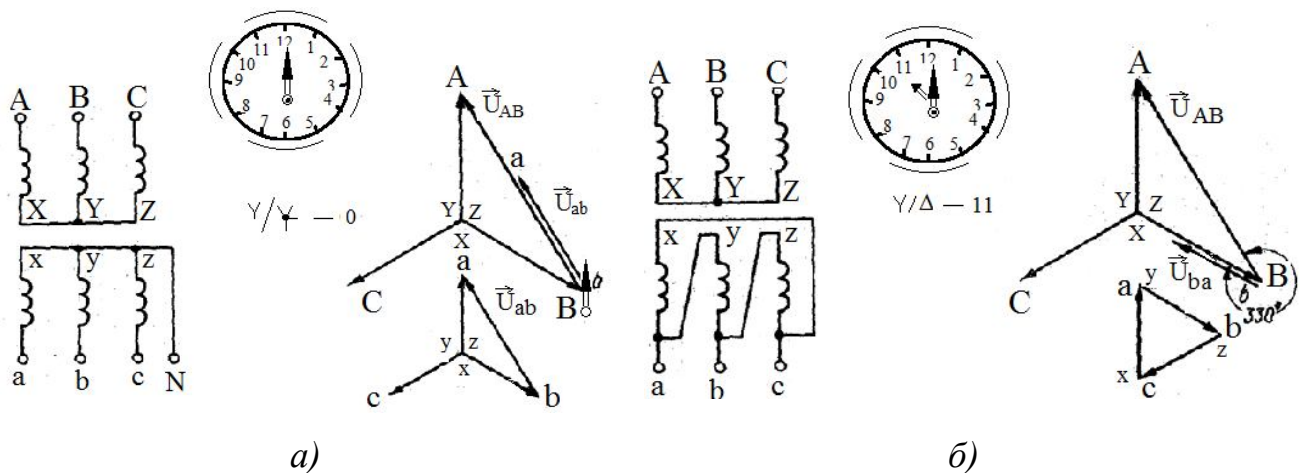


Рис. 7. Способи ввімкнення обмоток трифазного трансформатора:

а) зірка – зірка; б) зірка-трикутник.



## **Лекція 10. Асинхронні двигуни.**

1. Історія винаходу асинхронних двигунів.
2. Способи утворення обертового магнітного поля.
3. Будова та принцип дії асинхронних двигунів.
4. Класифікація та маркування двигунів.
5. Однофазні асинхронні двигуни.

### **Література:**

Л-1, с. 123-131. Л-2, с. 144 – 158.

### **1. Історія винаходу асинхронних двигунів.**

Серед сучасних машин змінного струму широко використовуються трифазні асинхронні електродвигуни внаслідок простоти їх будови та керування. Основними частинами такого двигуна є: статор, що має 3 котушки; ротор; підшипники та підшипникові кришки; повітряний нагнітач; клемний щиток.

Конструкцію такого двигуна вперше розробив М.О. Доліво-Добровольський у 1891 році. Його ще й досі зберігають у музеї політехнічного університету в Москві.

У 1824 р. вперше демонструвався дослід Араго, що полягав у обертанні мідного диска за обертанням постійного магніту. Пояснив це явище М. Фарадей лише в 1831 році, обертове магнітне поле індукує в диску вихрові струми. Останні взаємодіють з обертовим магнітним полем і диск починає обертатися.

У 1879 р. Бейбі замінив постійний магніт на обертове магнітне поле. Що утворюється однофазним змінним струмом, а у 1888 р. Доліво-Добровольський запропонував обертове магнітне поле, що утворюється трифазним магнітним струмом.

Чимало цьому сприяли роботи Нікола Тесла, Галілея Фераріса та ін.

Отже, принцип дії двигунів ґрунтується на використанні законів:

1. Механічної взаємодії струмів, який досліджував Ампер у 1821 р.
2. Електромагнітної індукції – досліджений Фарадеєм у 1831 р.

3. Теоретичного узагальнення цих явищ про напрям індуктивного струму, що здійснив Ленц у 1834 р.

## 2. Способи утворення обертового магнітного поля.

Принцип дії асинхронного двигуна пояснимо на моделі, зображеній на рис.

1. Магнітне поле, створене постійним магнітом, зосереджене між двома полюсами  $N$  та  $S$ . Воно перетинає провідну рамку, що може обертатися на осі. Вектор магнітної індукції  $\vec{B}$  направлений від північного полюса магніту до південного.

Якщо обертати постійний магніт, а отже вектор магнітної індукції  $\vec{B}$ , зі швидкістю  $n_1$  обертів за хвилину за годинниковою стрілкою, то поле перетинатиме обмотку ротора і індукуватиме в рамці ЕРС  $e = Blv \sin \alpha$ . Так як рамка є замкнутим контуром, то в ній протікатиме індукційний струм  $I_2$ .

Визначимо напрям протікання струму рамки. Згідно рис. 1, відносний рух рамки, тобто активних її провідників, протилежний до напрямку обертання магніту. Тобто рамка обертається відносно магніту проти годинникової стрілки. Тому, згідно правила правої руки, струм у верхній частині провідника рамки направлений до нас ( $\odot$ ), у нижньому провіднику рамки – від нас ( $\oplus$ ).

З фізики відомо, що на провідник зі струмом у магнітному полі діє сила Ампера  $F = BIl \sin \alpha$ . Застосувавши правило лівої руки, визначимо напрям діючої пари сил  $F_1$  і  $F_2$ , які виникають у наслідок дії магнітного поля на рамку зі струмом.

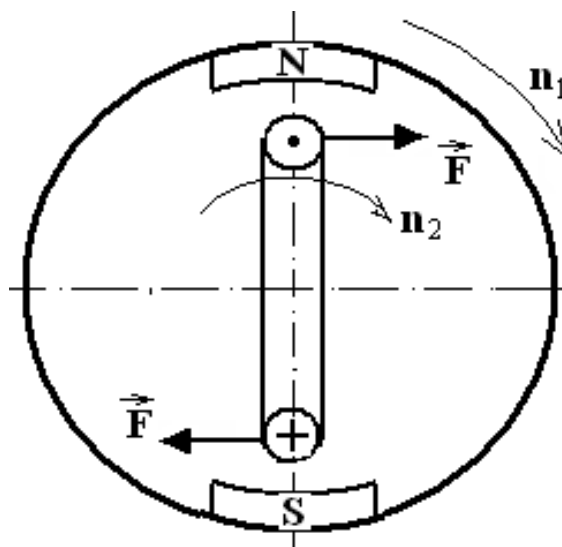


Рис. 1. Схема-модель до пояснення принципу дії асинхронного двигуна



На рис. 1 видно, що ці сили утворюють обертовий момент, що діє на рамку у напрямку обертання вектора магнітної індукції. Унаслідок дії пари сил рамка почне обертатися з частотою  $n_2$ . Якщо обертова рамка знаходиться в обертовому полі магніту, і швидкість їх обертання буде синхронною, то обертове поле не буде збуджувати ЕРС, індукційний струм не буде протікати, зникне й обертовий момент, що діяв на рамку. Отже, рамка обертається зі швидкістю  $n_2$ , дещо меншою від швидкості обертання поля магніту  $n_1$ . Тому двигуни, побудовані на такому принципі дії, називаються асинхронними.

Явище відставання рамки (ротора) від обертового поля (поля статора) називається ковзання і позначається літерою  $S$ .

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad \text{або в відсотках} \quad S = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \times 100\%$$

де  $n_1$  - частота обертового магнітного поля.

$n_2$  - частота обертання ротора.

Під час пуску  $n_2 = 0$ , тому  $S = 1$ .

При холостому ході  $n_2$  майже дорівнює  $n_1$ , тому ковзання дуже мале.

При номінальному навантаженні  $S_n = 2 - 6\%$ .

Залежно від значення ковзання асинхронна машина може працювати у трьох режимах: двигуна, генератора та електромагнітного гальма. У режимі двигуна ( $1 > S > 0$ ) машина перетворює електричну енергію в механічну. Ротор при ньому обертається асинхронно (повільніше магнітного поля) з такою частотою, щоб струми ротора взаємодіяли з обертовим магнітним полем статора, створювали обертовий магнітний момент, що зрівноважує гальмуючий момент від сил тертя та навантаження на валу  $n_1 > n_2$ .

У режимі генератора  $n_2 > n_1$ , машина перетворює механічну енергію в електричну. Ротор обертається у напрямі обертання магнітного поля статора з частотою більшою, ніж частота обертання поля, для цього треба прикласти обертовий момент до ротора.

У режимі електромагнітного гальма, при зміні ковзання від  $s = -1$  до  $s = 0$ , ротор змушений обертатися у напрямі, протилежному напрямку обертання

магнітного поля статора. У такому режимі значна частина енергії розсіюється в обмотках, витрачається на гістерезис та вихрові струми.

Отже, асинхронна машина, це машина, у якій створюється обертове магнітне поле, яке збуджує індуктивний струм у роторі, при цьому виникає механічний обертовий момент, при умові, що ротор обертається асинхронно, тобто з кутовою швидкістю, що відрізняється від кутової швидкості поля.

Звичайно в асинхронних двигунах немає “штучного” обертового магнітного поля. Воно створюється завдяки певному розташуванню обмоток статора і протіканню по них змінного електричного струму.

Розглянемо на простих прикладах, як створюється обертове магнітне поле. Нехай електричний струм у рамці змінюється за законом синусів  $i = I_{\max} \sin \omega t$ . Зобразимо схематично провідну рамку (котушку ротора) так, як би ми бачили її з торця (рис. 2). Позначимо початок обмотки літерою П, а кінець її – літерою К.

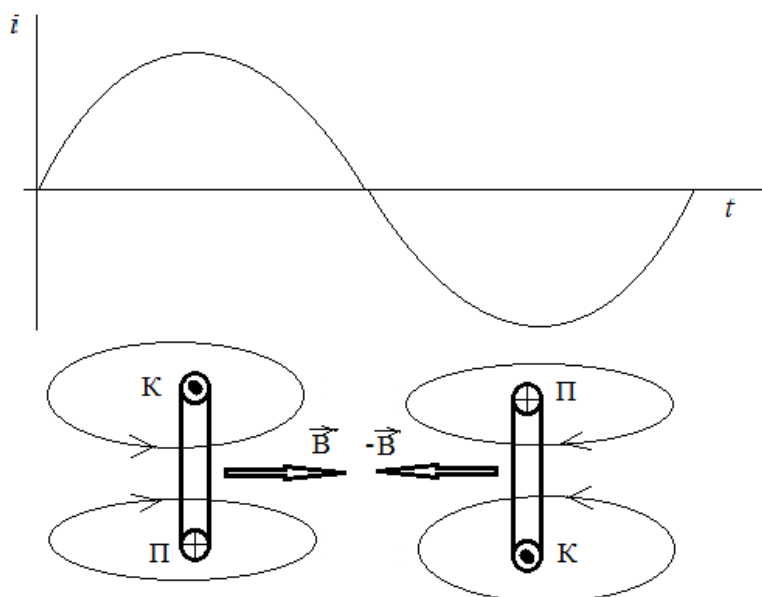


Рис. 2. До пояснення створення пульсуючого магнітного поля в рамці, і якій протікає змінний струм.

У верхній частині рамки перші півперіоду струм протікає від нас і позначається –  $\ominus$ , а в нижній частині струм протікає до нас і зображується позначкою –  $\otimes$ . Наступні півперіоду напрям струму зміниться на протилежний. Застосовуючи правило буравчика визначаємо вектор магнітної індукції. З рисунка видно, що при зміні напрямку сили струму (графік) вектор магнітної індукції змінює свій напрям на протилежний. Тобто, змінюючи напрям струму в рамці, можна отримати змінне пульсуюче магнітне поле (рис. 3).

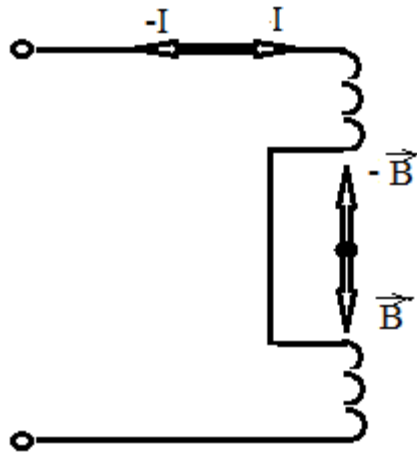


Рис. 3. Схематичне зображення процесу утворення обертового магнітного поля в котушці, в якій протікає однофазний змінний струм

Пояснити утворення обертового магнітного поля у двофазній системі можна за рис. 4. Розташуємо два соленоїди під кутом  $90^0$  один відносно одного. Пропустимо постійний струм, який збуджує магнітне поле навколо соленоїдів, напрям вектора індукції якого можна визначити за правилом буравчика. Напрямок струму через рівні проміжки часу змінюватимемо так, як це зображено на рисунку 4(а, б, в, г).

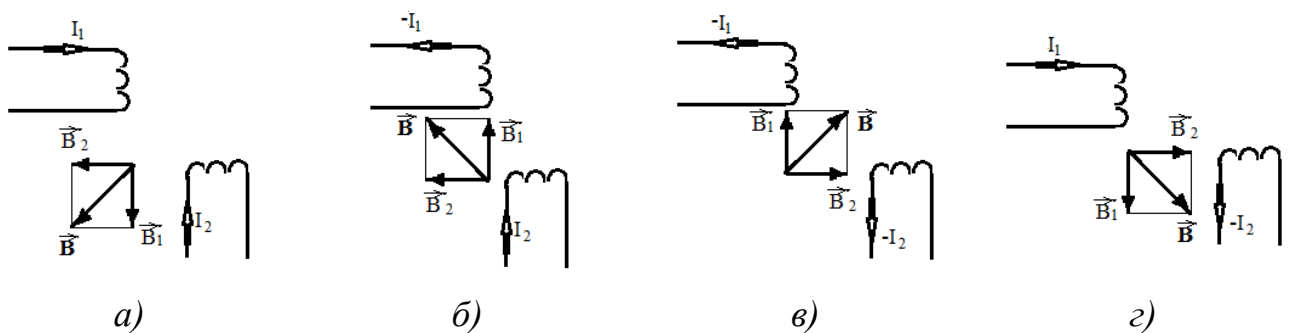


Рис. 4. Схематичне зображення процесу утворення обертового кола у двофазній системі.

З малюнка видно, що зміна напрямку струму призводить до зміни напрямків векторів магнітної індукції  $B_1$  та  $B_2$ , а отже і результуючого вектора магнітної індукції  $B$ . Тобто вектор індукції стрибкоподібно здійснив повний оберт навколо точки, що співпадає з центром на перетині осей соленоїдів.

Якщо в котушках протікає змінний «синусоїдний» струм, то вектори також будуть змінюватись за законами синуса та косинуса:

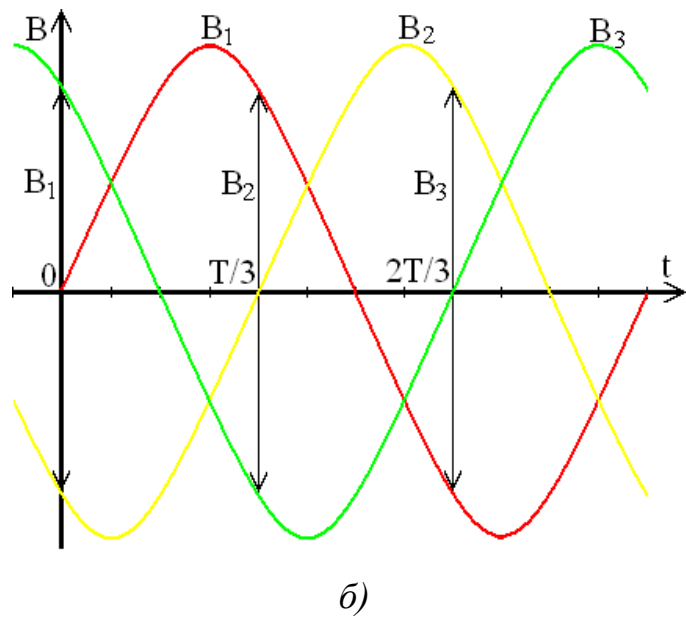
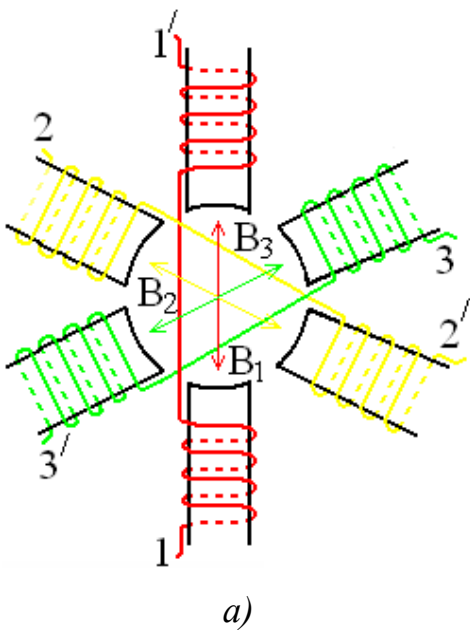
$$B_1 = B_m \sin \omega t; B_2 = B_m \cos \omega t .$$

Результуюче значення вектора магнітної індукції

$$B = \sqrt{B_1^2 + B_2^2} = \sqrt{B_m^2 \sin^2 \omega t + B_m^2 \cos^2 \omega t} = B_m.$$

Отже у двофазній системі, із двох перпендикулярно розташованих котушок, до яких підведена змінна напруга, рівномірно по колу обертається магнітне поле, вектор магнітної індукції якого -  $\vec{B}_m$ . Такого ж результату можна досягти, якщо початок однієї і кінець іншої котушок по різному комутувати, а джерело змінного струму взяти однофазне.

Обертове магнітне поле можна отримати в системі трьох котушок, розташованих під кутом  $120^\circ$  одна відносно одної (рис. 4). Дійсно, якщо котушки приєднати до трьохфазного джерела струму, що змінюється за законом синусів, то в них створюються магнітні поля, вектори індукції яких змінюються за тими ж законами, що й струми. Тому в кожній із котушок обмотки статора по черзі з відставанням на одну третю періоду (або відставанням за фазою у  $120^\circ$ ), утворюватиметься магнітне поле. Очевидно вектор індукції магнітного поля буде повертатися відносно осі статора з частотою змінної напруги.



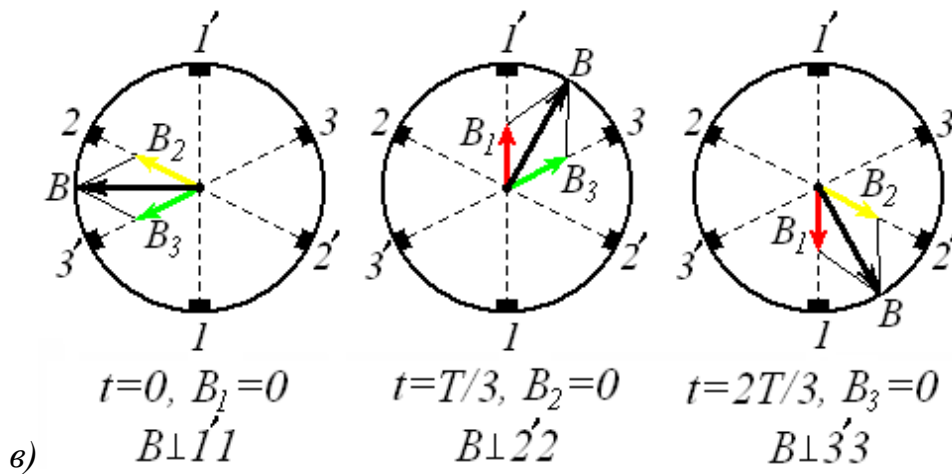
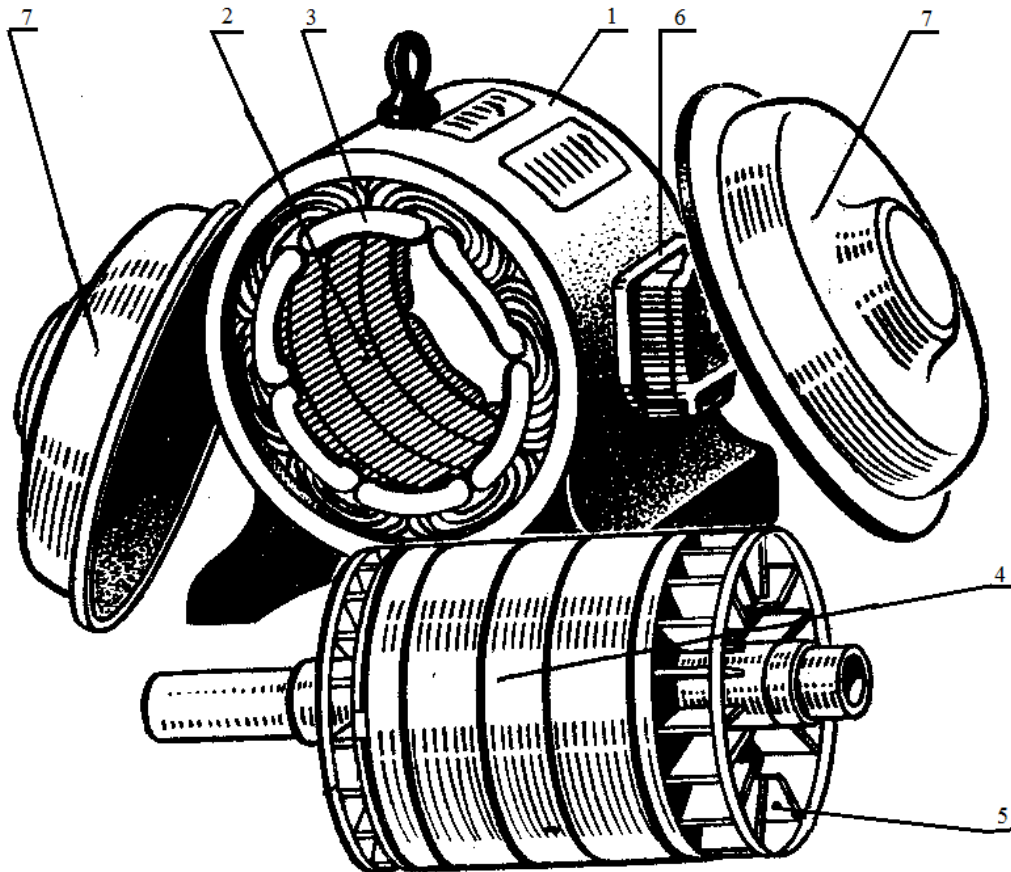


Рис. 5. Графічне зображення процесу створення обертового магнітного поля індукцією  $B$  у трифазній системі.

Так, для моментів часу  $t=0; t=\frac{T}{3}; t=\frac{2}{3}T; t=T$  вектор магнітної індукції здійснюватиме поворот за годинниковою стрілкою, як це зображено на рисунку 5 в. Для моментів часу  $t=0; t=\frac{T}{3}; t=\frac{2}{3}T; t=T$  вектор магнітної індукції здійснюватиме поворот за годинниковою стрілкою, як це зображено на рисунку. Такий принцип покладено в основу принципу дії трифазного асинхронного двигуна.

### 3. Будова та принцип дії асинхронних двигунів.

Асинхронний електричний двигун є однією з найпростіших електричних машин. Він складається із статора, ротора, підшипникових щитів і клемного щитка (рис. 6).



*Рис. 6. Основні складові асинхронного двигуна.*

Основними частинами статора є станина 1, магнітопровід циліндричної форми з пазами 2, в які запресовані три обмотки 3 під кутом  $120^{\circ}$ . До станини прикріплений клемний щиток 6, на який виведені шість кінців обмотки статора.

Ротор – обертова частина двигуна має форму циліндра 4, розташований в середині статора і опирається на підшипники, які впresовані в підшипникові щити 7. На валу ротора прикріплений вентилятор 5 для охолодження двигуна. За допомогою підшипникових щитів статор і ротор скріплені в одне ціле.

Призначення статора – створювати обертове магнітне поле машини завдяки обмотці, яка живиться від трифазної мережі; ротора – перетворювати електричну енергію, за рахунок індукування в ньому ЕРС, в механічну обертового руху.

За конструкцією ротора двигуни поділяють на трьохфазні з коротко замкнутим ротором типу «біляче колесо» (рис. 7,а) та фазним ротором (рис. 7,б).

Фазний ротор асинхронного двигуна являє собою, закріплений на осі, циліндр набраний з пластин електротехнічної сталі, у якому є пази для розташування обмоток. Обмотки ротора (рис. 7,б) з'єднують зіркою, кінці яких приєднують до мідних кілець, за допомогою яких подають напругу від графітних

щіток до обмоток. Такого типу ротори встановлюють у потужних двигунах для зменшення пускових струмів. У момент пуску пусковий реостат ПР вводять на максимальний опір, зменшуючи при цьому пусковий струм. Коли двигун виходить на номінальні оберти і потужність, то реостат виводять, замикаючи кінці обмоток «накоротко» і він працює як двигун з короткозамкненим ротором.

Є й іншого типу ротори - з короткозамкненою обмоткою (рис. 7,а). У них обмоткою є алюмінієві стержні, залиті в пази сталюого циліндра, замкнуті на торцях суцільним кільцем. Така обмотка має назву – коротко замкнена – типу «біляче колесо». Ротори з короткозамкненою обмоткою використовують у малопотужних двигунах.

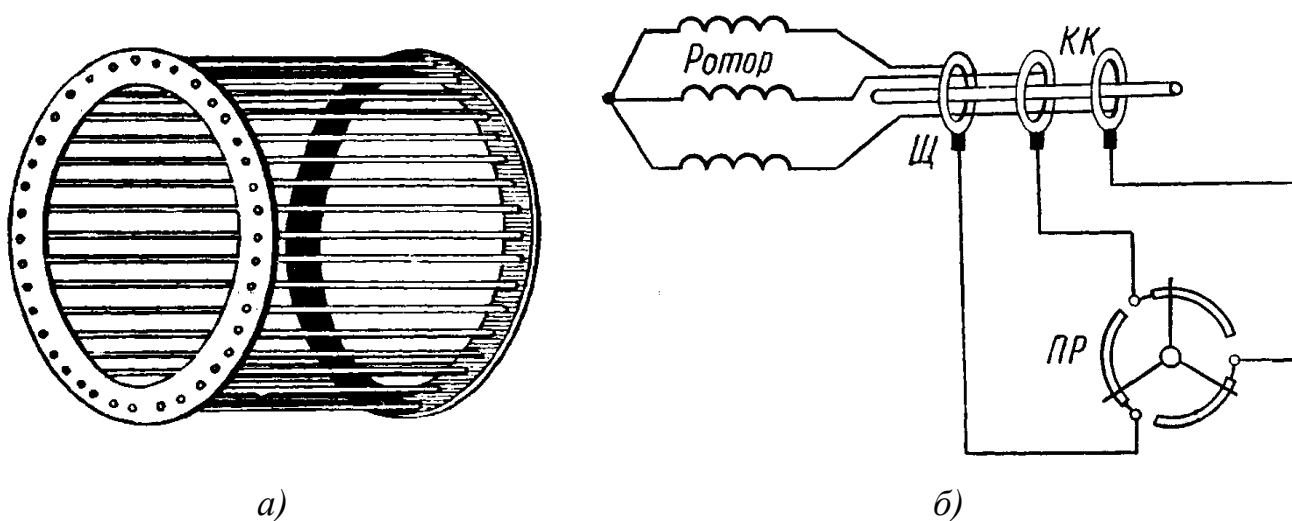


Рис. 7. Будова ротора асинхронного двигуна: а – «біляче колесо», б – фазний ротор з пусковим реостатом.

Статори всіх типів асинхронних двигунів майже однакові і складаються з таких деталей: корпусу; сталюого осердя з пазами для обмоток, що набирається із пластин електротехнічної сталі, ізолюваних між собою; обмотки, що вкладається в пази сталюого осердя.

Обмотки статора з'єднують «трикутником» або «зіркою» залежно від напруги в мережі, або в режимі пуску двигуна перемиканням з «зірки» на «трикутник».

Робота двигуна пояснюється на основі принципу дії попередньої моделі (рис.1). Обмотки статора створюють обертове магнітне поле, яке перетинає обмотку ротора. У ній індукується ЕРС, протікає індукційний струм ротора за рахунок того, що обмотка ротора замкнена. На обмотку ротора, по якій протікає

струм, з боку обертового магнітного поля діє сила ампера і змушує ротор обертатися.

### 5. Класифікація асинхронних двигунів.

1. Залежно від умов роботи асинхронні електродвигуни виготовляють різної конструкції: а) відкриті; б) захищені; в) закриті; г) вибухобезпечні. Умови роботи визначаються вологістю, вибуховою безпечністю тощо.

2. За потужністю їх поділяють на 4 групи: від 5 до 60 Вт, від 60 Вт до 100 кВт, від 100 до 1000 кВт та понад 1000 кВт.

3. Асинхронні двигуни виготовляють для живлення від мережі змінного струму різної величини напруги: 127 В, 220 В, 380 В, 600 В, 3,6 кВ та 10 кВ.

4. Залежно від кількості пар полюсів. Кількість пар полюсів визначає швидкість обертання ротора двигуна. Принципове пояснення залежності швидкості обертання ротора від числа пар полюсів можна проілюструвати на такому прикладі. Нехай ми маємо одну пару полюсів однофазного двигуна, зображеного схематично на малюнку 8, а, та двома парами полюсів – 8 б.

На рис. 8 а видно, що за час, коли в котушці напрям струму змінюється на протилежний (полюси магніту змінилися на протилежні), вектор магнітної індукції повернеться на кут. У випадку, коли статор має дві пари полюсів, то при зміні напрямку струму в котушках, а отже і полюсів на протилежні, ротор повернеться лише на кут  $\frac{\pi}{2}$ .

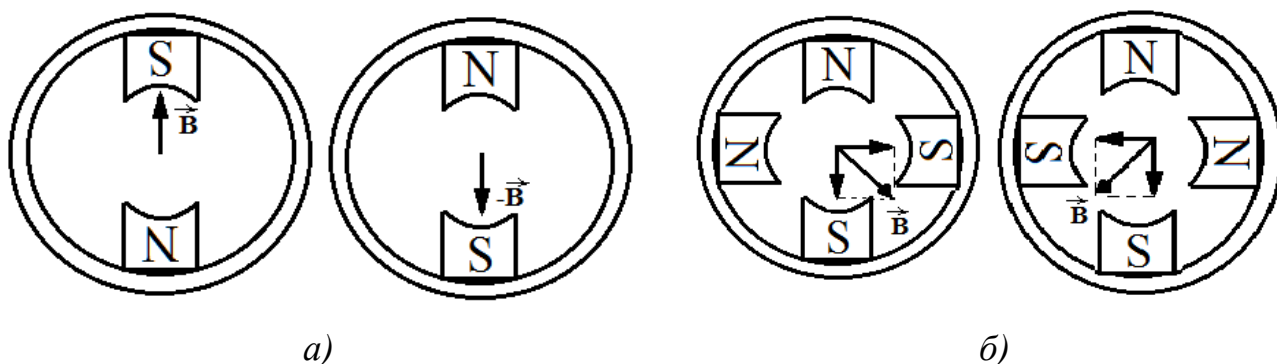


Рис. 8. До пояснення швидкості обертання магнітного поля:

а) – в однополюсному статорі; б) – у двополюсному статорі.

З рис. 8 слідує, що швидкість обертання магнітного поля статора залежить від кількості пар полюсів  $P$ . В асинхронних машинах кількість пар полюсів  $P$



може бути лише цілим числом (число котушок кратне трьом), тому частота обертання магнітного поля може мати не довільне, а певне значення:  $n_1 = \frac{60f}{p}$

Де  $f$  – частота струму в електромережі.

$p$  – число пар полюсів

$n_1$  – частота обертання магнітного поля.

Максимальна частота обертання вектора магнітної індукції  $n_1 = \frac{60 \cdot 50}{1} = 3000 \left(\frac{1}{c}\right)$ . В таблиці 1 наведені можливі частоти обертання магнітного поля статорів з різною кількістю полюсів.

Таблиця 1.

|       |      |      |      |     |     |     |     |     |     |
|-------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $P$   | 1    | 2    | 3    | 8   | 10  | 12  | 16  | 24  | 48  |
| $n_1$ | 3000 | 1500 | 1000 | 150 | 600 | 500 | 428 | 375 | 125 |

Звичайно, частота обертання ротора  $n_2$  нижча за частоту поля і залежить від ковзання:  $n_2 = n_1(1 - S)$

5. За способом з'єднання обмоток статора – з'єднання зіркою або трикутником (рис. 9).

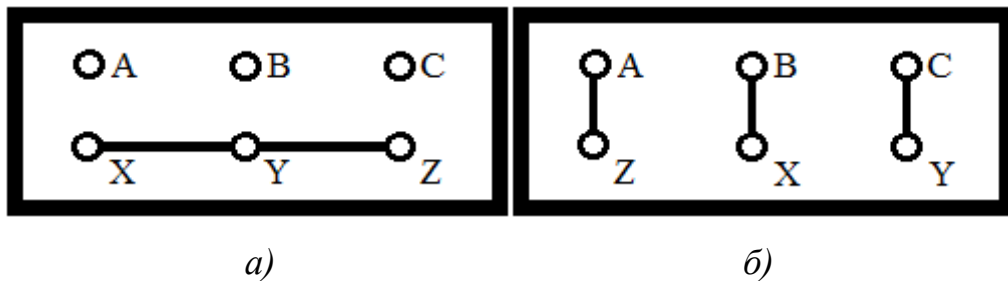


Рис. 9. З'єднання обмоток статора: а – зіркою, б – трикутником.

З'єднують обмотки статора трикутником або зіркою залежно від того, яка напруга в мережі, або в режимі пуску двигуна. Тобто, коли одні і ті ж споживачі з'єднують спочатку зіркою, а потім трикутником, то в першому випадку вони споживають потужність більшу у 3 рази ніж у другому, про що говорилося раніше.

## Лекція 11. Робота асинхронних двигунів та їх характеристики.

1. Режими роботи асинхронних двигунів.
2. Обертальний момент і основні характеристики асинхронних двигунів.
3. Пуск і реверсування.

### Література:

Л-1, с. 123-131. Л-2, с. 144 – 158.

### 1. Режими роботи асинхронного двигуна.

Двигун працює в режимі холостого ходу, якщо відсутнє корисне навантаження на його валу. Незначне навантаження, спричинене силою тертя підшипників та роботою вентилятора, при якому споживається двигуном малий струм  $I_0 = 0,2 - 0,4I_n$ . Де:  $I_0$  – сила струму холостого ходу;  $I_n$  – номінальне значення сили струму.

Для порівняння, у трансформаторах струм холостого ходу  $I_0 = (2,5\% - 10\%)I_n$ . Струм холостого ходу АД менший тому, що у них два повітряні зазори між статором та ротором, які чинять більший магнітний опір магнітному потокові, а в трансформаторах повітряних зазорів немає.

Якщо не враховувати так звані обмоткові коефіцієнти (у нашому випадку  $k_2 = 1; k_1 \approx 0,98$ ), що визначаються особливістю розташування обмоток статора (скороченого кроку), а отже зсувом фаз між ЕРС окремих секцій, то подібно до роботи трансформатора на холостому ході, діючі значення ЕРС у статорі  $E_1$  та роторі  $E_2$  при розімкненій обмотці ротора відповідно дорівнюють:

$$E_1 = 4,44f_1\omega_1\Phi_1;$$

$$E_2 = 4,44f_2\omega_2\Phi_2$$

Де:  $\omega_1$  та  $\omega_2$  - кількість витків у обмотках статора і ротора відповідно.

При нерухомому роторі частота струму  $f = f_1 = f_2 = \frac{pn_1}{60}$ . Тому попередні вирази запишемо так:

$$E_1 = 4,44f\omega_1\Phi;$$

$$E_2 = 4,44f\omega_2\Phi$$

Відношення цих виразів дає змогу вирахувати коефіцієнт трансформації асинхронного двигуна  $k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2}$ .

Отже, робота асинхронного двигуна в режимі ХХ з розімкненою обмоткою ротора аналогічна роботі трансформатора у такому ж режимі.

Тому робота двигуна в режимі холостого ходу чинить для мережі індуктивне (реактивне) навантаження, для якого коефіцієнт потужності  $\cos\varphi$  прямує до нуля.

У режимі навантаження створюється гальмівний момент механічних сил на валу асинхронного двигуна. Швидкість ротора при цьому зменшується, а частота обертового магнітного поля статора залишається сталою, рівною  $n_1 = \frac{f}{60p}$ . Тому швидкість обертового магнітного поля відносно ротора зростає.

При цьому зростає ЕРС, а отже і струм у роторі, що призводить до збільшення обертового магнітного моменту, який знову зрівноважується з механічним протидіючим моментом сил:  $M_{\text{мех}} = M_{\text{ел}}$

При обертанні ротора зі швидкістю  $n_2$  спостерігається його відставання від швидкості обертання магнітного поля  $n_1$  на величину  $n_1 - n_2$ . Відношення різниці швидкостей до швидкості обертання магнітного поля статора називають ковзанням:

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (1)$$

З цього виразу швидкість обертання ротора  $n_2 = n_1 - Sn_1 = n_1(1 - S)$ . (2)

Швидкість обертання магнітного поля статора відносно рухомого ротора  $n = n_1 - n_2 = n_1 - n_1(1 - S) = n_1S$ . Отже  $n = n_1S$ . (3)

Сила струму статора змінюється з такою ж частотою, що і напруга в електромережі, проте в роторі частота змінного струму  $I_2$  дорівнює частоті обертання поля навколо нього:  $f_2 = \frac{pn}{60}$ .

Підставимо вираз 3 в останнє рівняння:  $f_2 = \frac{pn_1}{60} S = f_1 S$ . Отже,

$$f_2 = f_1 S. \quad (4)$$

Струм  $I_2$ , що протікає у роторі і змінюється з частотою  $f_2$ , створює магнітний потік  $\Phi_2$ . Магнітний потік обертається відносно ротора з швидкістю

$$n'_2 = \frac{60f_2}{p} = \frac{60f_1 S}{p} = n_1 S \quad (5)$$

Але ротор теж обертається відносно статора з швидкістю  $n_2$ , тому швидкість обертання поля ротора відносно статора

$$n''_2 = n'_2 + n_2 = n_1 S + n_1 - n_1 S = n_1$$

Отже, потік  $\Phi_2$  обертається відносно статора з швидкістю  $n_1$ , як і потік  $\Phi_1$ .

В дійсності в асинхронних двигунах діє один сумарний магнітний потік  $\vec{\Phi} = \vec{\Phi}_1 + \vec{\Phi}_2$ .

Значення ЕРС для статора, як відзначалося раніше,  $U_1 = E_1 = 4,44f\omega_1\Phi$ . Тому, якщо живити двигун напругою мережі, діюче значення якої  $U_1$  стабільне, то й магнітний потік буде незмінний і не залежатиме від навантаження. Отже  $\vec{\Phi}_0 = \vec{\Phi}_1 + \vec{\Phi}_2$ . Тобто магнітний потік двигуна при холостому ході з короткозамкненим ротором  $-\Phi_0$  рівний сумі магнітних потоків статора  $\Phi_1$  і ротора  $\Phi_2$ , а намагнічуюча сила статора, в такому режимі роботи двигуна, дорівнює сумі намагнічуючих сил статора і ротора при навантаженні:  $I_0\omega_0 = I_1\omega_1 + I_2\omega_2$ . Звідки:  $I_1 = I_0 + (-I_2 \cdot \frac{\omega_2}{\omega_1})$ . Позначимо вираз у дужках через  $I'_2 = I_2 \frac{\omega_2}{\omega_1}$  і отримаємо струм ротора приведений до струму статора.

Отже  $I_1 = I_0 + (-I'_2)$ . Тобто струм, що споживає двигун, дорівнює геометричній сумі струму холостого ходу та струму ротора приведенного до струму статора з оберненим знаком. З останнього виразу слідує, що чим більше навантаження на валу двигуна, тим більший струм споживає двигун з електромережі (рівняння саморегулювання асинхронного двигуна).

Якщо ротор загальмувати, то в ньому виникне електрорушійна сила:

$$E'_2 = 4,44k_{\text{об2}}f_2\omega_2\Phi = 4,44k_{\text{об2}}f_1S\omega_2\Phi_1 = sE_2.$$

У такому режимі роботи двигуна ковзання  $S = 1$ , частота струму в статорі і роторі однакові і дорівнюють частоті напруги в мережі  $f_1 = f_2 = 50 \text{Гц}$ , а електрорушійна сила в роторі дорівнюватиме електрорушійній силі ротора зведеної до обмотки статора  $E_2 = E'_2$ .

При не навантаженому роторі його частота обертання наближається до частоти обертового поля  $n_1 \approx n_2$ , ковзання  $S \approx 0$ , електрорушійна сила в роторі прямує до нуля і змінюється з частотою  $f_2 = f_1 S \leq 0,5 \text{Гц}$ .

При навантаженому роторі ковзання досягає свого номінального значення  $S = (2-6)\%$ , а частота струму  $f_2 = (1-2,5) \text{Гц}$ . Величина електрорушійної сили, зведеної до обмотки статора  $E'_2 = 4,44 k_{\text{об2}} f_2 \omega_2 \Phi = 4,44 k_{\text{об2}} f_1 S \omega_2 \Phi_1 = s E_2$ .

$$E'_2 = s E_2$$

Потік розсіювання в роторі  $\Phi_{p2}$ , перетинаючи витки ротора, наводить в ньому ЕРС розсіювання  $E_{p2}$ .

Другий закон Кірхгофа для обмотки ротора запишеться так  $E'_2 = I'_2 R_2 + I'_2 X'_2$ , де  $I'_2, X'_2$  - струм та індуктивний опір ротора приведені до обмотки статора. До того ж індуктивний опір ротора  $X'_2 = 2\pi f_2 L_2 = 2\pi f_1 S L_2 = X_2 S$ .

За законом Ома можна визначити силу струму ротора приведену до обмотки статора  $I'_2 = \frac{E'_2}{Z'_2} = \frac{s E_2}{\sqrt{R_2^2 + (s X_2)^2}}$ .

Проаналізуємо за допомогою векторної діаграми (рис. 1), як змінюється кут зсуву фаз між споживаною напругою та струмом, якщо споживаний струм  $I'_2$  зростає, або як залежить коефіцієнт потужності асинхронного двигуна від величини його навантаження.

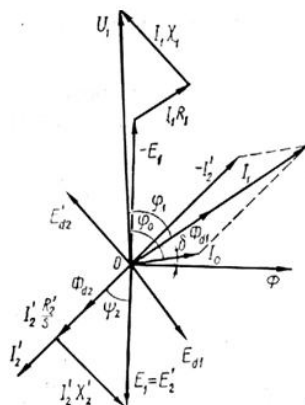


Рис. 1. Векторна діаграма навантаженого АД.

Векторну діаграму будують у такій послідовності:

1. За основу беремо магнітний потік, що пронизує обмотки статора і ротора.
2. ЕРС статора і ротора відстають від магнітного потоку на кут  $90^0$ .
3. При розімкненому роторі струм холостого ходу  $I_0$  випереджає магнітний потік  $\Phi$  на кут  $\delta$ .
4. Струм ротора  $I_2$  відстає від приведеної ЕРС ротора до електрорушійної сили статора  $E_2'$  на кут  $\psi_2$ .
5. Потік розсіювання  $\Phi_{d2}$  співпадає зі струмом ротора  $I_2$  і створює ЕРС розсіювання  $E_{d2}'$ , що відстає від потоку розсіювання на кут  $90^0$ . Електрорушійна сила розсіювання короткозамкненого ротора, чисельно рівна спаду напруги на його реактивному опорі  $E_{d2} = -I_2 X_2'$  і співпадає за напрямом зі струмом ротора.
6. Спад напруги на активному опорі ротора дорівнює добутку  $I_2 R_2$  і теж співпадає за напрямом зі струмом ротора.
7. При короткозамкненому роторі спад напруги на зовнішній ділянці кола дорівнює нулю. У цьому випадку другий закон Кірхгофа запишеться у такій формі  $\vec{E}_2' = \vec{I}_2 R_2 + \vec{I}_2 X_2'$ . На діаграмі відкладаємо ці вектори так як показано на рисунку.
8. На основі принципу саморегулювання двигуна запишемо значення струму в статорі  $I_1 = I_0 + (-I_2')$ .
9. Запишемо другий закон Кірхгофа для обмотки статора:  $U_1 = -E_1 + I_1 R_1 + I_1 X_1$ . На векторній діаграмі будуємо ці вектори у такій послідовності: спад напруги на активному опорі  $I_1 R_1$  проводимо паралельно до вектора струму в обмотці статора  $I_1$ ; реактивну напругу  $I_1 X_1$  відкладаємо з початку вектора активної напруги під кутом  $90^0$  до нього; сполучивши початок вектора  $-E_1$  з кінцем вектора реактивної напруги  $I_1 X_1$ , отримаємо вектор напруги обмотки статора  $U_1$ .

На основі векторної діаграми можна зробити такі висновки:

- при збільшенні навантаження, а отже і ковзання, зростає струм в обмотці ротора  $I_2$ , що призводить до зростання споживаного струму  $I_1$ ;
- при зростанні навантаження кут  $\varphi$  зменшується, а отже коефіцієнт потужності  $\cos \varphi$  зростає;
- у процесі зростання навантаження механічний обертовий момент переважає електромагнітний, швидкість обертання ротора зменшується, а тому зростає ковзання. При цьому струм ротора зростає збільшуючи магнітний потік  $\Phi_2$ , який у свою чергу направлений проти магнітного потоку статора. Тобто відбувається розмагнічування статора, при якому зменшується його індуктивний опір. Отже в статорі автоматично зростає струм, що споживається з електромережі, так як  $I_1 = \frac{U_1 - E_1}{Z_1}$ . Струм у первинній обмотці зростатиме до тих пір поки сумарний магнітний потік не досягне свого попереднього номінального значення, якого він досягав при холостому ході  $\vec{\Phi} = \vec{\Phi}_1 + \vec{\Phi}_2$ .

## 2. Обертальний момент асинхронного двигуна

Механічне навантаження на валу двигуна дорівнює потужності на шківу:

$$P = 2Fv = 2F \frac{\pi D}{T} = FD \cdot \frac{2\pi}{T} = M \frac{2\pi n}{60} = M\Omega \quad (6)$$

Де:  $F$  – сила, що діє на шків вала двигуна;  $v$  – лінійна швидкість;  $\Omega$  – кутова швидкість;  $T$  – період обертання вала;  $M$  – механічний момент сили на валу;  $n$  – число обертів ротора за секунду;  $P$  – потужність у ватах (Вт).

З виразу 6 визначимо величину обертового моменту:

$$M = 10^3 \frac{60}{2\pi} \cdot \frac{P}{n} = 9550 \frac{P}{n} \left( \frac{\text{кВт}}{\frac{\text{об}}{\text{хв}}} \right); \quad \boxed{M = 9550 \frac{P}{n}}$$

Очевидно механічна потужність на шківу зрівноважується з потужністю електромагнітною, що розвивається за рахунок спожитої двигуном електричної енергії.

$$\text{Тобто, електрична потужність двигуна } P_{\text{ел}} = E_2 I_2 \cos \varphi = E_2 I_2 \frac{r}{Z} \quad (8)$$

Де:  $E_2$  – ЕРС що індукується в роторі;

$I_2$  – сила струму в роторі;

$r$  – активний опір ротора;

$Z$  – повний опір ротора.

Якщо знехтувати обмотковим коефіцієнтом  $k_{062}$ , то електрорушійну силу, у свою чергу, можна виразити рівнянням ЕРС:

$$E_2 = 4,44N_2f_2\Phi_{\max} \quad (9)$$

Частоту струму в роторі виразимо через частоту струму в електромережі:

$$f_2 = f_1S = \frac{f_0}{p}S \quad (10)$$

Де:  $f_1$  – частота обертання магнітного поля статора;

$f_2$  – частота обертання магнітного поля ротора;

$f_0$  – частота струму в мережі;

$N_2$  – число витків обмотки ротора;

$p$  – число пар полюсів статора;

$\Phi_{\max}$  магнітний потік у магнітопроводі статора.

Підставимо рівняння 4 і 5 в рівняння 3, при цьому отримаємо значення потужності:  $P_{el} = 4,44N_2 \frac{f_0}{p} S \Phi_{\max} I_2 \frac{r}{Z} = \frac{4,44N_2 f_0 S r}{p} \cdot \frac{\Phi_{\max} I_2}{Z}$ .

Постійні величини позначимо константою  $C$ :  $C = \frac{4,44N_2 f_0 S r}{p}$ .

В режимі роботи навантаженого двигуна механічний та електромагнітний моменти і потужності зрівнюються. Тобто  $P_{el} = P$ ;  $M_{el} = M$ . Тому електромагнітний момент, подібно до механічного обертового моменту, виразиться формулою:

$$M_{el} = \frac{P_{el}}{\Omega_1 S}, \text{ або } \boxed{M_{el} = C' \cdot \frac{\Phi_{\max} I_2}{Z}}$$

Електромагнітний момент, що діє на ротор асинхронного двигуна  $M_e = C\Phi I_{a2}$

Де:  $C^1$  – стала величина;

$\Phi_{\max}$  – магнітний потік машини;

$I_2$  - активна складова сили струму в обмотці ротора.

Очевидно, що струм ротора залежить від швидкості його обертання, а отже від ковзання.

На графіку (рис. 2) зображено механічну характеристику асинхронного



двигуна, яка відображає залежність обертового моменту двигуна від ковзання  $M = f(S)$ .

Максимальний електромагнітний момент  $M_{\max}$  ділить графік на дві частини: стійкий та нестійкий режими. Стійким вважається такий режим, який відповідає ковзанню, що лежить в межах від 0 до критичного його значення –  $S_{кр}$ .

Нестійким буде режим роботи двигуна для ковзання від пускового його значення  $S = 1$ , до критичного –  $S_{кр}$ .

З графіка видно, що в режимі стійкої рівноваги при збільшенні ковзання електромагнітний момент зростає. Пояснити це явище можна наступним чином. Збільшення механічного навантаження на валу двигуна призведе до зростання ковзання  $S = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$  за рахунок зменшення частоти обертання ротора  $n_2$ . При цьому збільшиться частота обертання магнітного потоку статора  $n_1$  відносно обмотки ротора, що призведе до збільшення ЕРС ротора:  $E_{рот} = -\frac{d\Phi}{dt} \cdot N$ , де:  $N$  – кількість витків обмотки ротора;  $\frac{d\Phi}{dt}$  – швидкість зміни магнітного потоку статора відносно ротора.

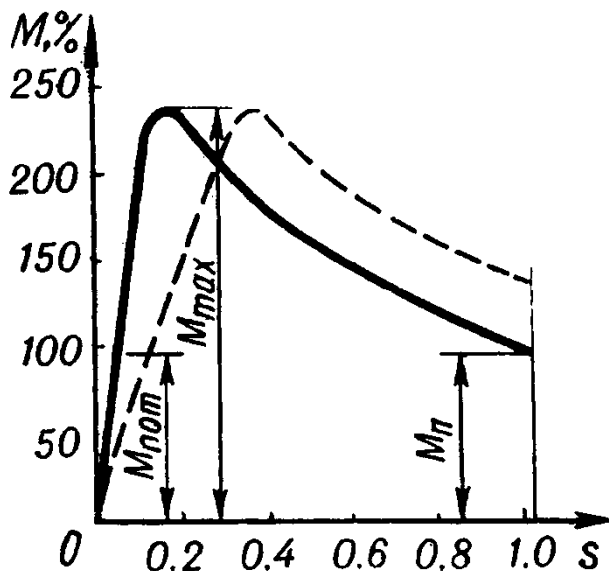


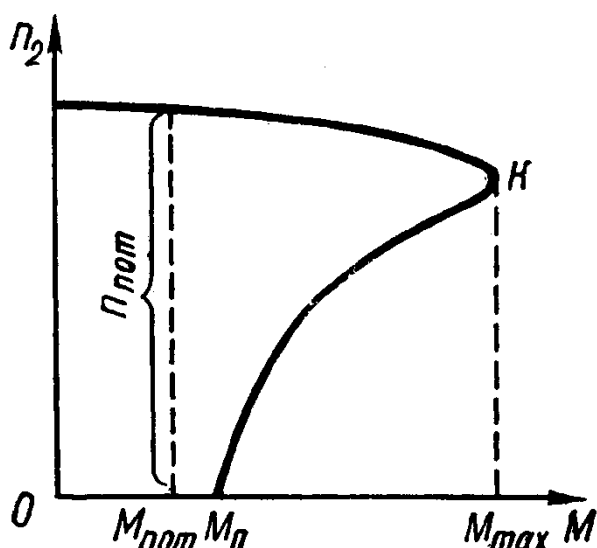
Рис. 2. Механічна характеристика асинхронного двигуна

В обмотці ротора зросте сила струму  $I_2$ , а отже й електромагнітний момент на валу двигуна:  $M_{ев} = C' \frac{\Phi I_2}{Z}$ . Обертальний момент збільшується до тих пір, поки не зрівноважиться з механічним моментом на валу.

Збільшення механічного навантаження можливе до величини, що не перевищує максимальне значення електромагнітного обертового моменту. Дійсно, якщо ковзання перевищить максимальне його значення, то частота струму в роторі сягне великих значень, що викличе зростання індуктивного опору обмотки ротора  $X_L = \omega L$ . Очевидно, великий опір обмотки ротора знизить електричний струм у ньому, а отже обертовий момент зменшиться. Електромагнітний момент досягне свого мінімального пускового значення  $M_{\text{мех}} = M_{\text{пуск}}$ , при якому двигун зупиниться.

Якщо графік, що зображено на рисунку 2, повернути на кут  $90^\circ$ , то ми отримаємо інший графік залежності швидкості обертання ротора від величини навантаження асинхронного двигуна (рис. 3), а отже й електромагнітного моменту, що його зрівноважує.

Графік можна розділити на дві частини. Верхня лінія відображає графік стійкого, а нижня – нестійкого режимів його роботи. Для стійкої частини графіка справджується принцип саморегулювання двигуна. При збільшенні навантаження, швидкість ротора дещо зменшується, ковзання збільшується, зростає струм ротора, а отже і обертовий момент, настає рівновага обертових моментів: механічного та електромагнітного, але при дещо менших обертах.



*Рис. 3. Графік залежності швидкості обертання ротора від величини навантаження на валу.*

Саморегулювання діятиме до моменту досягнення критичної точки К, при якому обертовий момент машини досягне максимального значення  $M_{\text{max}}$ . Як і в попередньому випадку, при збільшенні ковзання до межі критичного значення, різко зростатиме реактивний опір ротора, завдяки зростанню частоти магнітного

поток, що перетинає його обмотку, а отже зменшення коефіцієнта потужності  $\cos \varphi_2$ . У таких умовах двигун зупиняється.

Робочі характеристики асинхронного двигуна відображені на рис. 4.

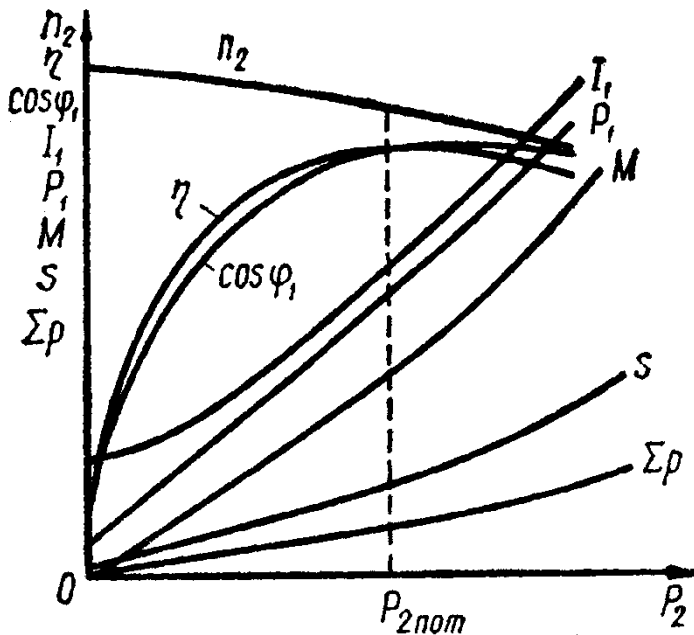


Рис. 4. Робочі характеристики асинхронного двигуна.

Основні робочі характеристики асинхронного двигуна відображають залежність окремих його параметрів від корисної потужності на валу. Зокрема це стосується таких параметрів як:

- $P_1$  – загальна споживана електродвигуном потужність з електромережі;
- $M$  – обертальний момент ротора двигуна;
- $n_2$  – швидкість обертання ротора;
- $\eta$  – коефіцієнт корисної дії двигуна;
- $\cos \varphi$  – коефіцієнт потужності;
- $I_1$  – сила струму в обмотці статора;
- $S$  – ковзання.

### 3. Пуск та реверсування асинхронних електродвигунів

Найпростіший спосіб пуску електродвигуна – це пряме ввімкнення його в електромережу (рис. 5, а). Проте цей спосіб не вигідний тим, що пусковий струм, як відомо, сягає великих значень  $I_{\text{пуск}} = (4 - 7)I_{\text{ном}}$ .

Тому для пуску асинхронних двигунів великої потужності – понад 20кВт, використовують інші способи. Наприклад, перемиканням обмоток статора із зірки

на трикутник, що зображено на рис. 5 б та за допомогою пускового реостата (рис. 5 в).

У двигунах з фазним ротором ввімкнення здійснюють за допомогою пускових реостатів автоматично або в ручному режимі, поступово збільшуючи силу струму в обмотці роторі (рис. 5 в).

Реверсування двигунів здійснюється шляхом зміни фаз на кінцях любых двох обмоток статора.

Переваги: надійні; мають просту будову; прості в керуванні; мають високий ККД; низька собівартість; великий пусковий момент.

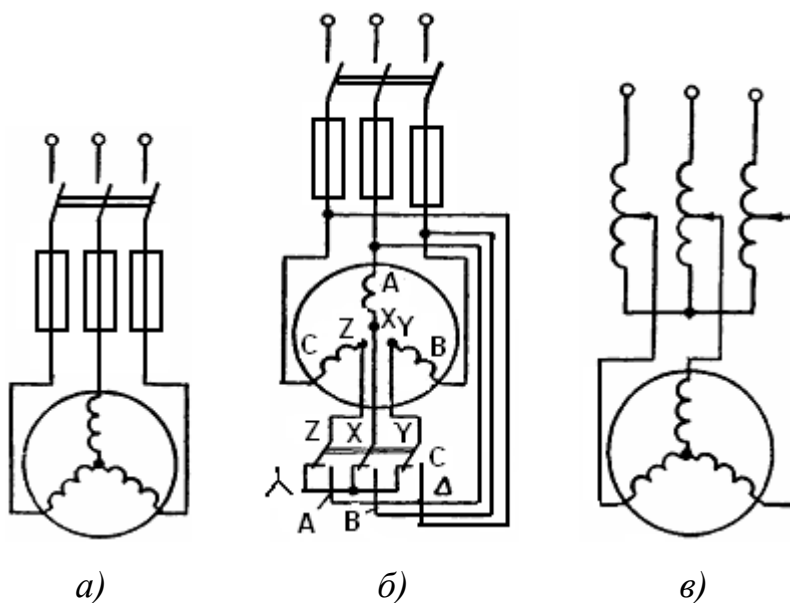


Рис. 5. Способи пуску трифазних асинхронних двигунів.

Недоліки: великий пусковий струм; малий  $\cos \varphi$  при недовантаженні; не регулюється швидкість обертання; залежність обертового моменту від напруги живлення.

## Лекція 12 Однофазні асинхронні двигуни.

1. Принцип дії однофазних асинхронних двигунів
2. Способи увімкнення та пуску однофазних двигунів
3. Способи увімкнення трифазних двигунів до однофазної мережі.

### Література:

Л-1, с. 123-131. Л-2, с. 144 – 158.

### 1. Принцип дії однофазних асинхронних двигунів

У малопотужних електроприводах – побутових електромеханічних машинах – широко застосовують однофазні асинхронні двигуни. Вони мають невеликий коефіцієнт корисної дії  $\eta$ , низький коефіцієнт потужності  $\cos \varphi$ , а тому їх випускають малої потужності (не більше 1-2 кВт).

Статор такого двигуна має однофазну обмотку та ротор такої ж конструкції, як і в трифазних.

Основним недоліком однофазних асинхронних двигунів є те, що вони не мають свого пускового моменту. Пояснюється це тим, що вектор магнітного потоку, який створюється однією обмоткою двигуна буде змінюватись уздовж однієї лінії в межах амплітудних значень (від  $+\vec{\Phi}$  до  $-\vec{\Phi}$ ). Так як змінний струм в електромережі має частоту 50 Гц., то на стержні “білячого колеса” ротора напрям сили через кожні півперіоду змінюватиме свій напрям. У такому випадку ротор обертається не буде.

Проте, якщо ротору надати попередньо обертового руху, то під дією електромагнітних сил він продовжуватиме обертатися. Для запуску однофазних асинхронних двигунів застосовують різні пускові пристрої: пускову обмотку, розщеплення магнітного потоку полюсів та інші способи.

Принцип дії таких двигунів можна пояснити, використавши такий прийом, як розщеплення пульсуючого магнітного потоку на два магнітних потоки, що обертаються назустріч один одному (рис. 1).

Магнітний потік  $\vec{\Phi}$ , що змінюється по ординаті від  $+\vec{\Phi}_{\max}$  до 0 і далі від 0 до  $-\vec{\Phi}_{\max}$  можна розглядати в кожний момент часу, як сума двох потоків  $\vec{\Phi}_1; \vec{\Phi}_2$ , що

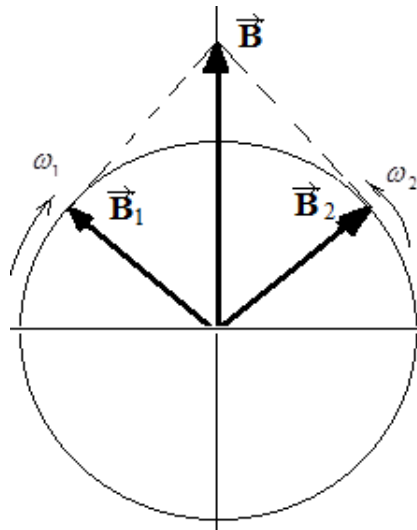
обертаються один на зустріч іншому.

Таким чином, в дійсності в кожний момент часу існує потік  $\vec{\Phi}$  – який дорівнює геометричній сумі прямого та зустрічних потоків.

$$\vec{\Phi} = \vec{\Phi}_1 + \vec{\Phi}_2$$

При цьому проєкції обертових потоків рівні за величиною половині дійсного потоку.

$$\vec{\Phi}_1 = \vec{\Phi}_2 = \frac{\vec{\Phi}}{2}$$



*Рис. 1. Модель розчеплення пульсуючого магнітного потоку на два магнітних потоки, що обертаються назустріч один одному.*

Кожний з них створює ЕРС, внаслідок чого виникають струми  $I_1$  та  $I_2$ . Взаємодія струму ротора з потоками  $\phi_1$  та  $\phi_2$  створюють механічні моменти  $M_1$  та  $M_2$ . До того ж обертові моменти рівні за величиною  $M_1 = M_2$  і направлені в протилежні сторони. Ротор у цьому випадку не обертається, а лише тремтить.

Якщо ж створити додатковий момент, почати обертати ротор, то він буде продовжувати обертатися і може виконувати роботу подібно трифазним двигунам.

Це явище пояснюється так: нехай швидкість обертання магнітних потоків  $\Phi_1$  та  $\Phi_2$  дорівнює  $n_1$ , а швидкість пуску ротора –  $n_2$ .

Тоді швидкість прямого потоку  $\Phi_1$ , відносно ротора дорівнює  $n' = n_1 - n_2 = n_1 - n_1 + n_1 S = n_1 S$ , а швидкість зустрічного потоку відносно ротора:

$$n'' = n_1 + n_2 = n_1 + n_1 - n_1 S = n_1(2 - S)$$

Частота струму, що збуджуються від прямого потоку  $\Phi_1$  :

$$f_1 = \frac{Pn'}{60} = \frac{Pn_1}{60} \cdot S = f \cdot S .$$

Частота струму, що збуджується зворотнім потоком:

$$f_2 = \frac{Pn''}{60} = \frac{Pn_1}{60} (2 - S) = f(2 - S)$$

Якщо частота в струмі статора  $f=50$  Гц при ковзанні  $S=0,02$ , то  $I_1$  змінюється з частотою – 1 Гц, а струм  $I_2$  змінюється з частотою – 99 Гц.

Тому струму з більшою частотою ротор чинить більший опір. Тобто  $I_2$  зазнає більшого опору ніж струм  $I_1$ , тому  $I_1 > I_2$ , а отже й  $M_1 > M_2$ , завдяки чому ротор продовжує обертатися у напрямку його попереднього прокручування.

## 2. Способи увімкнення та пуску однофазних двигунів

Для пуску ротора встановлюють додатково до робочої спеціальну пускову обмотку ПО, зсунуту просторово на кут  $90^0$ . До того ж струм, що наводиться у пусковій обмотці завдяки трансформаторному зв'язку з робочою, також зсунутий за фазою на  $\frac{\pi}{2}$ . При короткочасному вмиканні робочої обмотки в статорі утворюється обертове магнітне поле, яке створює обертовий механічний момент. Після розкручування ротора пускова обмотка в окремих двигунах вимикається (рис. 2 а).

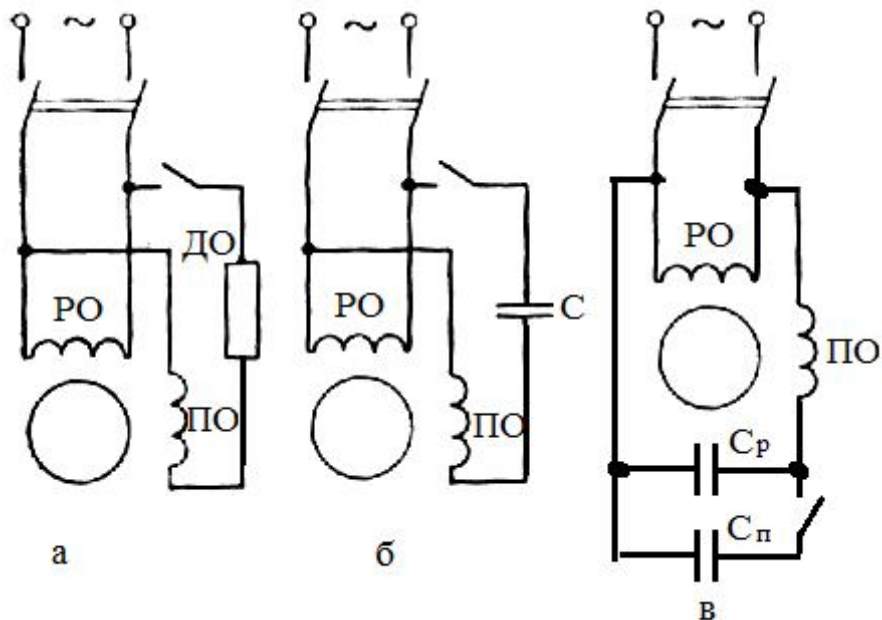


Рис. 2. Способи буску однофазних двигунів.

У деяких двигунах пускова обмотка вмикається під час пуску послідовно з конденсатором, що спричиняє зсув за фазою струму в пусковій обмотці відносно струму у робочій обмотці, а це зумовлює створення обертового магнітного поля. Після розкручування ротора кнопкою  $K$  вимикають пускову обмотку і конденсатор. Такі електродвигуни називають конденсаторними. Вони мають кращі робочі та пускові характеристики, вищий коефіцієнт потужності  $\cos \varphi$  і вищу перевантажувальну здатність (рис. 2 б).

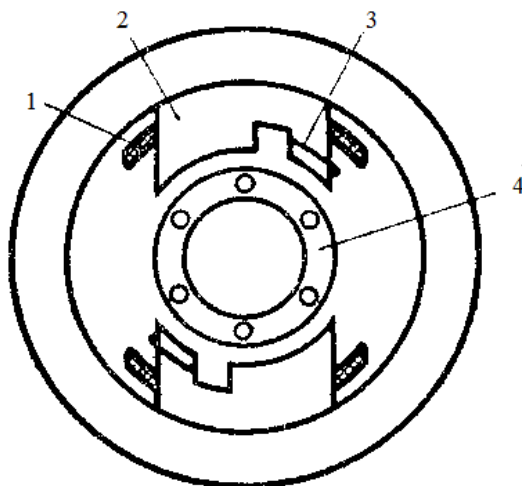
В окремих конструкціях двигунів (рис. 2 в) використовують пусковий та робочий конденсатори.

На час розкручування ротора кнопкою  $K$  замикають пусковий конденсатор  $C_1$ , а робочий конденсатор  $C_2$  і пускова обмотка залишаються увімкненими і в робочому режимі асинхронного двигуна. Для зміни напрямку обертання двигуна треба поміняти місцями кінці пускової (або робочої) обмоток.

Є двигуни з розщепленими полюсами (рис. 3). Вони, як правило, малої потужності і не потребують пускової обмотки. У них явно виражені полюси статора 2, розрізані на дві частини, обмотка статора 1 та короткозамкнений ротор 4. Одна його частина розщепленого полюса має замкнутий виток у вигляді мідного кільця 3. Магнітний потік статора індукує в кільці ЕРС, внаслідок чого по ньому циркулює магнітний потік. Якщо врахувати те, що ЕРС у кільці відстає від



магнітного потоку на  $\frac{\pi}{2}$ , а саме кільце має лише активний опір, то струм у ньому співпадає за фазою з ЕРС.



*Рис. 3. Однофазний двигун з розщепленими полюсами.*

Індукований у кільці струм створить магнітний потік, який буде зсунутим за фазою відносно основного потоку статора також на  $\frac{\pi}{2}$ . Отже в статорі утвориться обертове магнітне поле, що спричинить появу пускового обертового моменту двигуна.

### 3. Способи увімкнення трифазних двигунів до однофазної мережі.

Іноді трифазні двигуни використовують, як однофазні. Для цього вмикають конденсатори у коло однієї фази. На рисунку 4 зображені схеми вмикання трифазних двигунів у коло однофазної електромережі при виведених трьох кінцях обмоток.

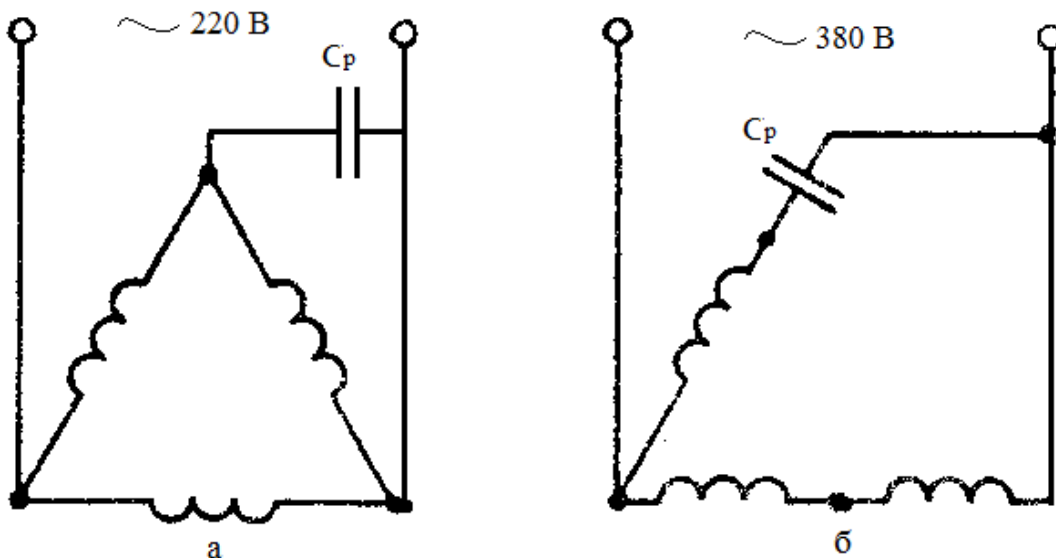


Рис. 4. Схеми увімкнення трифазних двигунів до однофазної мережі.

Наведені схеми увімкнення електродвигунів забезпечують використання лише 40-50% їх номінальної потужності. Для розрахунку величини ємності пускових конденсаторів при з'єднанні обмоток зіркою, у практиці використовують такий вираз:  $C_{пуск} = \frac{P \times 10^9}{314 \cdot U^2} / \text{Mk}\Phi /$ , а при з'єднанні трикутником, ємність беруть у три рази більшого значення. Де: P – потужність двигуна; U – напруга живлення; f – частота струму в мережі.

Можна підбирати ємність приблизно і так: 10 мкФ на 100 Вт потужності при з'єднанні обмоток трикутником.

Робочу ємність конденсатора розраховують за іншою формулою:

$$C_{роб} = \frac{P \times 10}{2\pi f U^2} / \text{Mk}\Phi / .$$

### Висновки

1. Асинхронні двигуни найпоширеніші у різного роду приводах. В основі принципу їх дії є три положення: а) закон Фарадея; б) закон Ампера; в) правило Ленца.
2. Номінальним навантаженням АД є  $M_{ном}$ , при якому  $S_{ном} = 0,02 - 0,06$ , а також номінальне число обертів ротора  $n_{ном} = (1 - S_{ном})n_1 = (0,94 - 0,98)n_1$ .
3. Перевантажувальна здатність  $\frac{M_{max}}{M_{min}} = 1,7 - 2,5$  для двигунів потужністю до 100кВт.
4. Пускові можливості асинхронних двигунів такі:  $\frac{M_{пуск}}{M_{ном}} \geq 1 - 2$ . Для потужних двигунів число значно більше.
5. Електромагнітний момент асинхронних двигунів прямо пропорційний квадрату напруги в мережі, а тому при незначних її коливаннях двигун неможливо запустити.

| Переваги                      | Недоліки                |
|-------------------------------|-------------------------|
| Надійні та прості за будовою. | Великий пусковий струм. |

|   |   |
|---|---|
| Прості в керуванні.<br>Високий ККД.<br>Низька собівартість.<br>Великий пусковий момент. | Малий $\cos \varphi$ при недовантаженні.<br>Неможливо регулювати швидкість обертання.<br>Зниження $M$ при зменшенні $U$ . |
|---|---|

### Лекція 13. Генератори постійного струму.

1. Будова і принцип дії генератора постійного струму.
2. Реакція якоря.
3. Комутація
4. Класифікація генераторів постійного струму.
5. Електромагнітний момент на якорі генератора.

Література:

Л-1, с. 180-194. Л-2, с. 183-201.

Додаткова література:

1. Элементарный учебник физики: Учебное пособие /Под ред. Г.С. Ландсберга. Т. 11. Электричество и магнетизм. –10-е изд., перераб. –М.: наука, 1985. – 410-427с.
2. Кацман М.М. Электрические машины и трансформаторы. Ч.1. –М.: Высшая школа, 1976. –С. 12-146.

#### 1. Будова і принцип дії генератора постійного струму.

Машины постійного струму використовуються не так часто, як машини змінного струму. Проте, у випадках коли необхідно плавно регулювати частоту обертання вала при великих пускових моментах електродвигунів, такі машини мають гарні характеристики. Тому їх застосовують у якості електроприводів транспортних засобів, конвейєрних стрічок, стартерів для запуску двигунів внутрішнього згорання тощо.

Для живлення таких двигунів, зварювальних апаратів, різного роду автоматів, а також для перетворення змінного струму у постійний тощо, використовують генератори постійного струму.

Машины постійного струму є оборотними. Тобто, вони можуть працювати як у режимі електродвигуна, так і в режимі генератора.

Принцип дії МПС базується на законі електромагнітної індукції. Модель генератора постійного струму зображено на рис. 1,а. Вона складається з постійного магніту, провідної рамки, розташованої між його полюсами і мідних півкілець, до яких кріпляться кінці мідної рамки.

Якщо обертати рамку у магнітному полі індукцією  $B$ , створеного

постійним магнітом, то на мідних півкільцях виникає електрорушійна сила  $e = Blv \sin \alpha$ . Поява ЕРС спричинена дією сили Лоренца на вільні електрони, що рухаються разом з активною частиною провідної рамки.

За правилом правої руки можна визначити напрям ЕРС, а отже і напрям протікання електричного струму по зовнішній ділянці кола, що й фіксуватиме гальванометр  $\Gamma$ . Стрілка гальванометра увесь час відхилятиметься лише в одну сторону і фіксуватиме протікання випрямленого пульсуючого струму, графічно зображеного на рис. 1, б.

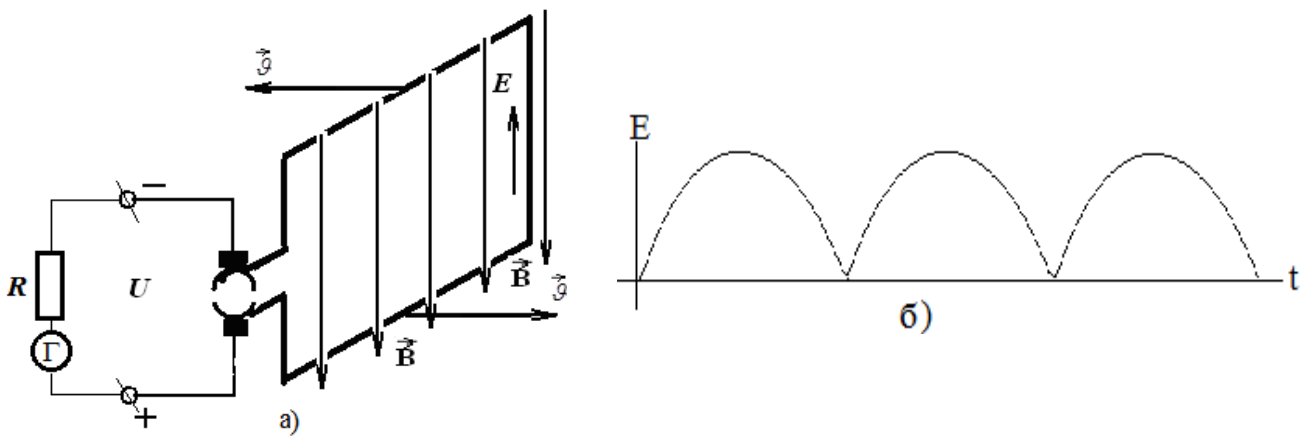


Рис. 1. Схематична модель генератора ПС – а; графік ЕРС в рамці – б .

Максимальних значень ЕРС та індукційного струму у рамці досягається тоді, коли вона розташовується в площині, паралельній до магнітних силових ліній. У цей момент напрям вектора швидкості активної частини рамки перпендикулярний до вектора магнітної індукції  $\vec{v} \perp \vec{B}$ . Тому з формули Лоренца  $F = eBv \sin \alpha$  слідує, що при  $\sin \alpha = 1$  на заряджені частинки діє максимальна сила, а тому буде протікати максимальний струм. І, навпаки, при русі активної частини рамки паралельно до магнітних силових ліній  $\sin \alpha = 0$  і на заряджені частинки не діє сила Лоренца, а тому в цей момент струм не протікає. В інших положеннях рамки струм приймає проміжних значень.

Це явище можна пояснити на основі закону електромагнітної індукції. Так, значення ЕРС індукції у рамці  $e = -\frac{d\Phi}{dt}$ . При рівномірному обертанні рамки навколо осі, отримаємо графік зміни магнітного потоку (рис. 2, а), що пронизує контур рамки, який описується тригонометричною функцією.

Дійсно, нехай у початковий момент часу рамка була розташована

горизонтально. У цьому випадку магнітний потік, що її пронизує дорівнює нулю. При вертикальному розташуванні рамки, через четверть періоду ( $t = \frac{1}{4}T$ ), кількість силових ліній у площині рамки максимальна – магнітний потік досягає максимального значення  $\Phi_m = BS$ .

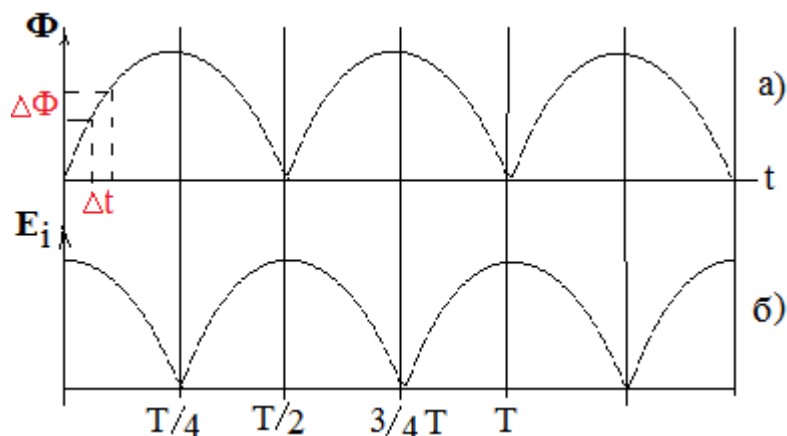


Рис. 2. Графіки зміни магнітного потоку – а та ЕРС – б у рівномірно обертаючій рамці в магнітному полі, залежно від часу.

З графіка видно, що найбільша швидкість зміни магнітного потоку, а отже максимального значення індукованої ЕРС у рамці досягається тоді, коли вона проходить горизонтальне положення. Характер зміни ЕРС зображено графічно на рис. 2,б.

Для зменшення пульсацій та отримання постійного струму в генераторах використовують не одну рамку, а певну кількість рамок-котушок, кожна із яких намотується з відповідної кількості витків. У кожній котушці індукуються ЕРС, значення якої можна виразити формулою:  $e_i = -n \frac{d\Phi}{dt}$ , де:

$e_i$  – ЕРС, що індукуються в рухомій котушці;

$\frac{d\Phi}{dt}$  – швидкість зміни магнітного потоку;

$n$  – кількість витків котушки.

Генератори постійного струму бувають різної потужності, та мають певні особливості їх конструкції. Будова таких машин досить складна. Тому з певною ступінню спрощення, але наявністю всіх основних, принципово необхідних деталей, подамо схематично будову генератора постійного струму за рис. 3.

Основними його частинами є корпус 1; індуктор 2, що являє собою

постійний електромагніт для створення магнітного потоку; якір 3 – осердя з обмотками, в яких індукується ЕРС; підшипникові щити 5, у яких обертається якір (рухома частина генератора); колектор 4 – діелектричний циліндр на валу якора, по периметру якого розташовані мідні пластини, до яких припаяні кінці котушок; траверса з щіткотримачем та щітками 6, з допомогою яких відводять електроенергію до споживачів.

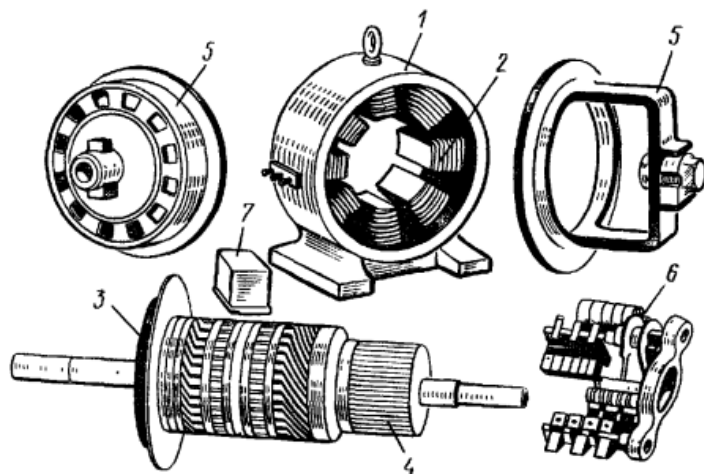


Рис. 3. Будова генератора постійного струму.

Рухома частина генератора називається ротором, а нерухома -статором.

Частина генератора у якій індукується ЕРС називається якорем.

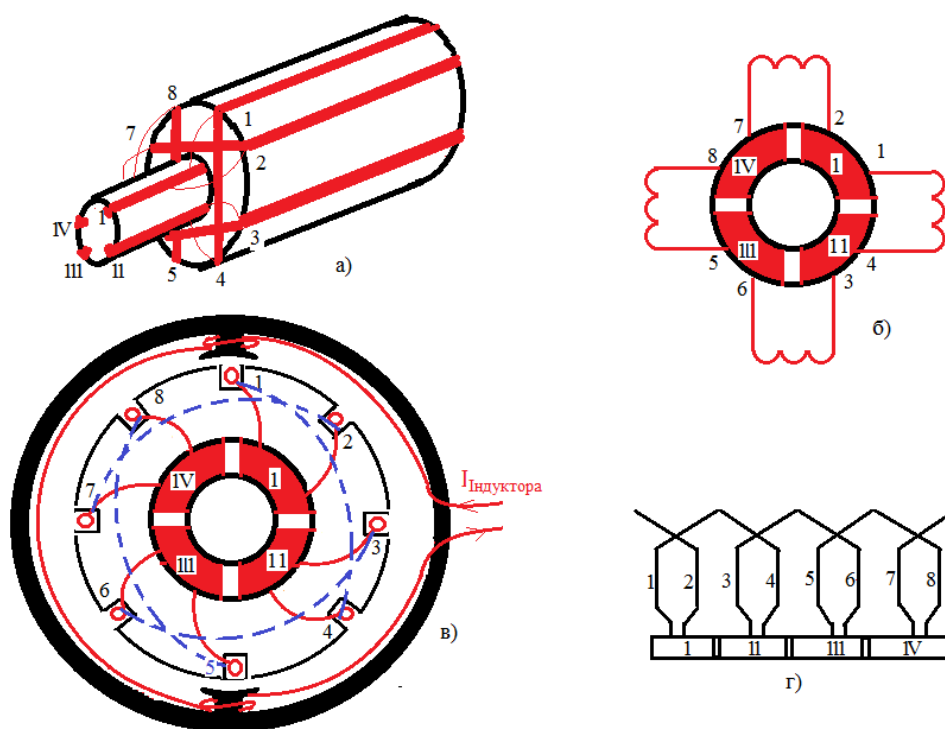


Рис. 4. Схематичне зображення генератора постійного струму типу ПН.

а) –якір; б) – з'єднання секцій обмотки якора з пластинами колектора; в) –

загальний вигляд генератора; г) – розгорнута схема обмотки якора.

На рис.4 зображено схематично будову генератора постійного струму типу ПН з чотирма секціями якоря та двома парами полюсів (двома парами пластин на колекторі). Іноді в машинах постійного струму розташовують додаткові полюси, призначення яких буде з'ясовано пізніше.

## 2. Реакція якоря.

Створення намагнічуючою силою якоря магнітного поля, яке впливає на основний магнітний потік індуктора машини постійного струму – називають реакцією якоря. Реакція якоря пояснюється додаванням (суперпозицією) магнітних потоків індуктора та якоря при роботі генератора в режимі навантаження.

Зобразимо окремо магнітні поля індуктора і якоря за допомогою магнітних силових ліній (рис. 5, а,б,в). Лінія, що перпендикулярна до осі полюсів називається геометричною нейтраллю. У режимі холостого ходу очевидно вона буде перпендикулярною і до самого магнітного потоку індуктора (рис. 5, а).

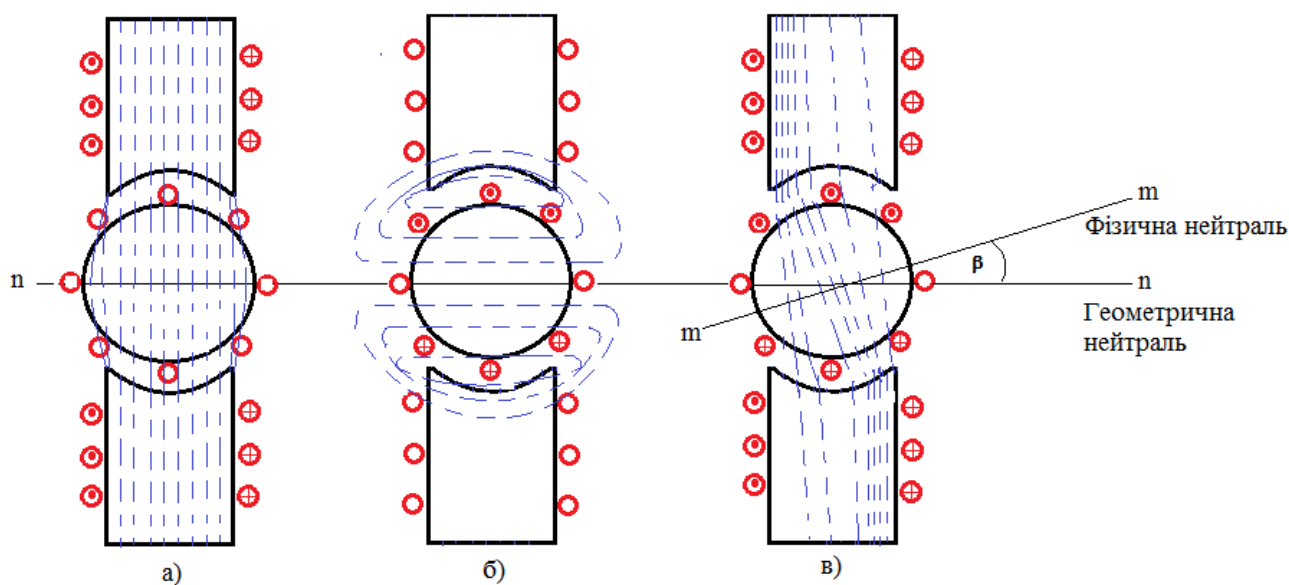


Рис. 5. Зображення процесу реакції якоря.

У режимі навантаження (рис 5,б) в якорі протікатиме струм навантаження, а отже навколо витків його котушки утвориться також магнітне поле, силові лінії якого паралельні до геометричної нейтралі. Магнітні потоки індуктора та якоря дадуть сумарний магнітний потік, а лінія, перпендикулярна до нього, що називається фізичною нейтраллю уже не співпадає з геометричною нейтраллю(рис.



5, в). У цьому режимі роботи машини вісі фізичної та геометричної нейтралей змістяться на деякий кут  $\beta$ . Кут зміщення осей залежатиме від струму збудження.

Збільшення струму навантаження призводить до збільшення кута між геометричною та фізичною нейтралями, і при певних навантаженнях, коли настає насичення магнітного кола машини, подальше зростання струму якоря не лише спотворює магнітний потік, але й чинить магнітний опір у магнітному колі машини. Отже в результаті реакції якоря зменшується загальний магнітний потік, а отже і ЕРС генератора.

Зсув фізичної нейтралі призводить до іскріння під щітками, що спричиняє підгоряння пластин колектора. Пояснити це явище можна тим, що щітки при переході з однієї колекторної пластини на іншу замикають накоротко одну із секцій (рис. 6).

Якщо обидві нейтралі співпадають, або реакція відсутня, то в цій секції ЕРС не індукується і іскріння під щітками не виникає. Якщо ж реакція якоря існує, а щітки розташовані на геометричній нейтралі, то магнітний потік, що перетинає під деяким кутом до рамки секції, індукуватиме в ній під час переходу щітки з однієї пластини на іншу ЕРС. У цей момент виникне електричний струм, що спричинятиме іскріння на колекторі під щітками. Тому на практиці траверсу з щітками повертають і розташовують їх по лінії фізичної нейтралі.

Щоправда, при зміні струму навантаження кут зміщення фізичної нейтралі змінюється, а тому у практиці щітки виставляють у положенні найменшого іскріння при номінальному навантаженні генератора. Тому, для усунення іскріння під час комутації в генераторах постійного струму ставлять додаткові полюси, які усувають спотворення основного магнітного потоку.

### 3. Комутація

Процес перемикання секцій з однієї паралельної вітки обмотки якоря на іншу і всі явища, що виникають при цьому в короткозамкнених секціях, називають **комутацією**, а час його здійснення – **періодом комутації**.

Нехай ми маємо обмотку з двома паралельними вітками (рис. 6). Якщо щітка знаходиться під пластиною 1, то струм якоря розподілиться на дві

паралельні вітки і в кожній із них становитиме  $-\frac{I_{я}}{2}$ . Якщо щітка знаходиться одночасно під двома пластинами, то струм у короткозамкнених вітках компенсується і дорівнює нулю (рис. 6,б). Коли щітка перейде на праву пластину, то струм у секціях змінить свій напрям на протилежний, а його значення буде  $(-\frac{I_{я}}{2})$ .

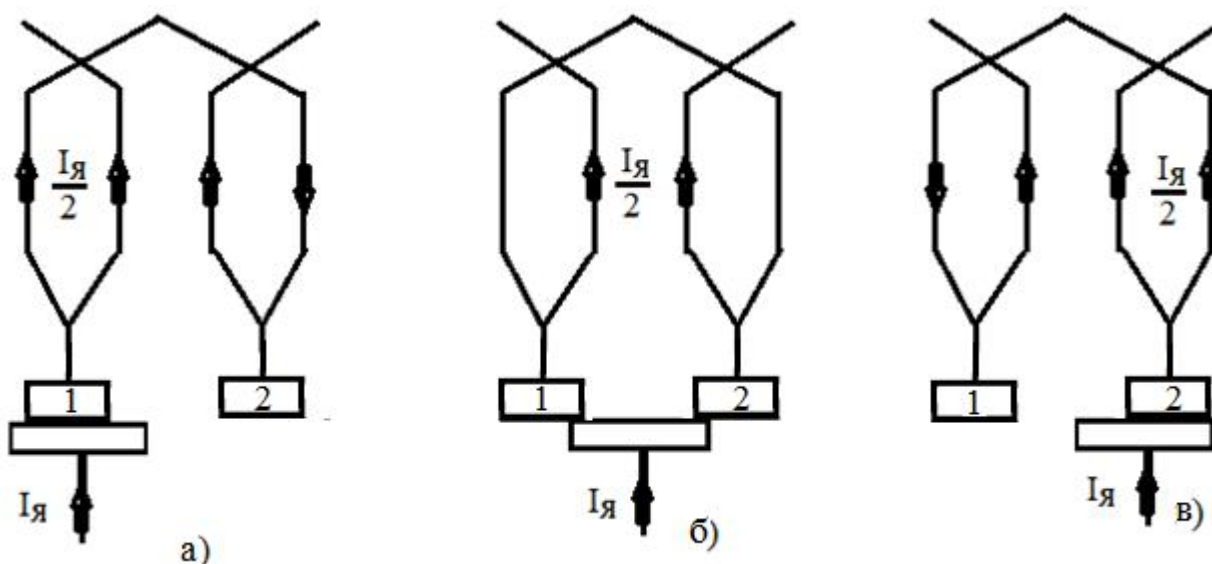


Рис. 6. Комутація.

При сходженні щітки з пластини 1 відбувається швидке зменшення електричного струму в котушці секції, що призводить до виникнення ЕРС самоіндукції. За правилом Ленца в секції утвориться електричний струм, який співпаде за напрямком зі струмом навантаження якоря, а тому між пластиною і щіткою виникне іскріння. Цей процес буде періодично повторюватись.

Для створення без іскрової комутації, на геометричній нейтралі встановлюють додаткові полюси, які вмикають послідовно з обмоткою якоря (рис. 7). До того ж, магнітний потік додаткових полюсів має зустрічний напрям до магнітного потоку якоря, а тому при певному розрахунку кількості витків, компенсує його. Оскільки обидва вони залежать в однаковій мірі від струму навантаження, то взаємо компенсуються автоматично.

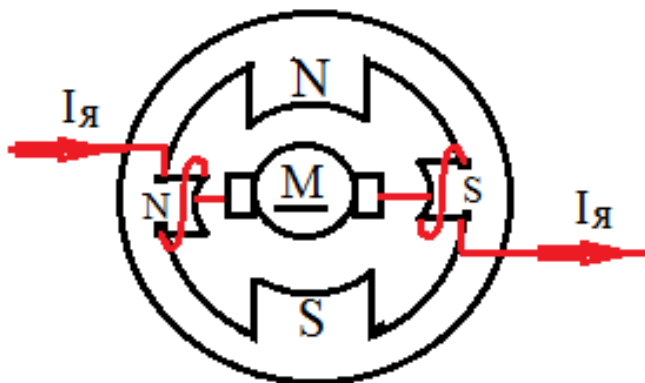


Рис. 7. Генератор з додатковими полюсами.

#### 4. Класифікація генераторів

У машинах постійного струму є два основних вузли – індуктор та якір. Для створення однорідного магнітного поля індуктором, необхідно в ньому підтримувати постійний електричний струм. Джерелом такого струму може бути окремий генератор постійного струму, акумуляторна батарея або сам генератор, у якому відгалужується частина електричної енергії і подається на індуктор. Залежно від виду індуктора або створення магнітного потоку, електричні машини поділяються на машини з електромагнітним збудженням та машини зі збудженням постійним магнітом (магнітоелектричні).

У генераторах з електромагнітним збудженням котушка індуктора може вмикатися за різними схемами відносно якоря. У цьому зв'язку машини постійного струму поділяють на машини з незалежним збудженням (рис. 8) та самозбудженням, у яких обмотка збудження з'єднана з обмоткою якоря за різними схемами. Тому, генератори із самозбудженням поділяються на такі:

а) генератори паралельного збудження (шунтові машини), у яких обмотка збудження ввімкнена паралельно до обмотки якоря та навантаження (рис. 10);

б) генератори послідовного збудження (серієсні), у яких обмотка збудження з'єднана послідовно з обмоткою якоря (рис. 12);

в) генератори змішаного збудження (компаундні), у яких дві обмотки збудження – одна з яких вмикається послідовно, інша – паралельно до якоря (рис. 14).

Для розрахунку параметрів генераторів розрізняють роботу генератора в режимі холостого ходу (ХХ) та режимі навантаження. У режимі

XXдосліджують залежність електрорушійної сили, що індукується в якорі машини, від магнітного потоку або струму збудження – характеристика холостого ходу генератора:  $I_{нав} = 0; E_0 = U = f(I_{зб})$

При ввімкненні навантаження досліджується залежність величини напруги на клеммах генератора від струму навантаження при стабільному струмові збудження - зовнішня характеристика :

$$I_{зб} = const; U = f(I_{нав})$$

Для підтримування стабільності напруги на виході генератора змінюють величину магнітного потоку або струму збудження – регулювальна характеристика:  $U = const; I_{зб} = f(I_n)$

### Дослідження генератора з незалежним збудженням

Схема ввімкнення генератора з незалежним збудженням для дослідження його характеристик зображена на рис. 8.

У колі індуктора є реостат  $R_{зб}$ , за допомогою якого регулюється струм збудження, а отже й магнітний потік. Силу струму в якорі можна фіксувати з допомогою амперметра.

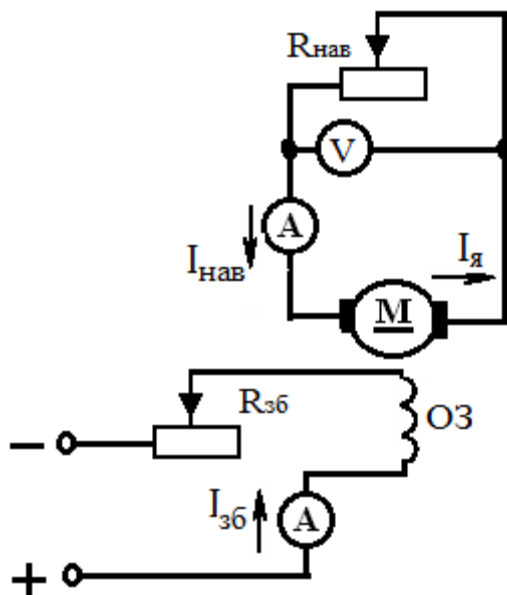


Рис. 8. Схема генератора ПС з незалежним збудженням.

Якщо зовнішнє навантаження вимкнене, то генератор працює в режимі XX при  $I_{нав} = 0$ . На графіку (рис. 9) зображено залежність величини напруги  $U_0$  на клеммах генератора (вона фіксується вольтметром) від сили струму збудження  $I_{зб}$ .

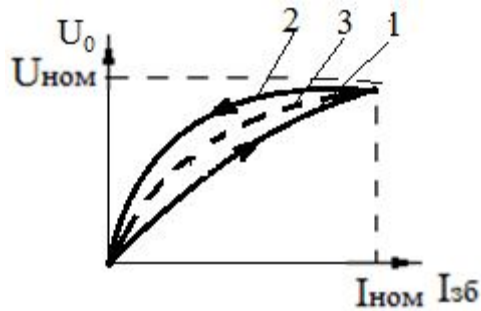


Рис. 9. Графік залежності величини напруги на щітках генератора від сили струму збудження.

При обертанні якоря генератора вольтметр фіксуватиме незначну напругу навіть при відсутності струму збудження ( $I_{зб} = 0$ ). Пояснюється це тим, що в сердечниках полюсів завжди зберігається залишковий магнетизм. Збільшуючи силу струму збудження, відповідно зростатиме напруга на затискачах якоря, що зображено на графіку кривою 1. При досягненні стану насичення в сердечнику індуктора, збільшення магнітного потоку в зазорах між якорем та індуктором зростатиме в незначній мірі навіть у випадку збільшення струму збудження. У цей момент напруга генератора досягає номінального значення.

Зменшуючи струм збудження до нуля, а далі змінивши його напрям на протилежний, отримаємо на графіку криву 2. Прямий і зворотній графіки не співпали тому, що на величину індукованої в якорі ЕРС впливало залишкове магнітне поле сталі (гістерезис).

Розраховують характеристику холостого ходу за середнім значенням залежності напруги від сили збудження при холостому ході генератора - крива 3, що зображена пунктирною лінією.

При ввімкненні зовнішнього навантаження у коло якоря, досліджують зовнішню та регулювальну характеристики, зображені відповідно на рис. 11 б, в.

Зовнішня характеристика показує залежність напруги на клеммах генератора  $U$  від сили струму навантаження  $I_{нав}$ , при постійних обертах якоря генератора  $n$  та незмінній силі струму збудження  $I_{зб}$ . Збільшуючи навантаження, напруга на клеммах якоря зменшується завдяки розмагнічувального впливу реакції якоря та спаду напруги на внутрішньому опорі кола якоря.

Дійсно, чим більший струм протікатиме в обмотці якоря, тим більший

магнітний потік він створюватиме, а отже послаблюватиме магнітне поле індуктора, разом з тим зростатиме спад напруги на обмотці якоря.

Тому, для підтримування стабільної напруги на клеммах генератора, необхідно регулювати струм збудження. При зменшенні напруги внаслідок збільшення навантаження, потрібно збільшувати струм збудження і, навпаки, при зменшенні навантаження струм збудження зменшують. На (рис.11,в) зображено графік залежності струму збудження від струму навантаження  $I_{зб} = f(I_{нав})$ .

Номінальне значення напруги встановлюють в режимі ХХ генератора.

### Дослідження генератора паралельного збудження

Генератор паралельного збудження є одним із видів генераторів із самозбудженням, його схему зображено на рис. 10. У ньому індуктором є обмотка збудження  $OЗ_{пар}$ , що ввімкнена паралельно до кола якоря.

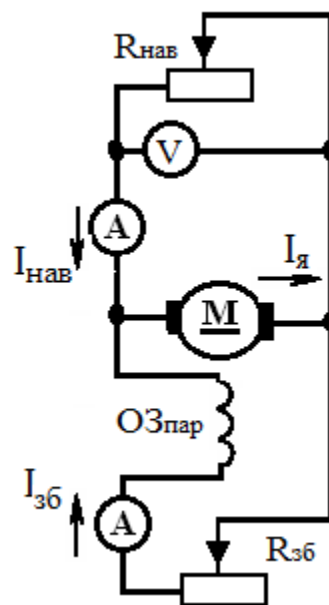


Рис. 10. Схема генератора ПС з паралельним збудженням.

Принцип дії такого генератора подібний до попереднього. Проте його збудження здійснюється частиною струму, що відгалужується від кола якоря.

У початковий момент, при обертанні якоря, в останньому індукується незначна ЕРС за рахунок залишкового магнетизму індуктора генератора. Ця ЕРС створює незначний струм в котушці індуктора і при цьому зростає сумарний магнітний потік, що призведе до нового зростання електрорушійної сили якоря. Таким чином відбувається поступове нарощування струму збудження та

напруги на клеммах генератора без зовнішнього збудника.

Таке нарощування струму збудження буде здійснюватись до тих пір, поки не наступить стан насичення намагнічення сталі машини, а на клеммах генератора встановиться номінальне значення напруги.

Для побудови характеристики холостого ходу шунтового генератора (рис. 11 а) регулювальним реостатом  $R_p$  плавно збільшують струм збудження, який фіксується амперметром та вимірюють напругу на виході генератора вольтметром.

Графік зовнішньої характеристики подібний до того, що характеризує генератори з незалежним збудженням. Залежність  $E = U = f(I_{зб})$  відображено нарис. 11, б.

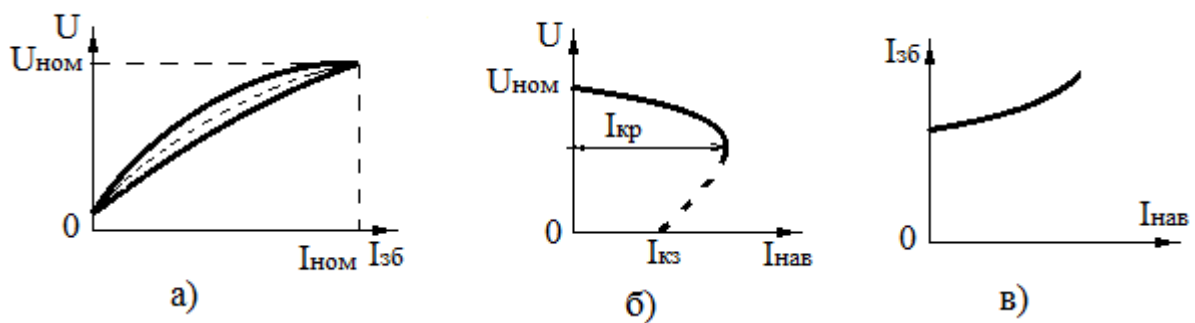


Рис. 11. Характеристики генератора з паралельним збудженням: а) – характеристика холостого ходу; б) – зовнішня характеристика генератора; в) регулювальна характеристика.

При поступовому збільшенні навантаження зростає струм якоря, а отже і спад напруги на ньому, що призведе до зменшення напруги на виході генератора. Це впливає з 2-го закону Кірхгофа  $U = E - I_a R_a$ .

Крім того, струм якоря розгалужується на дві вітки – на навантаження та обмотку збудження. При відгалуженні більшого струму на навантаження, очевидно, на обмотці збудження сила струму зменшиться. Тому, послабиться магнітне поле індуктора, а отже зменшиться напруга на клеммах генератора.

При подальшому збільшенні навантаження (зменшенні опору зовнішнього кола) напруга буде зменшуватись.

На графіку (рис. 11, б) зображено стан генератора, коли струм

навантаження досягає свого критичного значення  $I_{кр}$ , після чого в наслідок реакції якоря почнеться розмагнічування генератора, а також відгалуження струму на навантаження, що призведе до стрімкого зменшення напруги на клеммах генератора.

При короткому замиканні (КЗ) клем генератора в індукторі буде лише залишковий магнітний потік. На рисунку цей процес зображено штриховою лінією. У режимі КЗ в обмотці якоря встановиться електричний струм, що становить лише 8-12% від його номінального значення.

Для стабілізації напруги потрібно постійно регулювати струм збудження. Регульовальна характеристика такого генератора зображена на рисунку 11, в.

Такі генератори широко використовують у тих випадках, коли немає суттєвих коливань навантаження, так як вони спричиняють різкі зміни напруги в мережі, що становить 10-30% від її номінального значення.

### Дослідження роботи генераторів послідовного збудження

Їх будова схематично зображена на рис. 12. Обмотка збудження таких генераторів з'єднана послідовно з обмоткою якоря, а тому струм навантаження одночасно є струмом збудження. У режимі холостого ходу ЕРС такого генератора індукується лише за рахунок залишкового магнетизму індуктора.

Тому, генератори послідовного збудження мають лише зовнішню характеристику  $U = f(I_{нав})$  – залежність величини напруги від струму навантаження (рис. 13).

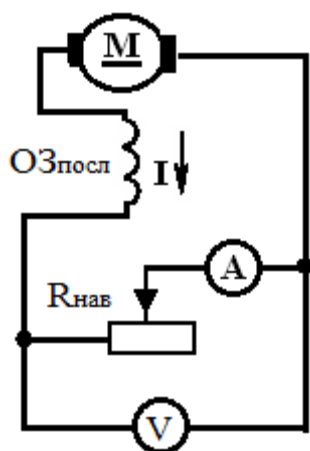


Рис. 12. Схема генератора ПС з послідовним збудженням.

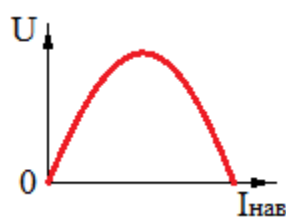


Рис. 13. Зовнішня характеристика ДПС з послідовним збудженням.

З графіка видно, що зі збільшенням навантаження напруга на затискачах генератора зростає пропорційно до сили струму в котушці збудження.

При досягненні стану насичення магніто проводу і подальшому зростанні



навантаження, напруга зменшуватиметься завдяки реакції якоря, а також спаду напруги на обмотках якоря та індуктора, що слідує з виразу:  $U_a = I(R_{я} + R_{o.з.})$ . На графіку дана половина кривої напрямлена до низу.

Серієсні генератори використовують лише в окремих випадках, так як у них різко змінюється напруга на клеммах залежно від величини струму навантаження.

### Дослідження роботи генераторів мішаного збудження

Електричну схему компаундного генератора зображено на рис. 14. Дві обмотки збудження такого генератора – паралельна (у переважній більшості випадків основна) та послідовна можуть бути з'єднані узгоджено або зустрічно одна відносно іншої. Їх намагнічуючі сили при цьому додаються -  $I_{к} \omega_{пар} + I_{я} \omega_{посл.}$

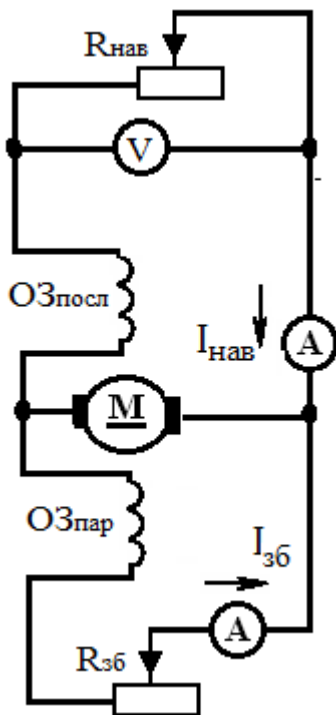


Рис. 14. Схема генератора ПС з мішаним збудженням.

Намагнічуюча сила послідовно ввімкненої обмотки підсилює магнітний потік індуктора, а ЕРС якоря, компенсуючи втрати на активному опорі якоря та його реакцію. Напруга на клеммах генератора  $U = E - I_{я}R_{я} - I_{я}R_{п.к.}$

Де:  $E$  - ЕРС генератора;

$I_{я} = I_{нав.} + I_{зб.}$  - сила струму в якорі, що дорівнює сумі сили струму навантаження та збудження;

$R_{я}; R_{п.к.}$  - опори якоря та послідовної котушки відповідно.

При зростанні навантаження магнітний потік паралельної котушки буде послаблюватись за рахунок реакції якоря та активного опору якоря, а напруга на клеммах генератора зменшуватись. Проте в цей же час зростає сила струму у послідовній котушці, яка підсилюватиме магнітний потік. Тому при відповідному розрахунку кількості витків та узгодженому увімкненні котушок індуктора, напруга на виході генератора залишатиметься сталою навіть і при значних коливаннях навантаження (рис.15, 1).

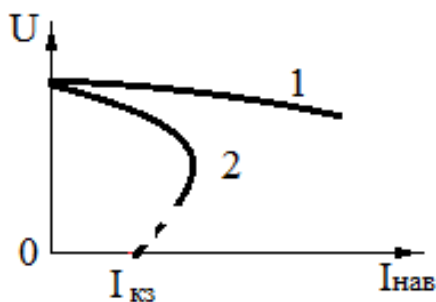


Рис.15. Зовнішня характеристика ДПС з послідовним збудженням: 1 – узгоджене увімкнення паралельної і послідовної ОЗ; 2 – зустрічне увімкнення ОЗ.

Іноді виникає потреба обмеження сили струму при великих навантаженнях або КЗ. У таких випадках послідовну обмотку збудження вмикають зустрічно. При цьому різко зменшиться напруга генератора при зростанні навантаження, а в момент КЗ майже дорівнюватиме нулю. На графіку це явище зображено кривою лінією 2. Тобто, при різкому збільшенні струму споживання в мережі послідовна обмотка буде розмагнічувати машину і напруга різко зменшиться.

Таку схему увімкнення генератора використовують у зварювальних установках, прожекторах тощо.

Взагалі компаундні генератори використовують для живлення силових ліній, де необхідно забезпечити стабільність напруги при значних коливаннях струму навантаження.

## 5. Електромагнітний момент на якорі генератора

Робота будь-якої електричної машини характеризується взаємодією двох спрямованих назустріч один-одному обертових моментів. Один із них

створюється механічними силами, а другий – електромагнітною індукцією. З іншого боку, робота МПС характеризується рівновагою спадів напруги на якорі і зовнішньому колі та ЕРС, що створюється в обмотці якоря.

$$\text{Закон Ома для повного кола } E_a = U + I_a \sum r \quad (1)$$

Де:  $U$  - напруга на клеммах генератора, або спад напруги на зовнішньому колі;

$I_a$  - сила струму в колі якоря;

$\sum r$  - сума опорів всіх ділянок якоря, або внутрішній опір джерела струму, який складається з обмотки якоря  $r_a$ , додаткових обмоток якоря  $r_d$ , компенсаційної обмотки  $r_k$ , послідовної обмотки збудження  $r_c$  та контакту щіток  $r_{щ}$ .

$$\sum r = r_a + r_d + r_k + r_c + r_{щ} \quad (2)$$

Якщо якісь складові в колі якоря відсутні то випадає відповідний доданок у виразі 1.

Для створення ЕРС необхідно безперервно обертати якір генератора за допомогою електричного або іншого привода, який би створював механічний обертовий момент  $M_{мех}$ . Обертання якоря наступить тоді, коли зрівноважаться механічний обертовий момент з електромагнітним:  $M_{мех} = M_e$ .

Виникнення електромагнітного моменту пояснюється тим, що у магнітному полі індуктора на активні сторони секції зі струмом діє пара сил (рис. 16).

Напрямок цієї сили визначається за правилом лівої руки, а її величина з виразу:  $F = BI_a l$ . (3)

Де:  $B$  - індукція магнітного поля;  $I_a$  - сила струму в якорі;  $l$  - довжина активної частини обмотки якоря.

Електромагнітний момент генератора дорівнює добутку сили  $F$ , що діє на обмотку якоря, на плече (радіус якоря)  $\frac{D}{2}$  та кількість витків у обмотці  $n$ :

$$M_e = Fn \frac{D}{2}. \quad (4)$$

Підставивши вираз 3 у вираз 4, отримаємо значення електромагнітного обертового моменту:  $M = BI_a l \frac{D}{2} n .(5)$

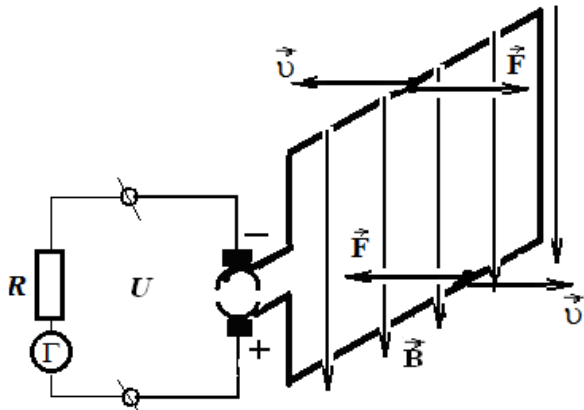


Рис. 16. Схема до пояснення виникнення сили Ампера (електромагнітного моменту) під час дії ГПС.

Щітки ділять обмотку якоря на  $a$  пар віток, а число пар віток дорівнює числу пар полюсів. Отже число пар активних секцій у цьому випадку буде дорівнювати  $2a$ . Тому струм у якорі  $I_я = 2aI_a .(6)$

З урахуванням виразу 6 перепишемо вираз 5:  $M = BI_я l \frac{D}{4a} n .$

Тобто, електромагнітний момент, що діє на якір генератора, прямо пропорційний струму навантаження:  $M = CBI_я$

З останнього виразу слідує те, що при збільшенні електричного навантаження генератора, необхідно збільшувати потужність механічного приводу якоря. Якщо ж генератор не завантажений, тобто при його роботів режимі холостого ходу, струму якорі не протікає, а отже і електромагнітний момент дорівнює нулю. У цьому випадку механічний момент привода буде компенсуватися тертям в підшипниках, щітках та втратами в компенсаційній і послідовній обмотках.

## Лекція 14. Колекторні двигуни.

1. Робота МПС в режимі двигуна. Регулювання пускових струмів.
2. Принцип саморегулювання двигуна ПС.
3. Регулювання швидкості двигунів паралельного збудження.
4. Регулювання швидкості двигунів послідовного збудження.
5. Регулювання швидкості двигунів мішаного збудження.
6. Характеристики двигунів постійного струму
7. Універсальні двигуни.

### Література

Л-1. С. 194 - 201. Л-2. С. 197 – 208.

#### 1. Робота МПС в режимі двигуна.

У режимі двигуна машина постійного струму перетворює електричну енергію в механічну. Принцип дії ДПС можна пояснити на спрощеній моделі (рис. 1). Якщо подати напругу  $U$  одночасно на обмотки збудження та провідну рамку, то в рамці протікатиме струм  $I_a$ , а обмотка збудження створить магнітне поле індукцією  $B$ . У такому випадку на активну частину рамки зі струмом діятиме пара сил  $F$  з боку магнітного поля індукцією  $B$ . Рамка буде обертатися в магнітному полі з певною швидкістю, завдяки чому виникатиме ЕРС –  $E$ , яка зрівноважиться з величиною підведеної до нього напруги  $U$ .

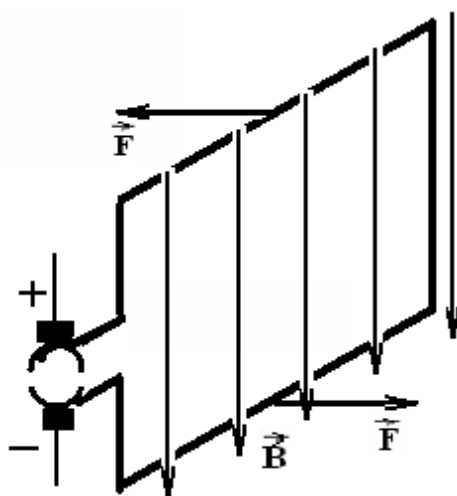


Рис. 1. Будова двигуна постійного струму.

Перевага двигунів постійного струму полягає в тому, що вони можуть

працювати практично на будь-якій частоті обертання якоря і розвивають при цьому великий пусковий момент.

Недолік пов'язаний з використанням колектора на якому виникає іскріння, що руйнує його та створює радіоперешкоди, а також великий пусковий струм. Пил від щіток забруднює двигун.

Розглянемо детальніше деякі особливості пуску таких двигунів. Якщо врахувати спад напруги на омичному опорі якоря, то другий закон Кірхгофа для кола якоря запишеться у такому вигляді:

$$U = E + I_{\text{я}} R_{\text{я}}. \quad (1)$$

Де:  $E$  – проти-ЕРС;  $I_{\text{я}} R_{\text{я}}$  - спад напруги на якорі.

Нехай опір обмотки якоря  $R_{\text{я}}$ , що складає десяті або й соті частини Ома, увімкнено до електромережі постійного струму, наприклад, напругою 220 В. Під час пуску швидкість обертання якоря  $n = 0$ , а отже й ЕРС у ньому  $E = 0$ . Відповідно виразу 1, пусковий струм у якорі  $I_{\text{я}} = \frac{U}{R_{\text{я}}}$  буде досить великим. Звідси слідує, що пускові струми у якорі досягають великих значень  $I_{\text{я}} = (8-30)I_{\text{ном}}$ .

Для зменшення пускового струму та плавного його регулювання, іноді в коло якоря послідовно вмикають пускові реостати. При цьому попередній вираз запишеться так:  $I_{\text{я}} = \frac{U}{R_{\text{я}} + R_{\text{пуск}}}$ .

Реостати розраховують так, щоб пусковий струм сягав значення  $I_{\text{я}} = (1,1-2,0)I_{\text{ном}}$ .

При пуску двигуна, у випадку постійного навантаження і незмінному магнітному потокові індуктора, додатковий опір поступово виводять, тоді на якорі двигуна поступово зростає обертальний момент, його швидкість зростає і досягає номінальних значень. Разом з цим у якорі зростає проти-ЕРС індукції, яка врівноважується з підведеною напругою та падінням напруги на активному опорі обмотки якоря, і двигун працює у стабільному режимі.

## 2. Принцип саморегулювання двигуна постійного струму

Розглянемо роботу двигуна в режимі навантаження. Магнітний потік у

повітряному зазорі під башмаками індуктора пронизує площу, що визначається добутком довжини активної частини обмотки якоря  $l$  на полюсний крок  $\tau$

(рис. 2). Його значення можна виразити так:  $\Phi = \int_{x=0}^{\tau} B l dx = l \int_{x=0}^{\tau} B dx$ . (2).

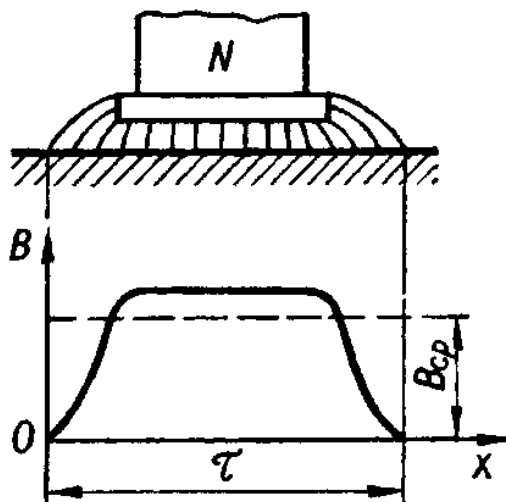


Рис. 2. Розподілення магнітної індукції під полюсами.

Магнітна індукція під полюсами обмоток збудження не зовсім однорідна. Тому введемо поняття середнього значення індукції у повітряних зазорах

$$B_{cp} = \frac{1}{\tau} \int_{x=0}^{\tau} B dx. \text{ Звідки } B_{cp} \tau = \int_{x=0}^{\tau} B dx \quad (3).$$

Підставимо вираз 3 у вираз 2, запишемо значення магнітного потоку, створеного індуктором:  $\Phi = B_{cp} l \tau$  (4).

Де:  $B_{cp}$  – середнє значення індукції магнітного поля;

$l$  – довжина робочої частини витка обмотки якоря,

$\tau$  – полюсна відстань.

Отже, магнітний потік під полюсами індуктора можна вважати однорідним, т.я. у правій частині виразу 4 всі величини постійні, тому середнє значення ЕРС в обмотці якоря

$$E_{cp} = \frac{\Phi}{t} \quad (5).$$

Якщо якір обертається рівномірно, то швидкість руху обмотки відносно магнітних силових ліній  $\vartheta = \frac{\tau}{t}$ , де  $t$  – час, протягом якого робоча частина обмотки опише дугу, що дорівнює полюсному кроку. Виразимо його значення через

частоту обертання якоря двигуна  $n$ :  $t = \frac{\tau}{g} = \frac{\tau}{\pi D} = \frac{\tau}{\pi D n}$ . Підставимо цей вираз у

рівняння 5. При цьому отримаємо значення ЕРС, що індукується в одному витку

якоря двигуна:  $E_{cp} = \frac{\pi D}{\tau} \Phi n$ . Якщо у кожній секції обмотки  $N$  витків, то у стільки ж

разів збільшиться у ній ЕРС.  $E = N E_{cp} = N \frac{\pi D}{\tau} \Phi n$ .

З останнього виразу слідує те, що ЕРС в обмотці якоря прямо пропорційна магнітному потокові статора  $\Phi$  та швидкості обертання якоря  $n$ . Діаметр обмотки якоря  $D$ , кількість витків обмотки  $N$  та полюсний крок  $\tau$  – величини постійні для даної конструкції двигуна. На цій основі перепишемо попередній вираз, замінивши сталі величини постійною величиною  $C$ :

$$\boxed{E = Cn\Phi} \quad (6).$$

Проаналізуємо вираз (6). Якщо механічне навантаження на валу зростає, то його частота обертання  $n$  зменшується, а отже й електрорушійна сила якоря також зменшується (при постійному магнітному потокові  $\Phi$ , створеному індуктором). При цьому ЕРС не врівноважує підведену напругу.

На основі виразу (1) запишемо значення струму якоря

$$I_{я} = \frac{U - E}{R_{я}} \quad (7).$$

З (7) слідує принцип саморегулювання двигуна: при збільшенні навантаження на валу двигуна, його швидкість обертання зменшується, зменшується ЕРС самоіндукції. Так як напруга джерела живлення постійна, а ЕРС зменшується, то зростатиме напруга на якорі, а отже двигун споживає більший струм  $I_{я}$ , зростає обертальний момент до величини гальмівного моменту навантаження.

Порівнюючи ДПС з асинхронним двигуном, видно, що асинхронний двигун при перевантаженні зупинявся, тоді як двигун постійного струму зменшує оберти і розвиває більший крутний момент на валу.

### **3. Регулювання швидкості двигунів паралельного і незалежного збудження.**



З виразу 6 визначимо частоту обертання якоря двигуна постійного струму:

$$n = \frac{E}{c\Phi} \quad (8).$$

З рівняння 1 слідує, що ЕРС для кола якоря  $E = U - R_{\text{я}} I_{\text{я}}$ . Підставимо це значення до попереднього виразу. При цьому отримаємо частоту обертання якоря двигуна:

$$n = \frac{U - R_{\text{я}} I_{\text{я}}}{c\Phi} \quad (9).$$

Отже, швидкість обертання якоря можна регулювати: зміною напруги  $U$ , зміною струму в колі якоря  $I_{\text{я}}$ , зміною струму збудження  $I_{\text{зб}}$ , який створює магнітний потік  $\Phi$ . Найпоширенішим способом регулювання частоти обертання якоря  $n$  є регулювання за допомогою струму збудження.

Фізичний зміст процесу регулювання швидкості за допомогою магнітного потоку можна пояснити так: якщо струм якоря, частоту його обертання та механічне навантаження на валу не змінювати, то при зменшенні магнітного потоку за допомогою реостату  $R_{\text{зб}}$  (рис. 3) зменшиться проти-ЕРС, а отже порушиться електрична рівновага (1). У цей момент в якорі протікатиме більший струм, зросте обертовий момент і він почне обертатися з більшою швидкістю до відтворення електричної рівноваги. Електромагнітний момент зрівноважиться з механічним гальмівним моментом на валу, але при більшій швидкості його обертання.

$I$ , навпаки, при збільшенні магнітного потоку індуктора швидкість обертання якоря зменшиться.

На рис. 4 зображено швидкісну характеристику двигуна з паралельним збудженням.

Не варто занадто збільшувати опір у колі обмотки збудження при невеликих навантаженнях або на холостому ході двигуна, так як у колі якоря зменшиться проти-ЕРС, сила струму сягне великих значень (опір обмотки якоря незначний) і наступить аварійний режим роботи двигуна внаслідок великої швидкості обертання якоря. Така ж ситуація трапляється при обриві в колі обмотки збудження.

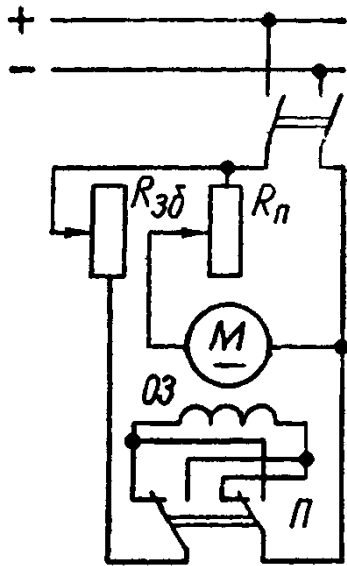


Рис. 3. Схема ввімкнення та реверсування двигуна ПС з паралельним і незалежним збудженням

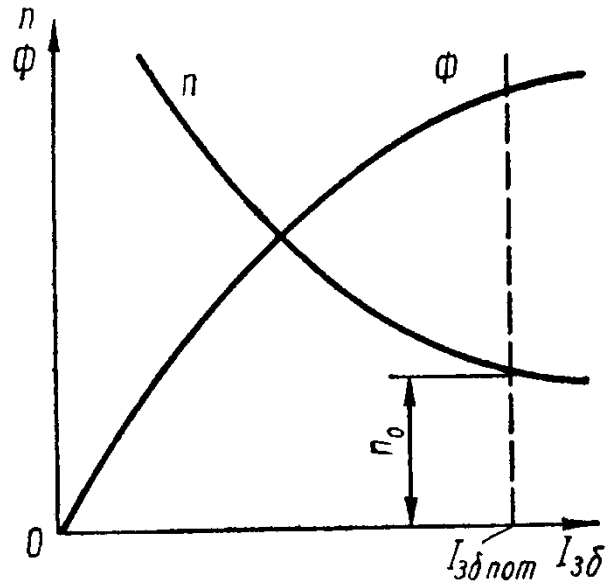


Рис. 4. Характеристика холостого ходу двигуна ПС з паралельним і незалежним збудженням

Іншим способом регулювання швидкості обертання якоря навантаженого двигуна є зміна струму якоря за допомогою опору пускового реостату  $R_n$  (рисунок попередній). При цьому реостат у колі обмотки збудження опором  $R_{зб}$  виводять повністю, або обходяться без нього взагалі. Отже, обмотка збудження знаходиться під номінальною напругою мережі, що забезпечує номінальне значення магнітного потоку індуктора.

Якщо змінити опір реостата у колі якоря, то зміниться в ньому величина сили струму, відповідно до виразу

$$I_{я} = \frac{U - E}{R_{я} + R_n}$$

З виразу слідує, що при зменшенні опору пускового реостату, струм в обмотці якоря зросте, а отже збільшиться електромагнітний момент і швидкість його обертання. Зі збільшенням швидкості зростатиме проти-ЕРС і струм зменшуватиметься до попереднього значення, але уже при більших обертах якоря. Такий спосіб регулювання швидкості не ефективний, так як зазнаються великі втрати електроенергії на потужних реостатах.

Якщо ж опір регулювального реостату та опору в колі збудження не змінювати, то при збільшенні навантаження на валу, швидкість двигуна зменшуватиметься і, навпаки, при зменшенні гальмівного моменту, швидкість

зростатиме.

Регулювання швидкості обертання якоря двигуна можна здійснювати за допомогою напруги в колі якоря, а напруга на індукторі при цьому не змінюється. Цей метод стосується двигунів з незалежним збудженням.

#### 4. Регулювання швидкості двигунів послідовного збудження.

Регулювання швидкості в такого типу двигунах, як і в попередньому випадку, здійснюють трьома способами: струмами у колі якоря та обмотки збудження і напругою живлення.

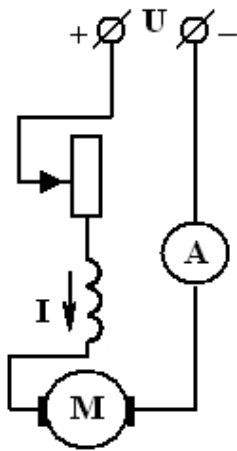


Рис. 5. Схема ввімкнення двигуна з послідовним збудженням.

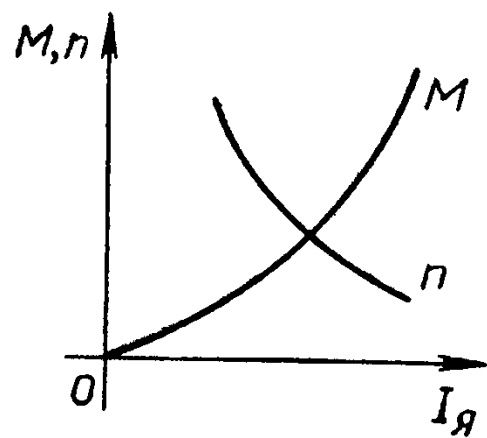


Рис. 6. Швидкісна характеристика двигуна з послідовним збудженням.

Схема двигуна з послідовним збудженням зображена на рис. 5. Конструкція такого двигуна дещо простіша завдяки малій кількості витків товстого дроту в обмотці збудження. Адже вона розрахована на протікання великих струмів навантаження –  $I_{я}$ . Швидкісна характеристика (рис. 6) побудована на основі рівняння:

$$n = \frac{U - I_{я}(R_{я} + R_{зб})}{C\Phi}. \quad (10)$$

З останнього виразу видно, що при зростанні струму навантаження, зростає спад напруги на опорах обмоток (від'ємник у чисельнику) та магнітний потік (у знаменнику) в обмотці збудження. Такі явища призводять до значного зменшення швидкості двигуна.

Навпаки, при малих навантаженнях та холостому ході двигун переходить в аварійний режим роботи.

Очевидно, що швидкісна характеристика двигуна залежить від напруги його живлення. Тому таке регулювання зручно використовувати під час початку руху транспортних засобів.

### 5. Регулювання швидкості двигунів мішаного збудження.

Схема ввімкнення такого типу двигуна зображена на рис. 7. Рівняння швидкості двигуна, відповідно схемі, матиме вигляд:

$$n = \frac{U - I_{я} R_{я}}{C(\Phi_{ш} \pm \Phi_{п})}$$

Де:  $\Phi_{ш}$  – магнітний потік шунтової (паралельної) обмотки збудження;

$\Phi_{п}$  – магнітний потік послідовної обмотки збудження.

Знак “±” вказує на узгоджене та неузгоджене з’єднання обмоток статора.

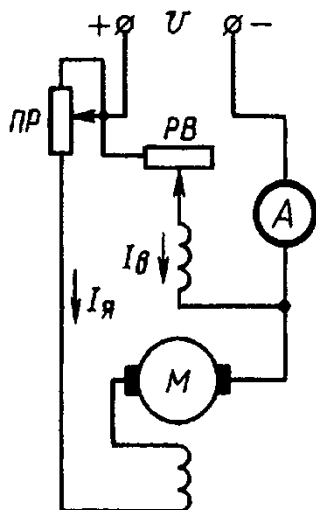


Рис. 7. Схема ввімкнення двигуна зі змішаним збудженням

Залежно від того, яка обмотка у таких двигунів є основною (створює більший магнітний потік), вони, відповідно, наближуються більше до двигунів паралельного або послідовного збудження. Частіше, основною (робочою) є послідовна обмотка, а паралельна – допоміжна.

Завдяки паралельній обмотці двигун не нарощує свою швидкість до безмежно великих величин при холостому ході та малих навантаженнях.

Узгоджене ввімкнення обмоток застосовують тоді, коли виникає потреба у великих пускових моментах, та зміні швидкості при навантаженнях, що змінюються від досить малих значень, починаючи від холостого ходу.

Зустрічне ввімкнення дає можливість отримати постійну швидкість обертання якоря при зміні навантажень. Дійсно, при зростанні навантаження, а

отже струму якоря, зростатиме магнітний потік обмотки якоря, проте зменшиться струм та магнітний потік у шунтовій обмотці і навпаки. Отже, магнітний потік буде відносно стабільним, а отже і швидкість якоря незмінна.

Реверсування двигунів постійного струму здійснюють завдяки зміні напрямку протікання струму в обмотці якоря або обмотці збудження.

## **6. Характеристики двигунів постійного струму.**

Двигуни постійного струму мають характеристики трьох видів: пускові, робочі та регульовальні.

Пускові характеристики визначають параметри двигуна під час пуску, до моменту його роботи в усталеному режимі. Такими основними характеристиками є пусковий струм  $I_n$  та пусковий електричний момент сили  $M_n$ .

Робочі характеристики визначають параметри двигуна при його роботі в усталеному режимі:  $n$  – швидкість обертання якоря;  $M$  – обертовий момент сили;  $I_a$  – струм якоря і  $\eta$  – коефіцієнт корисної дії.

Основними регульовальними характеристиками є зміна швидкості обертання якоря  $n$ , шляхом зміни величини струму (опору) вітки якоря  $I_a$  або струму котушки збудження  $I_{зб}$ . Розглянемо механічні характеристики різних типів двигунів.

На графіках (рис. 8) зображено механічні характеристики двигунів, що відображають залежність швидкості обертання якоря від навантаження  $n = f(M)$ : а – паралельного збудження; б – послідовного збудження; в – мішаного збудження.

З графіків бачимо, що для двигуна з паралельним збудженням, навантаження на валу  $M$  мало впливає на швидкість обертання якоря – пряма майже паралельна до вісі абсцис. Тобто, навіть значні зміни навантаження викликають незначні зміни частоти обертання якоря, що складають всього лиш 3-8% .

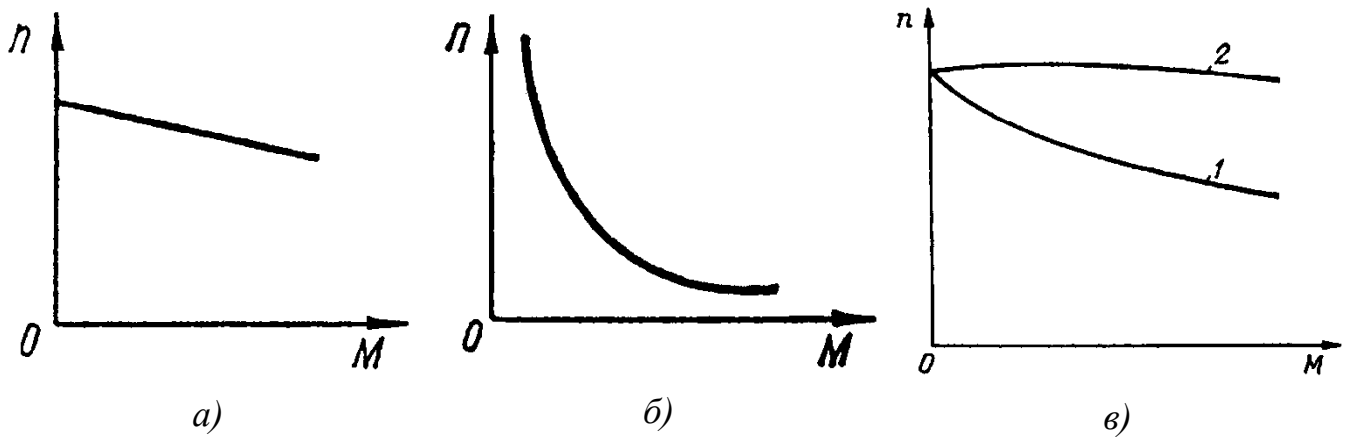


Рис. 8. Механічні характеристики двигунів : а – з паралельним;

б – послідовним; в – мішаним збудженням: 1 – узгоджене увімкнення обмоток якоря та індуктора; 2 – зустрічне увімкнення обмоток.

Для двигунів з послідовним збудженням крива на графіку є жорсткою (рис. 8 б).

При зростанні навантаження на валу, такі двигуни розвивають великий електромагнітний момент при невеликих обертах та порівняно низьких струмах споживання. Тому подібне ввімкнення використовують на початку руху транспорту, при піднятті транспортних засобів на гору тощо

Проміжну м'яку характеристику (рис. 8 в) мають компаундні машини, у яких одна обмотка (частіше послідовна) є основною і створює до 70% магнітного потоку. У переважній більшості випадків обмотки вмикаються узгоджено, що дає можливість застосовувати їх, коли потрібно мати великий пусковий момент та зміну швидкості при змінних навантаженнях на валу, включаючи і холостий хід(рис. 8 в, 1).

Двигуни з зустрічним ввімкненням застосовують тоді, коли є необхідність у постійній швидкості при змінних навантаженнях (рис. 8 в, 2).

Коефіцієнт корисної дії машини  $\eta = \frac{P_2}{P_1 + \Delta P}$ , де:  $P_1$  – потужність, що споживає машина з електромережі;  $P_2$  – корисна потужність на валу двигуна;  $\Delta P$  – власні втрати.

До власних втрат потрібно віднести електричні витрати потужності на: опорі якоря  $-P_{\text{я}} = I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}}$ ; опорі обмотки збудження  $-P_{\text{зб}} = I_{\text{зб}}^2 R_{\text{зб}} + I_{\text{я}}^2 R_{\text{зб}}$  та сталі. Нерухоме магнітне поле відносно обмотки збудження є обертовим відносно

якоря, а отже спричиняються втрати на вихрові струми та гістерезис.

Необхідно врахувати і механічні втрати на вентиляцію та тертя в щітках і підшипниках, що складають 1-4% від номінальної потужності машини.

Додаткові втрати включають магнітні потоки розсіювання полюсних наконечників в сталі тощо. Вони складають біля 1%.

Коефіцієнт корисної дії машини постійного струму приблизно дорівнює 75-95%, а графік залежності коефіцієнта корисної від навантаження на валу та інші характеристики зображено на рис. 9.

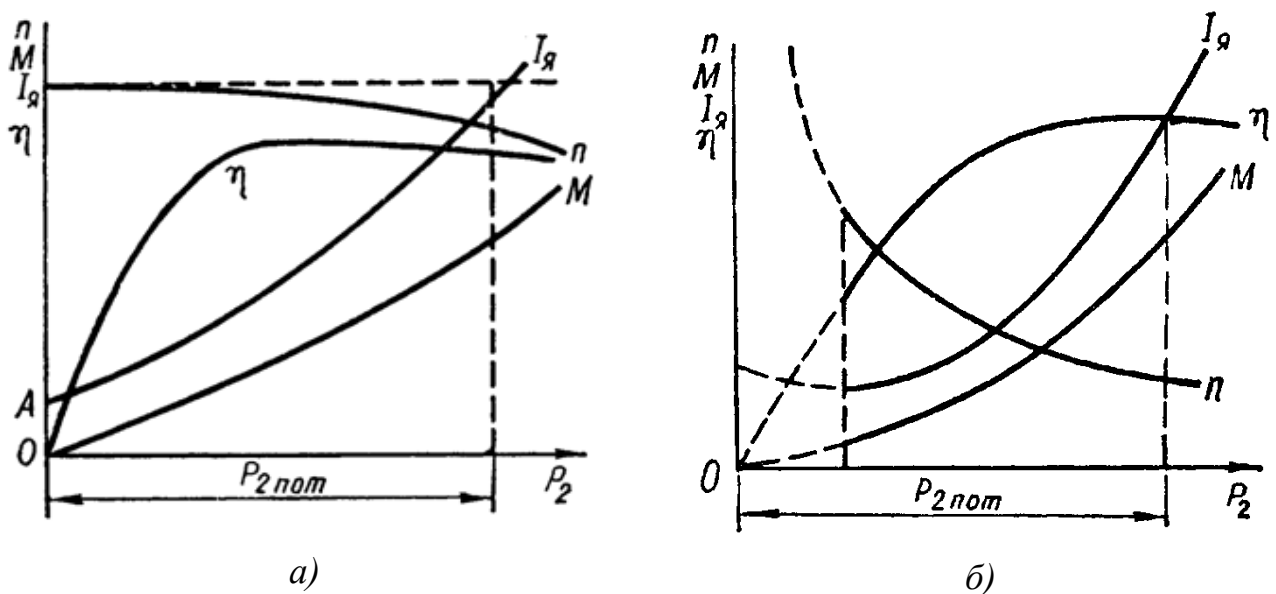


Рис. 9. Робочі характеристики двигунів ПС: а – з паралельним збудженням; б – з послідовним збудженням.

## 7. Однофазні універсальні колекторні електродвигуни.

Універсальні електродвигуни можуть працювати від мережі постійного та змінного струмів. Їх будова подібна до двигунів постійного струму, але сама конструкція дещо ускладнена. На рис. 10 зображено спрощену конструкцію універсального двигуна, що використовується в побутових приладах.

Статор 1 такого двигуна набирають з листової електротехнічної сталі, як і в машинах змінного струму, з тим, щоб запобігти виникненню вихрових струмів. У пази статора вкладають обмотки індуктора 7 (статор має неявно виражені полюси), а також обмотки додаткових полюсів, що компенсують реакцію якоря. Кінці обмотки статора під'єднують до пластин колектора 5, на які подають напругу через графітні щітки, що кріпляться за допомогою щіткотримачів 3. Якір

б обертається в підшипниках, що впресовані в підшипникові щитки 2.

Крім того, в універсальних двигунах рівномірно по периметру станини вкладають ще й компенсуючу обмотку, що послідовно з'єднується з обмоткою якоря, для прямої компенсації магнітного поля якоря та зменшення індуктивного опору двигуна. Така конструкція статора дає можливість підвищити коефіцієнт потужності двигуна  $\cos\varphi$  (максимальне значення – 0,9) та коефіцієнт корисної дії (максимальне значення – 65%).

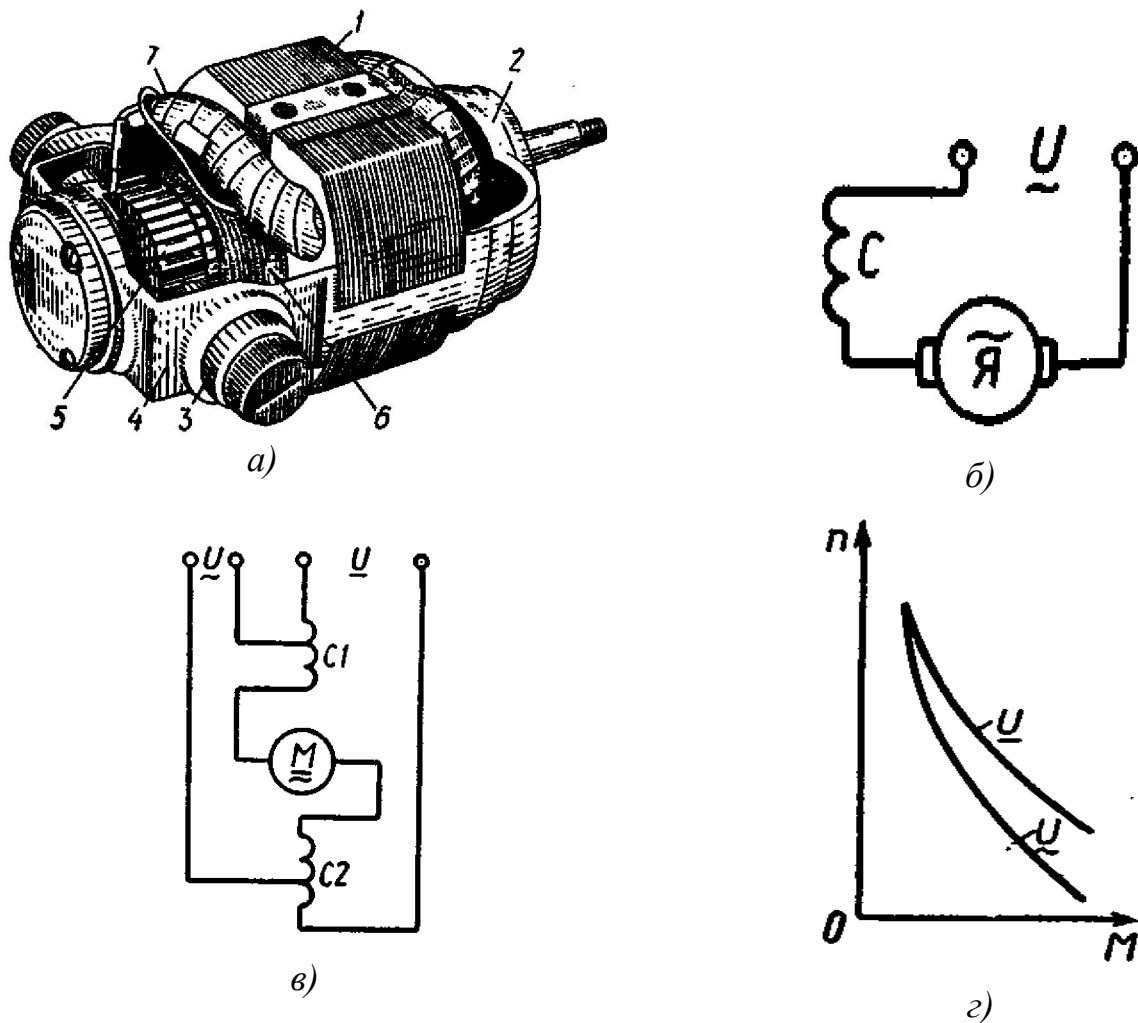


Рис. 10. Будова колекторного універсального електродвигуна: а – технічний малюнок двигуна; б – спрощена схема двигуна; в – електрична схема ввімкнення обмоток двигуна; г – механічні характеристики двигуна.

Двигун працює, як машина постійного струму, з послідовним збудженням і на постійному, і на змінному струмах. При живленні двигуна від мережі змінного струму, на його валу виникає обертовий момент завдяки тому, що напрям струму в обмотках статора та якоря змінюється одночасно.



Якір 6 та колектор 5 універсального двигуна мають ту ж саму конструкцію, що й у машинах постійного струму. Проте колектор має дещо більші розміри порівняно з колектором машини постійного струму. Пояснюється це тим, що універсальні двигуни мають велику кількість секцій в обмотці якоря, а отже і більше число колекторних пластин.

Звичайно, якір двигуна обертається в підшипниках, що розташовані в підшипникових щитах 2, а струм подається на пластини колектора через щітки, що прикріплені в корпусі щіткотримачів.

Найчастіше універсальні двигуни працюють за схемою машини постійного струму з послідовним збудженням (рис. 10 в). На схемі зображено обмотки збудження з двома виводами котушок. При роботі двигуна на змінному струмові, вмикається лише частина котушки, так як опір її буде значно більшим, ніж при ввімкненні двигуна в мережу постійного струму. Дійсно котушка індуктивності для постійного струму чинитиме омичний опір, а для змінного – активний плюс індуктивний опори.

Механічні характеристики зображено на рис. 10 г. З графіка видно, що швидкість обертання якоря можна регулювати за допомогою величини напруги живлення.

Таким чином, колекторні універсальні двигуни змінного струму мають ряд переваг як над машинами постійно струму, так і над асинхронними двигунами. По-перше, в електромережі напруга змінного струму, а тому використання машин постійного струму вимагає спеціальних пристроїв для його випрямлення. По-друге, у таких двигунах, на відміну від асинхронних, можна регулювати частоту обертання ротора. По-третє, їх можна живити як від мережі змінного, так і від джерел постійного струму.

Однофазні універсальні двигуни широко використовуються насамперед у побуті: «пилососи», електродрилі, «болгарки», швейні машини, міксери тощо. Крім того, їх використовують на виробництві, залізниці і т.і.

## Лекція 15. Синхронний генератор.

1. Призначення, будова і принцип дії трифазного синхронного генератора.
2. Робота генератора в режимі ХХ та під навантаженням. Реакція якоря.
3. Паралельна робота синхронних генераторів.
4. Втрати і ККД.

### Література:

Л – 1, с.154 – 180. Л – 2, с. 166 -181. Л – 3, с. 263 – 270.

### 1 Призначення, будова і принцип дії трифазного синхронного генератора.

Синхронною машиною називають електричну машину змінного струму із двох обмоток, одна з яких приєднана до електричної мережі (навантаження генератора) відповідної напруги та частоти (обмотка статора – якор), а інша живиться постійним струмом від окремого джерела або випрямленим струмом самого генератора і створює магнітний потік (обмотка ротора – індуктор). На рис. 1 зображена його схема.

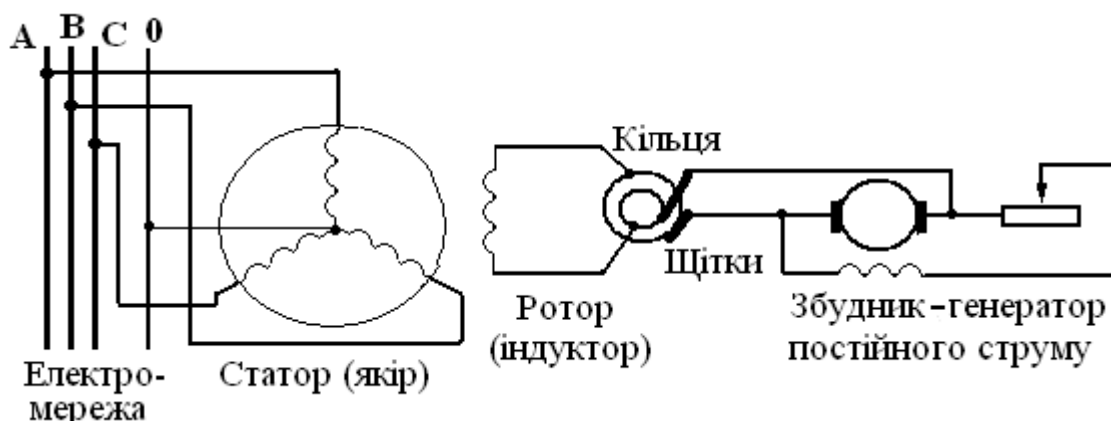


Рис. 1. Схема трифазного синхронного генератора змінного струму.

Синхронні машини можуть працювати в режимах генератора, двигуна та компенсатора. Найбільше розповсюдження вони отримали, як генератори трифазного струму (СТ).

У синхронних генераторах якорем є статор, подібний до статора асинхронного двигуна, а індуктором – рухома частина машини ротор. В обмотках статора індукуються ЕРС у наслідок їх перетину обертовим магнітним полем

ротора. Якщо кількість пар полюсів статора та ротора однакова, то в режимі навантаження обмотками якоря (статора) протікає струм навантаження і при цьому утворюється обертове магнітне поле, частота обертання якого синхронна з частотою обертання ротора.

Залежно від типу первинного двигуна (привода СГ), генератори бувають:

- турбогенератори;
- гідрогенератори;
- дизель-генератори;
- вітрові генератори.

Російський вчений Яблочков вперше використав генератор змінного струму для живлення свічок, який за принципом дії не відрізняється від сучасних синхронних генераторів змінного струму. Кожна обмотка статора живила свою групу свічок.

У 1888р. Доліво-Добровольських побудував перший у світі трифазний генератор потужністю біля 3 кВА.

Сучасні генератори складні автоматичні агрегати великої потужності, що встановлюються на теплових та гідроелектростанціях. На теплових електростанціях індуктори генераторів обертають парові або газові турбіни за рахунок енергії палива. Такі установки називають турбогенераторами. Потужність сучасних турбогенераторів сягає 1000МВт при частоті обертання ротора (індуктора) 3000 об/хв.

Ротори гідрогенераторів обертаються за рахунок привода водяних турбін. Такі машини тихохідні, сягають потужності 200-600Вт, при частоті обертання ротора від 50 до 600об/хв.

У всіх промислових електричних станціях для виробництва електричної енергії застосовують трифазні СГ. Основні складові синхронних генераторів – ротор, статор, збудник.

Ротор – рухома обертова частина машини. Він утворює обертове магнітне поле за рахунок струму збудника – джерела постійного струму через щітки і кільця.

Статор – чавунний корпус, в якому міститься осердя, з листів електротехнічної сталі, ізолюваних між собою. В пазах його розміщують трифазну обмотку.

Ротори бувають двох типів: з явно виявленими та з вмонтованими неявно вираженими полюсами. На рис. 2 а, б схематично зображено однополюсну синхронну машину з різними типами роторів.

Ротори з явно виявленими полюсами, в яких обмотка збудження у вигляді подушок нагадують полюси. Так роблять в тихохідних машинах з великою кількістю полюсів, наприклад в гідрогенераторах.

Ротор з вмонтованими полюсами, у якого обмотка збудження укладається в пази, що фрезерують у суцільному тілі вала. Це забезпечує механічний захист. Її використовують у швидкісних турбогенераторах. Кількість пар полюсів 1, рідше 2 (рис. 3).

Збудник – звичайний генератор постійного струму потужністю 0,25 – 1% від номінальної потужності генератора, розташований на валу синхронного генератора. Малопотужні генератори мають самозбудження – живляться струмом самого генератора, випрямленого через напівпровідникові випрямлячі.

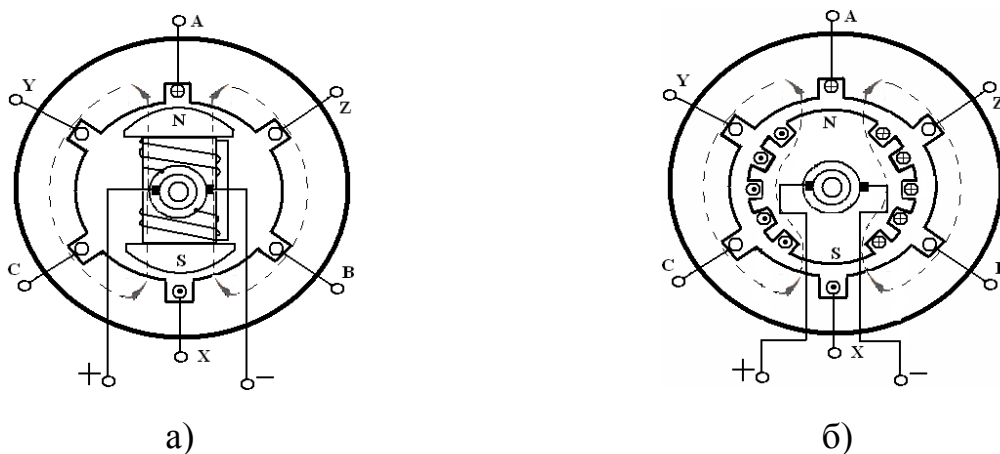


Рис. 2. Схеми синхронних машин: а – з явно вираженими полюсами;  
б – з вмонтованими полюсами ротора.

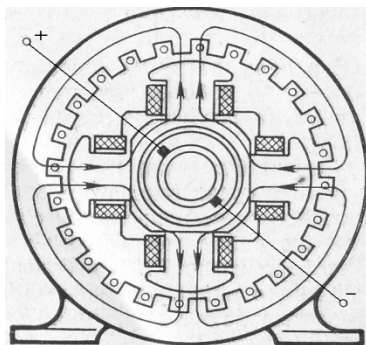


Рис. 3. Схема синхронної машин з дво полюсним явно вираженим ротором.

При обертанні ротора, його магнітний потік наводить в обмотках статора ЕРС:

$$e = -kN \frac{d\Phi}{dt}.$$

Де  $k$  – коефіцієнт зв'язку між обмотками ротора і статора;

$N$  – кількість витків в обмотці статора;

$\frac{d\Phi}{dt}$  – швидкість зміни магнітного потоку відносно обмоток статора.

При рівномірному обертанні ротора з частотою  $n$  обертів за хвилину при  $p$  пар полюсів у ньому, магнітний потік змінюється відносно обмоток ротора періодично (за законом синусів) з частотою  $f = \frac{pn}{60}$ . Виходячи з таких міркувань, аналогічно до асинхронного двигуна, можна отримати діюче значення ЕРС в обмотках статора:  $E = Cn\Phi$ , де  $C$  – постійний коефіцієнт для даної машини.

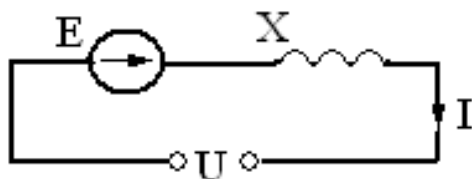


Рис. 4. Принципова схема генератора.

Так як внутрішній опір генератора  $Z$  має незначну активну складову то ним можна знехтувати і вважати опір генератора реактивним, що позначений літерою  $X$  на схемі рис. 4.

На цій основі запишемо II закон Кіргофа:  $E = U + IZ \approx U + IX$ , звідки  $U = E - IX$ . Отже напруга на затискачах генератора менше ЕРС на величину спаду напруги на обмотках генератора.

## 2. Робота генератора в режимі ХХ та під навантаженням. Реакція якоря.

Ротор обертають приводом з постійною швидкістю. Обмотка ротора ввімкнена до збудника, а статор вимкнений від мережі, тому в обмотках циркулює магнітний потік  $\Phi_0$ , що створює ротор.

Векторна діаграма та характеристика генератора в режимі Х.Х. зображено на рис. 5 та рис. 6 відповідно.

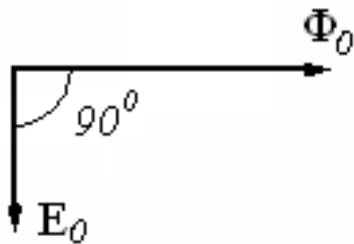


Рис. 5. Векторна діаграма.

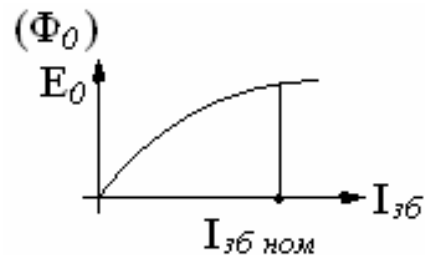


Рис. 6. Характеристики ХХ генератора.

Спочатку доводять до номінального значення оберти ротора, а тоді від збудника на його обмотку подають напругу, поступово збільшуючи  $I_{зб}$  від 0 до номінального значення, при якому магнітний потік  $\Phi_0$  досягає стану насичення.

Режим навантаження. При ХХ магнітний потік у СГ створює лише струм ротора. Проте, якщо увімкнути навантаження у коло статора (якоря), то в ньому появиться струм, який створює своє обертове поле. Очевидно поле якоря ( $\bar{\Phi}_1$ ) та поле ротора (індуктора) ( $\bar{\Phi}_2$ ) обертається з однаковою швидкістю  $n_1 = n_2$ .

Магнітна система СГ має сумарний обертовий магнітний потік  $\Phi = \Phi_1 + \Phi_2$ . Проте магнітне поле статора (якоря) не завжди підсилює магнітне поле ротора, що залежить від характеру навантаження. Вплив магнітного потоку якоря (статора) на основне магнітне поле ротора (індуктора) називають реакцією якоря.

Розглянемо три види навантаження: активне, індуктивне та ємнісне. В усіх трьох випадках розглядається той стан, коли у фазі А-Х струм має максимальне значення ( $i_a = I_m$ ), а потік  $\Phi_a$  – сумарний потік усіх трьох фаз.

Активне навантаження Наведена у фазі ЕРС  $E$  і струм  $I$  будуть мати максимальне значення тоді, коли полюси ротора перетинають обмотки статора,

перебуваючи в положенні, коли магнітні силові лінії замикаються перпендикулярно до лінії, що з'єднує полюси ротора (рис. 7).

Магнітні потоки  $\Phi_{я}$  і  $\Phi_{р}$  обертаються з однаковою частотою, утворюють єдиний магнітний потік  $\vec{\Phi} = \vec{\Phi}_{я} + \vec{\Phi}_{р}$ . Загальний магнітний потік дещо збільшується, а отже ЕРС генератора збільшується (рис. 8).

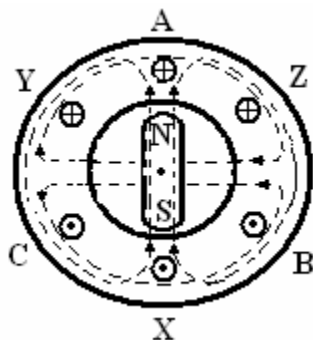


Рис. 7. Розташування магнітних силових ліній потоків якоря і ротора при активному навантаженні.

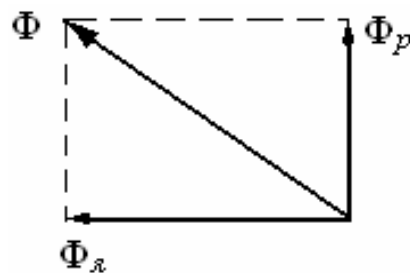


Рис. 8. Векторна діаграма.

Індуктивне навантаження. При індуктивному навантаженні струм у кожній фазі відстає від відповідної ЕРС на  $90^0$ . Отже, струм досягне максимального значення через чверть періоду порівняно з випадком активного навантаження. Тому магнітні потоки статора і ротора направлені зустрічно (рис. 9), і значення загального магнітного потоку зменшується. Воно чисельно дорівнює  $\Phi = \Phi_{р} - \Phi_{я}$  (рис. 10).

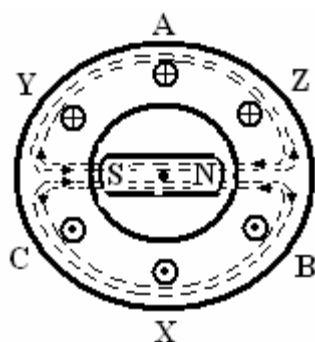


Рис. 9. Розташування магнітних силових ліній потоків якоря і ротора при індуктивному навантаженні.

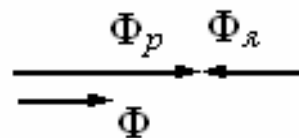


Рис. 10. Векторна діаграма.

Ємнісне навантаження. Струм у фазі АХ має максимальне значення тоді коли магнітні потоки накладаються. При ємнісному навантаженні ЕРС відстає від струму. Результуючий магнітний потік, як видно з рис. 11 дорівнює  $\Phi = \Phi_{р} + \Phi_{я}$ .

Значення загального магнітного потоку збільшилося, що слідує з векторної діаграми (рис. 12). Тобто зміна магнітного потоку призводить до зміни напруги на затискачах генератора, тому на станціях відповідно до змінного навантаження автоматично змінюють струм збудження ( $I_{зб}$ ) в роторі для забезпечення стабільності напруги генератора.

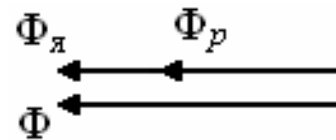
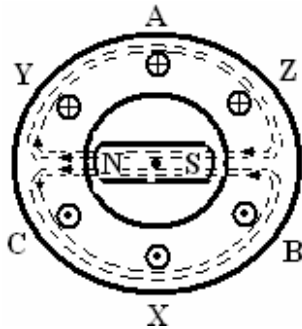


Рис. 11. Розташування магнітних силових ліній потоків якоря і ротора при ємнісному навантаженні.

Рис. 12. Векторна діаграма.

Залежність стуму ротора  $I_{зб}$  від струму з навантаження  $I$  при сталих  $U$  та  $n$  (напруга та швидкість обертання) називають регулювальною характеристикою генератора (рис. 13).

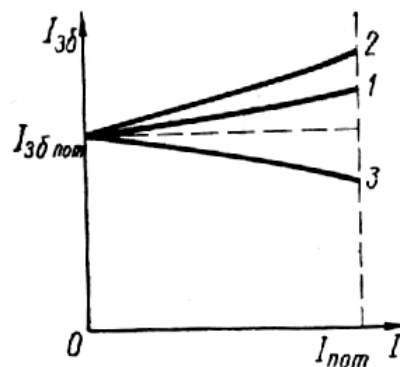


Рис. 13. Регулювальна характеристика синхронного генератора.

Як видно з рис. 13, при активному та активно-індуктивному навантаженнях зі збільшенням струму навантаження  $I$ , струм збудження  $I_{зб}$  також збільшують. При ємнісному навантаженні  $I_{зб}$  зменшують.

### 3. Паралельна робота синхронних генераторів.



Переважає більшість генераторів працюють паралельно на спільні шини, що дає можливість керувати загальною потужністю залежно від необхідності навантаження в мережі.

Для ввімкнення синхронних генераторів на паралельну роботу необхідно:

1. Вирівняти напругу  $U_2$  діючого генератора з напругою мережі  $U_1$ . Тобто, в момент вмикання генератора в електромережу виконується умова:  $U_1 = U_2$ .
2. Напруги генераторів мають співпадати за фазою з напругою мережі, але у протифазі між собою.
3. Частоти генераторів мають бути рівними  $f_1 = f_2$ .
4. Чергування фаз генераторів мають бути однаковими  $A_1B_1C_1$  та  $A_2B_2C_2$ , а отже їх ротори обертаються в одну сторону.

Якщо всі умови виконуються то генератор можна вмикати на паралельну роботу. Векторна діаграма напруг зображена на рис. 14 а.

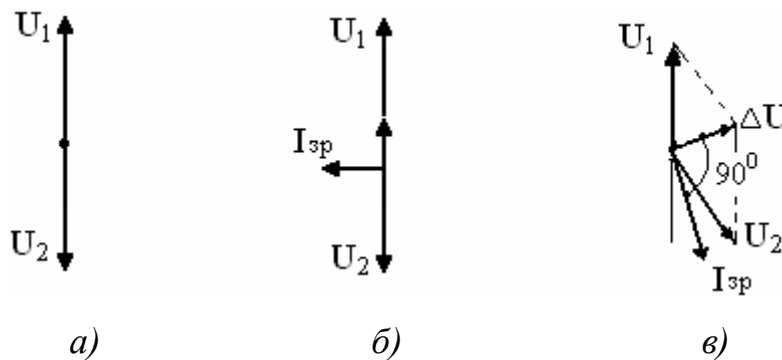


Рис. 14. Векторні діаграми напруг генераторів при паралельному їх увімкненні.

Досягти абсолютних умов увімкнення важко, а тому при порушенні окремих із них виникають певні явища. Наприклад, якщо напруга в мережі і на клеммах генератора неоднакові, то можливі випадки, що зображені на векторних діаграмах (рис. 14 б, в):

При  $U_1 > U_2$  і рівності інших умов, генератор працюватиме в режимі реактивного споживача, оскільки активний опір обмотки незначний. При цьому на клеммах генератора виникає биття напруги  $\Delta U = U_1 - U_2$ , і в його обмотках протікатиме зрівняльний струм  $I_{зр}$ . Цей струм перевантажує обмотки генераторів, не дає можливості використовувати їх на певну потужність і створює додаткові втрати енергій при нагріванні обмоток статора.

Якщо ж напруги однакові, але зсунуті за фазою між собою, то в обмотках також виникатиме зрівняльний струм. Тобто не зрівноважена напруга мережі створить в обмотці генератора зрівняльний струм, що призведе до нагрівання обмоток і відповідно втрат.

Крім того, виникатиме механічний поштовх на ротор у момент вмикання генератора. Дійсно, згідно діаграмі (рис. 14 в) різниця напруг  $\Delta U = U_1 - U_2$  створить зрівняльний струм, який відстає за фазою від напруги  $\Delta U$  майже на  $90^\circ$ . Цей струм майже співпадає за фазою з напругою  $U_2$  генератора. Тобто обмотка генератора буде активним навантаженням для мережі, по ній протече великий зрівняльний струм і на ротор створиться поштовх у напрямку його обертання. І, навпаки, при  $U_2 > U_1$  поштовх виникне у зворотному напрямку. В обох випадках такі поштовхи можуть призвести до аварії.

Усі операції по вмиканню генераторів на паралельну роботу називають синхронізацією. Така операція на сучасних електростанціях виконується автоматично.

Можна синхронізувати роботу генератора й в ручному режимі за допомогою ламп «на згасання» (рис. 15), або «на обертання світла» (рис. 16).

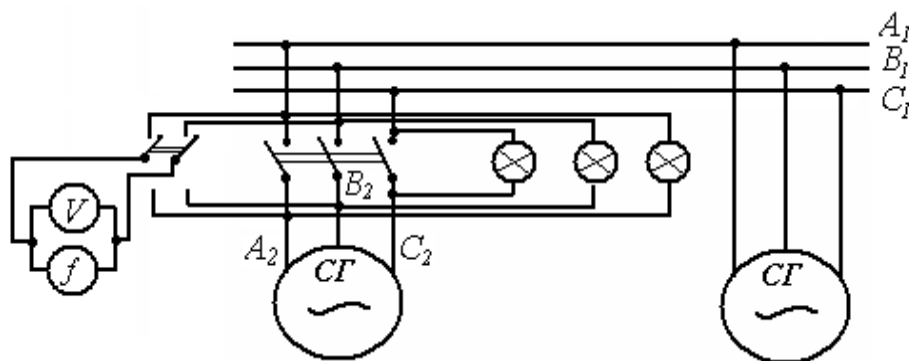


Рис. 15. Синхронізація генераторів методом ламп «на згасання».

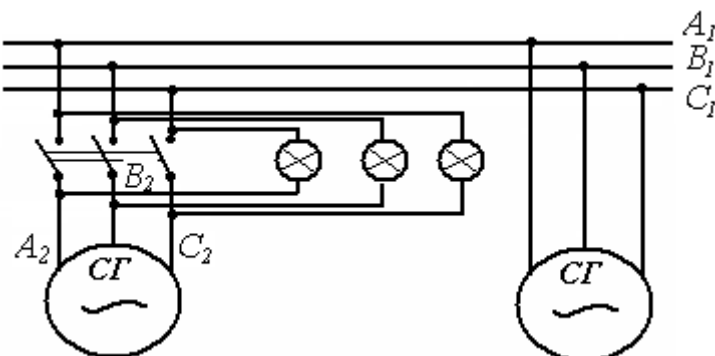


Рис. 16. Синхронізація генераторів методом ламп «на обертання світла».

Метод «на згасання» пояснюється таким чином. Частоту та величину напруги мережі та генератора встановлюємо за допомогою частотоміра і вольтметра відповідно. При співпаданні фаз напруги мережі та генератора лампочки не світяться. Але досягти цього важко, так як зірка фазних напруг мережі і генератора обертаються і зміщуються одна відносно іншою на кут зсуву фаз (рис. 17). Якщо частота напруги генератора більша, то зірка напруг генератора випереджає зірку напруг мережі і навпаки. Але в обох випадках лампочки при цьому світяться. Якщо зсув фаз дорівнює нулю, зірки накладаються, лампочки згасають і в цей момент потрібно вмикати генератор на паралельну роботу.

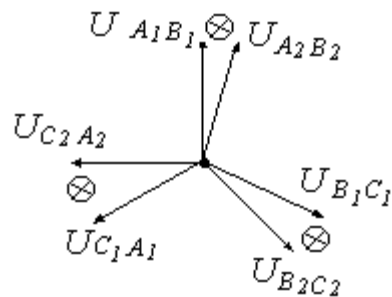


Рис. 17. Векторна діаграма напруг, зміщених за фазою.

При такому методі важко визначити, яка напруга випереджає, тому вмикають генератор по середині між двома спалахами ламп.

Метод «на обертання світла» здійснюють за схемою рис. 16. Частоту і дійсне значення напруги визначають приладами аналогічно попередньому випадку. Але лампи під'єднують по іншому. Так одну із ламп вмикають до однієї фази, у нашому випадку до вузлів  $A_1$  та  $A_2$ . Інші дві лампи до різнойменних.

При частоті обертання ротора генератора, що відповідає частоті напруги і співпаданні фаз три лампочки світяться однаково яскраво. Якщо ротор генератора обертається швидше за частоту напруги в мережі, то лампочки по черзі загоряються і утворюють обертання світла за годинниковою стрілкою. Якщо частота напруги мережі більша частоти обертання ротора, то світло обертається проти годинникової стрілки. Отже цей метод на відміну від попереднього дає змогу спостерігати фазу випередження або відставання ротора, а отже відповідного регулювання.

#### 4. Втрати і ККД СГ

Синхронний генератор перетворює механічну енергію на валу  $P_1$ , яку він отримує від спеціального привода, в електричну –  $P_2$ . При цьому  $P_1 > P_2$ . Втрати генератора складають:  $\Delta P = P_1 - P_2$

Основними втратами генераторів є:

1. Втрати в міді (нагрівання мідних провідників обмоток):

$$P_m = P_{ст} + P_{рот}; \quad P_{ст} = m r I^2; \quad P_{рот} = r I^2 \text{ збуд.}$$

Де:  $P_m$  – потужність втрат в фазі;

$P_{ст}$  – потужність втрат статора;

$P_{рот}$  – потужність втрат ротора;

$m$  – число фаз обмотки;

$r$  – опір обмотки;

$I$  – струм статора (збудження).

2. Магнітні втрати, або втрати в сталі на перемагнічування (на гістерезис) –  $P_2$  визначають лише в осерді статора. Вони не залежать від навантаження. В роторі ці втрати дорівнюють нулю бо поле статора обертається синхронно з ротором і не перетинає осердя ротора.

3. Механічні втрати –  $P_{мех}$  виникають у наслідок тертя в підшипниках та між щітками і кільцями колектора. Вентиляційні втрати у швидкісних генераторах значні, у зв'язку з прокачуванням повітря для охолодження. З метою їх зниження, у якості охолоджувача використовують водень, густина якого в 14,5 рази менша від густини повітря. Крім того водень має високу теплопровідність у 7,4 рази більшу повітря.

Отже сумарні втрати  $\sum P = P_m + P_{ст} + P_{рот} + P_{мех}$ .

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P} = \frac{3UI \cos \varphi}{3UI \cos \varphi + \sum P}$$

Для середніх за потужністю генераторів ККД складає 0,94-0,96, а для великопотужних – 0,98 – 0,99.

ККД залежить від навантаження генератора (рис. 18).

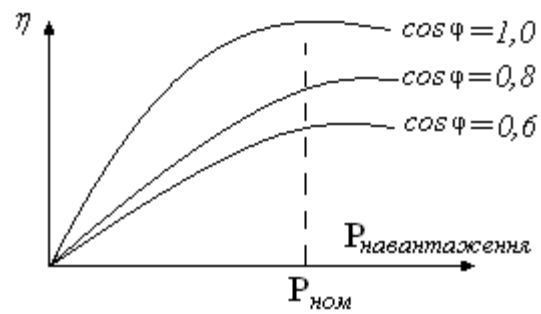


Рис. 18. Графіки залежностей ККД генератора від навантаження.

ККД зменшується зі зменшенням активної складової струму навантаження

$P_{\text{навантаження}}$ .

## Лекція 16. Синхронні двигуни (СД).

- 1 Призначення, будова і принцип дії синхронного двигуна.
- 2 Способи пуску та зупинки синхронних двигунів.
- 3 Вплив струму збудження на роботу СД.
- 4 Синхронний компенсатор.

### Література:

Л-1, с.154-180. Л – 2, с. 166-181. Л – 3, с. 263-270.

### 1. Призначення, будова і принцип дії синхронного двигуна.

За будовою синхронний генератор майже не відрізняється від синхронного двигуна. Статори практично ідентичні, дещо різняться їх ротори.

За принципом дії вони відрізняються тим, що в СГ ведучою ланкою є ротор, вісь магнітного потоку якого випереджає вісь потоку статора на деякий кут, а в СД – навпаки – обертове магнітне поле статора веде за собою магнітне поле ротора і сам ротор.

Якщо підвести до ротора постійну напругу, а до обмоток статора трифазний змінний струм, то взаємодія магнітних полів і струмів виникне обертовий магнітний момент. Проте ротор залишається нерухомим, він отримає 100 поштовхів за секунду і лише вібруватиме (рис. 1а).

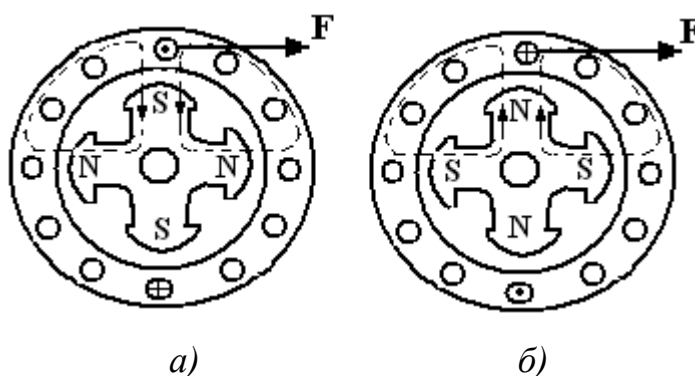


Рис. 1. Схематичне зображення принципу дії СД.

Отже, щоб момент діяв на ротор завжди в одну сторону, його перед цим необхідно розкрутити, щоб він обертався як електромагніт з полюсами постійного магнітного поля з такою швидкістю, щоб період його обертання відповідав зміні напрямку струму в кожній обмотці. Наприклад, коли струм в обмотці

направлений до спостерігача, то обертовий момент діє у напрямку годинникової стрілки рис. 1 а. Через  $\frac{1}{4}$  періоду струм протікатиме від спостерігача рис. 1 б, але й полюс ротора проти неї буде південним і механічний момент діятиме у тому ж напрямку.

В цьому випадку ротор буде обертатися і може виконати механічну роботу, якщо його попередньо розкрутити до частоти обертового магнітного поля у статорі. Тобто машина буде перетворювати електричну енергію в механічну.

СД отримали застосування, як двигуни великої потужності (більше 100 кВт) при невеликих швидкостях: прокатні стани, насоси, холодильні машинки, вентилятори, тощо.

## 2. Способи пуску та зупинки синхронних двигунів.

Просте ввімкнення синхронних двигунів у мережу неможливе. Є два способи його пуску – синхронний та асинхронний.

Синхронний спосіб запуску двигуна полягає в тому, що його ротор попередньо розкручують до синхронних обертів з магнітним полем статора іншим спеціальним двигуном – це може бути асинхронний двигун або двигун постійного струму потужність якого складає близько 10% потужності СД.

Розкрутивши ротор СД до номінальних обертів, вводять збудження і лише тоді вмикають напругу до статора. Після входження двигуна в синхронний режим роботи його навантажують. Недоліком цього способу є складність й висока вартість за рахунок введення додаткового двигуна і пристроїв синхронізації.

Асинхронний спосіб запуску відмінний від попереднього тим, що не використовують спеціальний двигун для розкручування ротора. Синхронний двигун запускають як асинхронний. Для цього у полюсні наконечники (башмаки) ротора вкладають пускову обмотку (рис. 2).

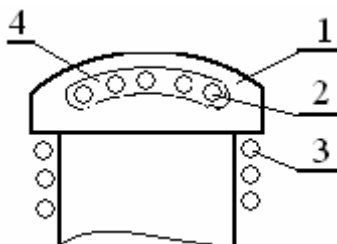


Рис. 2. Пускова обмотка СД: 1 – полюсний башмак;

2 – стержні асинхронної обмотки; 3 – обмотка ротора;

4 – пластина закорочення стержнів.

Взаємодія обертового потоку статора та струму, що індукується в пусковій обмотці ротора приводить ротор в обертовий рух, подібно до принципу дії асинхронного двигуна.

Під час пуску в основній обмотці ротора індукується ЕРС, якщо ротор розімкнутий, то величина  $E$  може бути досить великою. Це явище необхідно враховувати при виготовленні ізоляції і забезпеченні захисту обслуговуючих такі машини людей. Тому в коло збудження вмикають додатковий опір  $R$ , щоб зменшити цю напругу на клеммах двигуна (рис. 3). Крім того, обмотка ротора, ввімкнена на активний опір, працює як додаткова асинхронна, а тому створює додатковий пусковий момент, що полегшує запуск двигуна.

Для асинхронного пуску СД великої потужності застосовують знижену напругу через автотрансформатори або реактори.

Для зупинки СД спочатку зменшують струм збудження до значення, що відповідає мінімальному струму обмоток статора, потім вимикають статор зовсім і тільки після цього вимикають коло збудження.

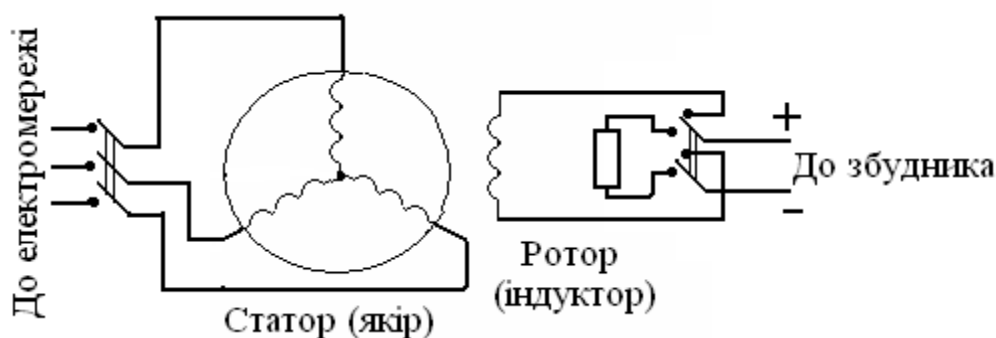


Рис. 3. Електрична схема синхронного двигуна.

Якщо цього порядку не дотримуватися (наприклад, вимкнення кола збудження здійснити раніше вимкнення статора), то це призведе до надмірного збільшення напруги в роторі (в обмотці збудження).

### 3. Вплив струму збудження на роботу СД.

З попереднього відомо, що асинхронні двигуни, трансформатори для мають активно-індуктивний опір, саме індуктивна складова створює значне реактивне навантаження для електромережі. Характерною особливістю СД є його здатність



працювати при будь-якому коефіцієнті потужності, навіть при  $\cos \varphi = 1$ . Роботу двигуна в режимах ємнісного, активного та індуктивного навантаження можна здійснити регулюванням величини струму збудження. Розглянемо це явище детальніше.

Запишемо рівняння електричної рівноваги для кола обмотки статора, зображеної на схемі (рис. 4):

$$\begin{aligned} \bar{E} &= \bar{U} - \bar{I}x_l \\ \bar{U} &= \bar{E} + \bar{I}x_l \end{aligned} \quad (1)$$

Де:  $U$  – напруга на затискачах двигуна, або напруга в мережі;

$E$  – проти-ЕРС, що виникає в обмотці статора завдяки перетину її магнітним полем ротора;

$\bar{I}x_l$  – спад напруги на реактивному опорі статора.

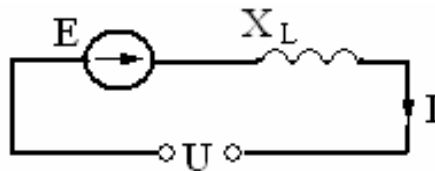


Рис. 4. Електричне коло обмотки статора.

Побудуємо векторну діаграму для синхронного двигуна (рис. 5) при певному значенні струму збудження і незмінній величині навантаження на валу. Відкладемо значення напруги  $U$  по вертикальній вісі. Очевидно у двигуні, на відміну від генератора, електрорушійна сила  $E$  буде дещо відставати від напруги  $U$ . Тобто, магнітне поле ротора відставатиме від обертового поля статора, наприклад на кут  $\theta$ . Нехай кут зсуву фаз на клеммах двигуна між струмом і напругою  $\varphi$ , тоді кут між ЕРС і струмом матиме певне значення і позначимо його через кут  $\psi$ . Вектор спаду напруги на реактивному опорі статора  $\bar{U}_l = \bar{I}x_l = \bar{U} - \bar{E}$  та сполучає кінець вектора ЕРС з кінцем вектора напруги і буде розташований на діаграмі під прямим кутом до вектора сили струму  $\bar{I}$ .

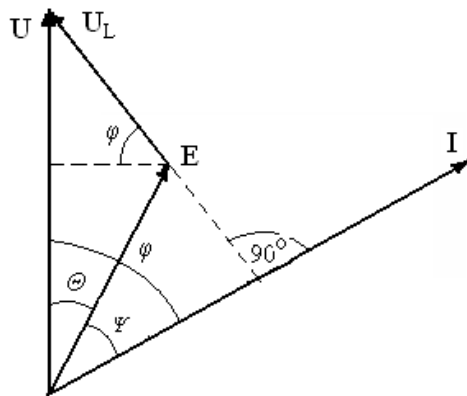


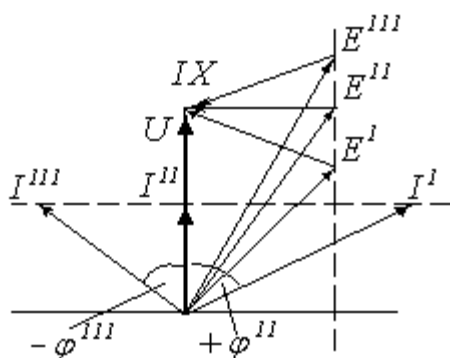
Рис. 5. Векторна діаграма СД.

З векторної діаграми слідує таке рівняння:  $U_L \cdot \cos\varphi = IX_L \cos\varphi = E \sin\Theta$ .

Звідки:

$$I \cos\varphi = \frac{E}{X_L} \sin\Theta. \quad (2)$$

Побудуємо векторну діаграму для СД при різних струмах збудження (рис. 6). Для цього відкладемо уздовж вертикальної вісі вектор підведеної до двигуна напруги  $U$ . Нехай навантаження на валу двигуна постійне, тобто механічна потужність не змінюється, то й споживана з мережі активна складова електричної потужності теж постійна. Тобто споживана двигуном активна потужність  $p = 3UI \cos\varphi = const$ . Так як напруга в мережі та механічне навантаження на валу не змінюються, то добуток  $I \cos\varphi$  є величина постійна.



Перезбудження    Недозбудження

Рис. 6. Векторна діаграма СД при різних струмах збудження.

Добуток споживаного струму  $I$ , помноженого на коефіцієнт потужності  $\cos\varphi$  на векторній діаграмі є проекцією вектора струму на вертикальну вісь, на якій розташована напруга. До того ж проекція  $I \cos\varphi$  при постійному механічному навантаженні буде постійною, а тому обмежена прямою лінією О-О при різних значеннях струму збудження  $I_{36}$ . Очевидно, стабільність добутку  $I \cos\varphi$  можлива

лише при зміні коефіцієнта потужності, а отже кута зсуву фаз  $\varphi$  між споживаним струмом  $I$  та напругою  $U$ .

Скориставшись рівнянням рівноваги  $\bar{E} = \bar{U} - \bar{I}x_l$ , побудуємо значення ЕРС в обмотці статора. Очевидно електрорушійна сила, проєктована на горизонтальну вісь  $E \sin \Theta$ , буде константою, що слідує з виразу 2, а тому значення вектора ЕРС обмежені лінією  $N-N$ . Дійсно, величина напруги в мережі стабільна, а добуток  $\bar{I}x_l$  при незмінному струмові збудження теж постійний, що слідує з попереднього.

Змінюючи струм збудження, зростатиме проти-ЕРС в обмотці статора, відповідно зміниться сила струму та реактивна складова напруги в статорі. Активна складова напруги на обмотці статора незначна, так як вона намотана мідним дротом з малим активним опором. Сума ЕРС та спад напруги на реактивному опорі дають значення напруги на затискачах двигуна відповідно виразу:  $\bar{U} = \bar{E} + \bar{I}x_l$ .

Особливий інтерес викликає зміна струму якоря при зміні струму збудження. Отже, при малому струмові  $I_{z\delta}$  значення ЕРС  $E'$  струм якоря –  $I'$ , зсув фаз між струмом та напругою якоря –  $\varphi_1$ . Збільшивши струм збудження, можна отримати струм якоря  $I''$ , ЕРС –  $E''$ , кут зсуву фаз  $\varphi''=0$ . При подальшому зростанні струму збудження можна досягти від'ємного значення кута зсуву фаз  $\varphi''' < 0$ . Тобто двигун працюватиме в режимі ємнісного навантаження, коли струм якоря випереджає напругу. Отже в режимі перезбудження двигун покращує коефіцієнт потужності в електромережі.

Робочими характеристиками СД є такі залежності:

$$\eta, n, M, \cos\varphi = f(P_2).$$

Де:  $n$  – частота обертання ротора;

$\cos\varphi$  – коефіцієнт потужності;

$M$  – обертальний момент на валу двигуна;

$\eta$  – ККД;

$P_2$  – навантаження на валу двигуна.

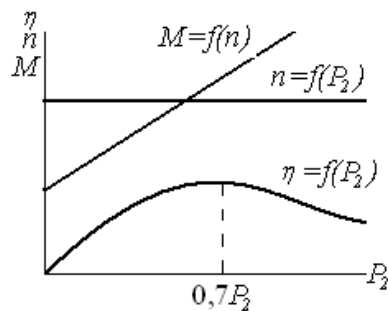


Рис. 7. Характеристики СД.

З графіка слідує стабільність обертів ротора при зміні навантаження, отже СД використовують там де потрібні стабільна частота, наприклад в кінопроекторах, магнітофонах тощо.

Обертальний момент  $M$  зростає прямо пропорційно навантаженню, і починається не з нуля, тому що при відсутності навантаження на валу електромагнітний момент іде на перемагання втрат ХХ.

Ну і остання характеристика вказує на те, що при завантаженості двигуна на 70% коефіцієнт корисної дії найбільший. Для сучасних двигунів він сягає 90-97%.

#### 4. Синхронний компенсатор.

Синхронний компенсатор – це синхронний двигун, що працює без навантаження в режимі перезбудження (режим ємнісного реактивного навантаження для мережі). Основне його призначення – поліпшення коефіцієнта потужності в електромережі.

На векторній діаграмі зображено явище компенсації індуктивного навантаження мережі за допомогою компенсатора. Якщо порівняти синхронний компенсатор з батареями конденсаторів, що використовують з метою покращення коефіцієнта потужності мережі, то компенсатори значно дешевші і мають менші габарити при тій же потужності.

Компенсатори працюють без навантаження на валу, а тому їх виготовляють легшими від двигунів. Обмотка збудження має товстіший діаметр дроту для забезпечення тривалої його роботи та охолоджуються гелієм, густина якого менша від густини повітря, атому він чинить менший опір для вентилятора.

Промисловість випускає і використовує синхронні компенсатори потужністю від 1000 до 75000 кВА з різною напругою живлення і частотою обертання.

# Розділ 2. ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ

Зразок звіту лабораторної роботи

Лабораторна робота №

**Тема:** Дослідження нерозгалуженого електричного кола змінного струму.

**Мета:** навчитися визначати основні параметри електричного кола при активному, реактивному та активно-реактивному навантаженнях.

1. Один і той же провідник матиме різні значення опору залежно від характеру струму, що протікає по ньому. У колах змінного струму провідник матиме більше значення опору, ніж у колах постійного струму завдяки поверхневому ефекту. У першому випадку опір називають активним і позначають літерою  $r$ , у другому випадку – омичним і позначають літерою  $R$ . При частоті електричного струму  $f = 50 \text{ Гц}$ . згадані опори суттєво не відрізняються, а тому їх різницю не враховують.

2. Величина напруги, прикладеної до не розгалуженого кола змінного струму, визначатиметься так:

$$\vec{U} = \vec{U}_A + \vec{U}_L + \vec{U}_C; \quad U_a = Ir; \quad U_L = IX_L; \quad U_C = IX_C$$
$$U = \sqrt{U_A^2 + (U_L - U_C)^2}; \quad U = I \cdot Z; \quad \cos \varphi = \frac{U_a}{U}; \quad U = \frac{P}{I \cos \varphi}$$

3. Величину повного опору нерозгалуженого кола визначають таким чином:

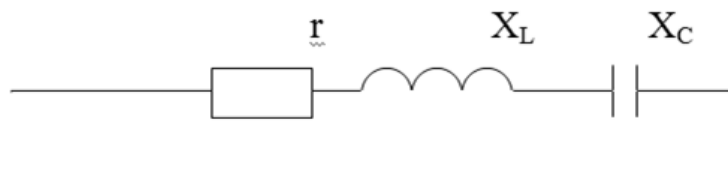
$$Z = \sqrt{r_A^2 + (X_L - X_C)^2}; \quad Z = \frac{U}{I}; \quad Z = \frac{r_A}{\cos \varphi}; \quad Z = (X_L - X_C) \sin \varphi$$

4. Резонанс напруг у нерозгалуженому колі виникає при умові, коли індуктивний опір  $X_L$  дорівнює ємнісному опору  $X_C$ . При цьому:

$$Z = r; \quad \cos \varphi = 1; \quad U_L = U_C; \quad U = U_A; \quad f_{\text{рез}} = \frac{\pi}{2} \sqrt{LC}$$

а величина струму в колі набуває максимального значення.

5. Задача:  $U=100$  В;  $r = 8$  Ом;  $X_L=10$  Ом;  $X_C = 4$  Ом;  $f = 50$  Гц.



1. Повний опір кола:  $Z = \sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2} = 8 + (10 - 4) = 10$  Ом.

2. Струм у колі:  $I = \frac{U}{Z} = \frac{100}{10} = 10$  А.

3. Коефіцієнт потужності в колі:  $\cos \varphi = \frac{r}{Z} = \frac{8}{10} = 0,8$ .

4. Активна потужність кола:  $P = U \cdot I \cdot \cos \varphi = 100 \cdot 10 \cdot 0,8 = 800$  Вт.

5. Реактивна потужність кола:  $Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi = 100 \cdot 10 \cdot 0,6 = 600$  Вт.

6. Повна потужність кола:  $S = U \cdot I = 1000$  ВА.

7. Падіння напруги на окремих ділянках кола:

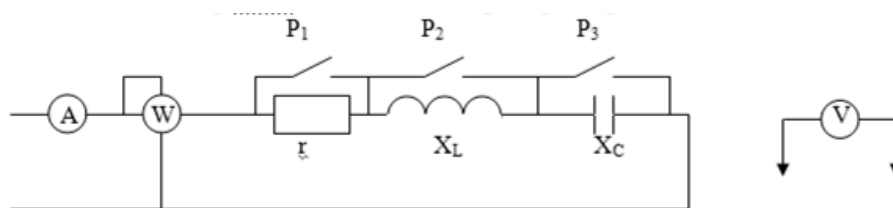
$$U_A = I \cdot r = 10 \cdot 8 = 80 \text{ В}, \quad U_L = I \cdot x_L = 10 \cdot 10 = 100 \text{ В}, \quad U_C = I \cdot x_C = 10 \cdot 4 = 40 \text{ В}.$$

8. Резонансна частота:  $f_p = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,031 \cdot 0,0008} = 30$  Гц.

9. Індуктивність катушки:  $L = \frac{x_L}{2\pi f} = \frac{10}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,031$  Гн.

10. Ємність конденсатора:  $C = \frac{1}{2\pi f x_C} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 4} = 8 \cdot 10^{-3}$  Ф.

**Електрична схема до лабораторної роботи**

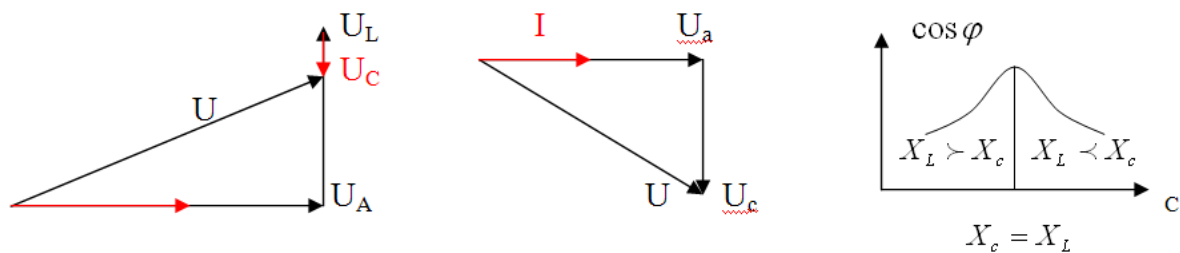


**Результати вимірів та розрахунків**

| У В І М К Н Е Н О  |          |         |             |                     |                         |                                  |      |      |
|--------------------|----------|---------|-------------|---------------------|-------------------------|----------------------------------|------|------|
|                    | Резистор | Котушка | Конденсатор | Резистор та котушка | Резистор та конденсатор | Резистор, котушка та конденсатор |      |      |
| U(В)               | 44       | 44,4    | 44,8        | 43,6                | 44                      | 44,6                             | 42   | 42,8 |
| U <sub>A</sub> (В) | 41,2     | —       | —           | 5,2                 | 35,6                    | 4,7                              | 11,5 | 40,4 |

|                              |       |       |       |       |        |       |       |       |
|------------------------------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|
| $U_L(\text{В})$              | –     | 43,2  | –     | 36    | –      | 34    | 30    | 27,6  |
| $U_C(\text{В})$              | –     | –     | 44    | –     | 20     | 2,5   | 7,3   | 28    |
| $I(\text{А})$                | 0,44  | 0,48  | 0,81  | 0,08  | 0,38   | 0,075 | 0,09  | 0,07  |
| $P(\text{Вт})$               | 17,5  | 5     | 1     | 2,5   | 14,5   | 2,5   | 2     | 1,5   |
| $\cos\varphi$                | 0,94  | 0,23  | 0,03  | 0,72  | 0,81   | 0,8   | 0,52  | 0,5   |
| $\sin\varphi$                | –     | 0,97  | 0,97  | 0,71  | 0,45   | 0,75  | 0,54  | 0,01  |
| $r(\text{Ом})$               | 93,64 | 2,5   | –     | –     | 93,68  | 58,75 | 127,7 | 577,1 |
| $X_C(\text{Ом})$             | –     | –     | 54,32 | –     | 52,63  | 33,3  | 81,1  | 400,0 |
| $X_L(\text{Ом})$             | –     | 90    | –     | 450,0 | –      | 453,3 | 333,3 | 394,2 |
| $Z_{\text{кола}}(\text{Ом})$ | 100,0 | 92,5  | 55,3  | 545,0 | 115,79 | 554,6 | 466,6 | 611,4 |
| $Q(\text{Вар})$              | –     | 20,1  | 35,5  | 2,48  | 7,56   | 2,34  | 2,04  | 0,03  |
| $S(\text{ВА})$               | 19,36 | 21,31 | 35,64 | 3,49  | 16,72  | 3,12  | 3,78  | 3,00  |

Діаграма



**Висновки:** Зі збільшенням ємності в нерозгалуженому колі змінного струму коефіцієнт потужності збільшується. Наявність резонансу напруги можна виявити при співвідношенні спадів напруг –  $U_L=U_C$ .



## Лабораторна робота № 1

### Дослідження законів для розрахунку електричних кіл

**Мета:** Дослідним шляхом перевірити справедливість законів розрахунку електричних кіл за допомогою програми EWB.

#### *Робоче завдання*

1. Дослідити параметри електричних кіл постійного струму з послідовним, паралельним та мішаним з'єднаннями резисторів.
2. Дослідити закони Кірхгофа.

#### *Програма підготовки до виконання завдання*

1. Опрацювати теоретичні відомості за літературою:
  - Основна: Л-3, с. 1-26; Лекції – 2;3.
  - Додаткова: Л-9, с. 45-60; Л-13, с. 23-60.
2. Виконати письмово такі завдання:
  - 2.1. Дати визначення поняття ЕРС, напруги, сили струму, опору провідника.
  - 2.2. Назвати джерела постійного струму.
  - 2.3. Перерахувати способи з'єднання споживачів електричного струму.
  - 2.4. Сформулювати і записати закони Ома і Кірхгофа для розрахунку електричних кіл.
- 2.4. Пояснити і записати до звіту основні методи розрахунку параметрів електричних кіл постійного струму.

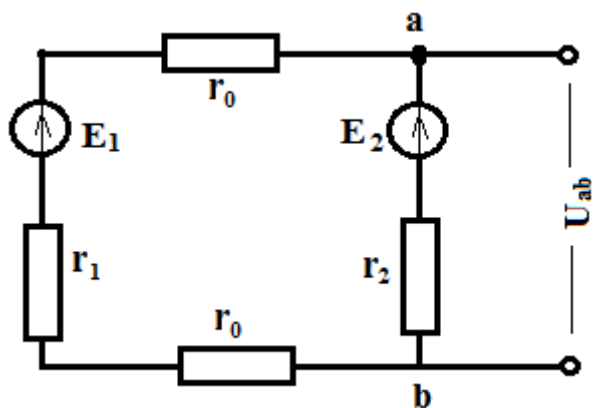


Рис.1. Схема до задачі.

**Задача 1.** Для кола, зображеного на схемі (рис. 1), визначити величину е.р.с.  $E_2$ , якщо  $E_1=100\text{В}$ ,  $U_{ab}=50\text{В}$ ,  $r_0$  взяти з таблиці 1, а значення  $r_1=r_2$  у два рази менше.

Таблиця 1.

|   | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 |
|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| А | 20 | 22 | 24 | 26 | 27 | 28 | 30 | 32 | 34 | 36 |
| Б | 30 | 32 | 34 | 36 | 37 | 38 | 40 | 42 | 44 | 46 |
| В | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 |

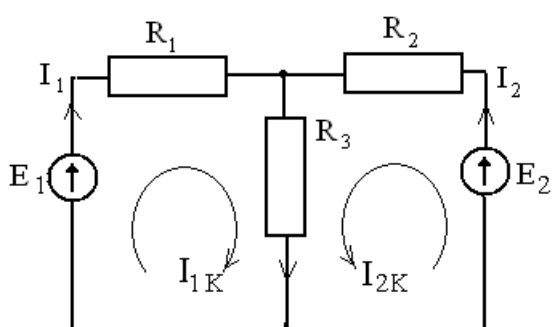


Рис. 2. Схема до задачі.

**Задача 2.** Для кола, зображеного на схемі (рис. 2), визначити струми у кожній вітці, якщо  $E_1=E_2=100\text{В}$ ,  $R_3$  взяти з попередньої таблиці, а значення  $R_1=R_2$  у два рази більше. Розв'язати задачу двома способами - за законами Кірхгофа та методом контурних струмів.

Особливості правил техніки безпеки

1. Під час роботи не можна встановлювати електровимірювальні прилади один на одного, їх робоче положення повинно відповідати вимогам, що вказані на шкалі.
2. Уважно стежити за показами приладів при регулюванні напруги (сили

струму), щоб не перевищити межу вимірювання приладу.

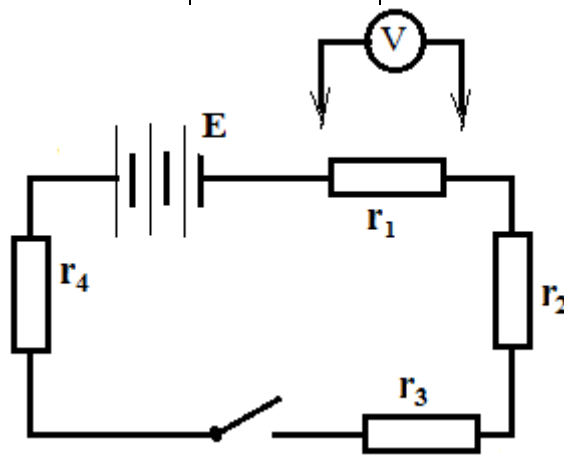
**Методичні рекомендації до виконання завдання**

**1. Послідовне з'єднання резисторів.**

Скласти віртуальне електричне коло за схемою (рис. 3). Виміряти спади напруг на окремих ділянках, а також спад напруги на всій зовнішній ділянці кола, дані записати в таблицю 2. Дослід повторити тричі, при різних значеннях напруги. Зробити висновок щодо додавання спадів напруг при послідовному з'єднанні провідників і записати його до звіту.

*Таблиця 2.*

| №<br>п/п | $U_1$ | $U_2$ | $U_3$ | $U_4$ | $U$ | $U_{\Sigma}$ |
|----------|-------|-------|-------|-------|-----|--------------|
|          |       |       |       |       |     |              |



*Рис. 3.*

**2. Паралельне з'єднання резисторів.**

Скласти віртуальне електричне коло за схемою (рис. 4). Записати до таблиці 3 значення струмів та опорів резисторів кожної вітки та сумарний струм у колі. За даними таблиці 3 розрахувати сумарний опір кола  $R$ .

Записати висновок щодо додавання струмів при паралельному з'єднанні резисторів.

*Таблиця 3*

| №<br>п/п | $I_1$ | $I_2$ | $I_3$ | $I_4$ | $R_1$ | $R_2$ | $R_3$ | $R_4$ | $R$ |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|
|          |       |       |       |       |       |       |       |       |     |

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|

Не змінюючи електричного кола, виміряти спади напруг на окремих ділянках, а також спад напруги на всій зовнішній ділянці кола; дані записати в таблицю 4. Порівняти значення спадів напруг на паралельних вітках.

Розрахувати спад напруги  $U$  на зовнішній ділянці кола за формулою  $U = I_1 R$ . Порівняти розраховану напругу  $U$  з виміряною на клеммах джерела струму  $U_{ab}$ .

Таблиця 4

| №<br>п/п | $U_{bb'}$ | $U_{cc'}$ | $U_{dd'}$ | $U_{ab}$ | I | $U = IR$ | U |
|----------|-----------|-----------|-----------|----------|---|----------|---|
|          |           |           |           |          |   |          |   |

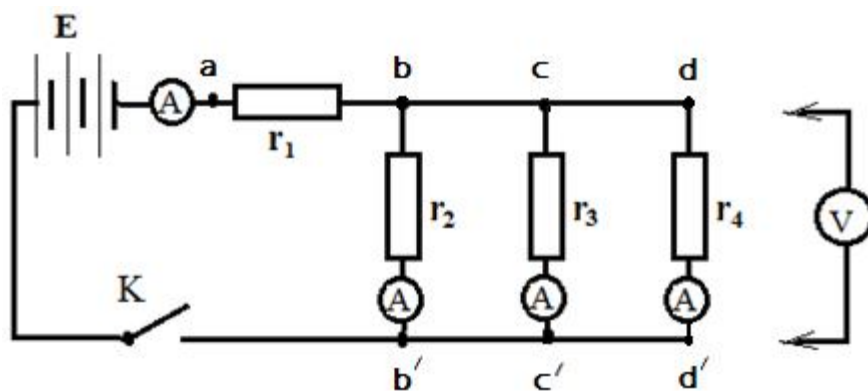
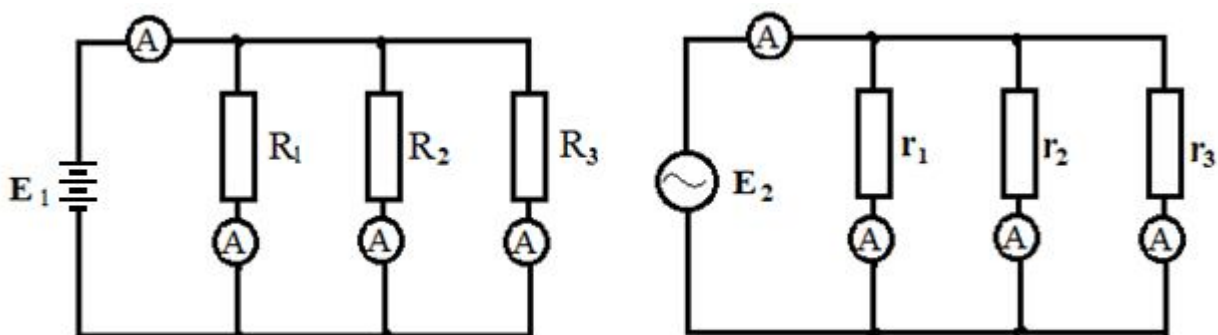


Рис. 4

### 3. Перевірка 1-го закону Кірхгофа.

Скласти віртуальне електричне коло за схемою (рис. 5 а,б), для кіл з постійним та змінним струмами відповідно. Дані записати до таблиці 5. Написати висновок щодо виконання першого закону Кірхгофа.



а)б)

Рис. 5 а,б.

Таблиця 5

|                 | $I_1$ | $I_2$ | $I_3$ | $\sum I$ |
|-----------------|-------|-------|-------|----------|
| Постійний струм |       |       |       |          |
| Змінний струм   |       |       |       |          |

#### 4. Перевірка 2-го закону Кірхгофа.

Скласти віртуальне електричне коло за схемою (рис. 6). Довільно вибрати значення е.р.с. та резисторів і встановити їх на схемі. Увімкнуте коло й отримані значення параметрів занести до таблиці 6. Розрахувати значення спадів напруг за законом Ома  $U = IR$ . Перевірити виконання 2-го закону Кірхгофа для всіх контурів.

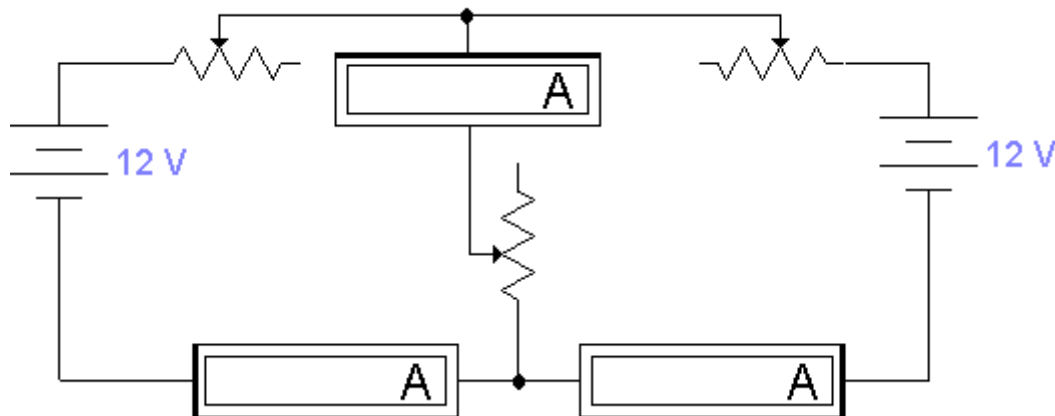


Рис. 6.

Таблиця 6

|            | $\sum E$ | $I_1$ | $I_2$ | $I_3$ | $R_1$ | $R_2$ | $R_3$ | $\sum IR$ |
|------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|
| Контур – 1 |          |       |       |       |       |       |       |           |
| Контур – 2 |          |       |       |       |       |       |       |           |

Контрольні запитання

1. Пояснити зміст поняття електрорушійної сили (е.р.с.), напруги, сили струму.
2. Що називають діючим значенням сили струму, напруги, е.р.с.?
3. Вивести формулу для обчислення потужності:  $P = UI$ .
4. Що називають опором провідника? Чим відрізняється опір ОМІЧНИЙ від АКТИВНОГО?
5. Яке з'єднання споживачів називають послідовним, паралельним і мішаним?
6. Як розподіляються струми, напруги і потужності при паралельному та послідовному з'єднанні споживачів?
7. Чому дорівнює повний опір кола:
  - а) при послідовному з'єднанні споживачів;
  - б) при паралельному з'єднанні споживачів.
8. Пояснити і записати вираз закону Ома для повного кола і для ділянки кола.
9. Пояснити і записати вираз для 1-го закону Кірхгофа.
10. Пояснити і записати вираз для 2-го закону Кірхгофа.

### Лабораторна робота № 2

#### Вивчення електровимірювальних приладів

**Мета:** 1. Вивчити будову і принцип дії вимірювальних приладів магнітоелектричної та електромагнітної систем; навчитися визначати ціну поділки, характеристики за позначеннями на їх шкалах, а також переваги і недоліки кожної із систем.

#### *Робоче завдання*

1. За шкалами електровимірювальних приладів визначити їх основні характеристики.
2. Вирахувати абсолютні похибки для запропонованих приладів.
3. Вирахувати ціну поділки і чутливість для всіх діапазонів приладів – вольтметра, амперметра та ватметра.
4. Вирахувати споживану потужність приладів.

## *Програма підготовки до виконання завдання*

1. Вивчити теоретичний матеріал за літературою:

Основна: Л-І, с.61-76, 82-90; Л-3, с.9-43.

Додаткова: Л-2, с.48-66; Л-5, с.252-262.

2. Виконати письмово такі завдання:

2.1. Перерахувати основні системи електровимірювальних приладів.

2.2. Порівняти основні характеристики приладів магнітоелектричної та електромагнітної систем, вказати їх переваги та недоліки. Замалювати будову цих приладів.

2.3. Дати визначення понять ціни поділки та чутливості електровимірювального приладу.

2.4. Пояснити поняття власної споживаної потужності приладу.

**Задача.** Як використати прилад магнітоелектричної системи, що має внутрішній опір  $r$  та струм повного відхилення показчика  $I$  для вимірювання напруги 36 В. Величину опору  $r$  взяти з *таблиці 1*, струм повного відхилення  $I$  взяти у десять разів меншим.

*Таблиця 1*

|   | 1    | 2    | 3    | 4    | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    |
|---|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| А | 0,6  | 0,7  | 0,8  | 0,5  | 0,06  | 0,16  | 0,11  | 0,12  | 0,13  | 0,14  |
| Б | 0,17 | 0,18 | 0,19 | 0,02 | 0,021 | 0,022 | 0,023 | 0,024 | 0,025 | 0,026 |
| В | 0,3  | 0,81 | 0,32 | 0,33 | 0,34  | 0,35  | 0,36  | 0,37  | 0,38  | 0,39  |

### *Особливості правил техніки безпеки*

Під час роботи не можна встановлювати електровимірювальні прилади один на одного, їх робоче положення повинно відповідати вимогам, що вказані на шкалі.

### *Методичні рекомендації до виконання завдання*

1. Визначити основні характеристики електровимірювальних приладів,

запропонованих викладачем, уважно розглянути умовні позначення на їх шкалах і для кожного з приладів заповнити *таблицю 2*:

*Таблиця 2.*

| Назва приладу | Умовне позначення | Вимірювальна шкала | Межі вимірювання | Внутрішній опір приладу | Ціна поділки | Чутливість | Тип струму | Клас точності | Абсолютна похибка | Робоче навантаження | Міцність ізоляції | Споживана потужність |
|---------------|-------------------|--------------------|------------------|-------------------------|--------------|------------|------------|---------------|-------------------|---------------------|-------------------|----------------------|
|               |                   |                    |                  |                         |              |            |            |               |                   |                     |                   |                      |

### Контрольні запитання

1. Які системи найпоширеніших електровимірних приладів ви знаєте? Назвати їх основні переваги та недоліки.
2. Назвати основні умовні позначення на шкалах електровимірних приладів.
3. З яких основних вузлів складаються аналогові прилади?
4. Пояснити схему та принцип дії цифрових приладів?
5. Чому амперметри виготовляють з малим внутрішнім опором, а вольтметри з великим?
6. Чи можна вольтметр вмикати в коло послідовно, а амперметр паралельно?
7. Дати визначення абсолютної, відносної та зведеної похибок.
8. Що таке клас точності приладу. На які класи точності поділяють прилади?
9. Як розширити межі вимірювання вольтметра та амперметра?
10. Як розрахувати додатковий опір та шунт при розширенні меж вимірювання вольтметра та амперметра?



## Вимірювання напруги та розширення меж вимірювання вольтметра

**Мета:** Оволодіти прийомами вимірювання напруги, використання додаткового опору для розширення меж вимірювання вольтметра, визначення його власних втрат.

### *Робоче завдання*

1. Перевірити точність вимірювання технічного вольтметра, побудувати графік похибок та власну споживану потужність приладу.
2. Обчислити величину додаткового опору для розширення меж вимірювання вольтметра та виконати ним таке вимірювання.

### *Програма підготовки до виконання завдання*

1. Опрацювати теоретичні відомості за літературою:

Основна: Л-1, с. 82 – 86; Л-3, с. 27-36.

Додаткова: Л-2, с. 110-115 Л-4, с. 154-155,

2. Виконати письмово такі завдання:

2.1. Пояснити, чому вольтметр вмикається паралельно до навантаження і має порівняно великий власний внутрішній опір.

2.2. Навести способи розширення меж вимірювання вольтметра і пояснити фізичну суть принципу дії необхідних приладів. Виконати схеми.

2.3. Які з відомих вам систем електровимірювальних приладів використовують у вольтметрах?

**Задача.** Як використати електровимірювальний прилад магнітоелектричної системи для вимірювання напруги 380 В? Струм повного відхилення приладу, становить «?» А, його власний внутрішній опір становить 100 Ом. Величину струму повного відхилення взяти з таблиці 1.

*Таблиця 1*

|  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
|--|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
|  | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|--|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|

|   |    |    |   |    |    |    |    |    |    |    |
|---|----|----|---|----|----|----|----|----|----|----|
| А | 15 | 26 | 5 | 27 | 37 | 44 | 54 | 61 | 77 | 89 |
| Б | 24 | 35 | 6 | 46 | 36 | 55 | 63 | 70 | 84 | 92 |

Особливості правил техніки безпеки

1. Прилади розмістити так, щоб було зручно переміщати повзунок РНШ та знімати покази приладів,
2. Уважно стежити за показами міліамперметра, не допускаючи його перевантаження.

**Методичні рекомендації до виконання завдання.**

1. Для перевірки похибки вимірювання технічного вольтметра скласти електричне коло за схемою рис.1. Виконати п'ять вимірювань, для різних значень напруг. Обоахувати абсолютну та відносну похибки. Результати занести до таблиці 2. За даними вимірювань побудувати графіки залежності величини поправок від напруги.

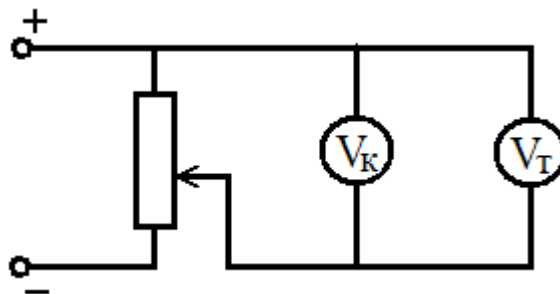


Рис. 1

Таблиця 2

| Покази вольтметрів |              | Величина похибок |          |
|--------------------|--------------|------------------|----------|
| Технічного         | Контрольного | Абсолютна        | Відносна |
|                    |              |                  |          |

2. Для розширення меж вимірювання вольтметра скласти коло за схемою (рис. 2). Попередньо обчислити додатковий опір для розширення меж його вимірювань на число кратне 2 та 3. Для цього використати формулу  $R_{\text{дод.}} = R_V(m - 1)$ .

До таблиці 3 записати значення додаткового опору  $R_{\text{дод.}}$ ; кількість поділок  $n_0$ , на які відхилилась стрілка при закритому вимикачеві  $K$  та відповідну напругу  $U_0$ ; кількість поділок  $n$  при відкритому вимикачеві  $K$  та відповідну напругу  $U_{\text{розш.}}$ . Порівняти ціну поділки вольтметра в обох випадках.

Таблиця 3.

| №<br>п/п | $R_{\text{дод.}}$ | $n_0$ | $U_0$ | $n$ | $U_{\text{розш.}}$ | $Z_0 = \frac{U_0}{n_0}$ | $Z = \frac{U}{n}$ | $\frac{Z}{Z_0}$ |
|----------|-------------------|-------|-------|-----|--------------------|-------------------------|-------------------|-----------------|
|          |                   |       |       |     |                    |                         |                   |                 |

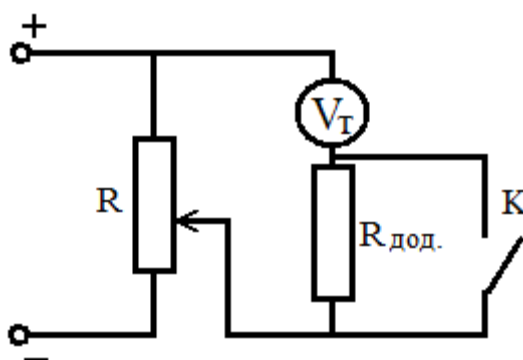


Рис. 2

3. Визначення власних втрат вольтметра виконати за електричною схемою (рис. 3), використовуючи міліамперметр. Розрахувати власну споживану потужність за результатами вимірювань  $P = IU$ , а також за заданим на шкалі вольтметра опором та вимірюваною напругою  $P = \frac{U^2}{R}$ . Порівняти результати обчислень. Дані занести до таблиці 4. Виконати 3 виміри для різних значень напруг.

Таблиця 4.

| №<br>п/п | $U$ | $I$ | $R_V$ | $P = IU$ | $P = \frac{U^2}{R}$ |
|----------|-----|-----|-------|----------|---------------------|
|          |     |     |       |          |                     |

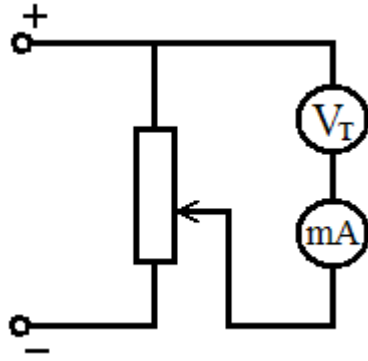


Рис 3.

Додаткове завдання

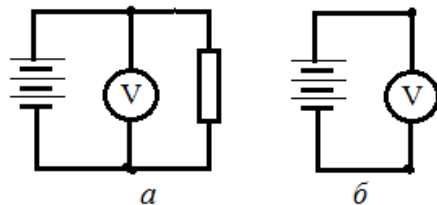
1. Самостійно розробити варіант даної лабораторної роботи для учнів школи та ПТНЗ.
2. Розробити наочність для пояснення даної теми на уроці фізики відповідно до програми.

Висновки

1. Зробити висновок про залежність величини поправок від значень вимірюваних напруг.
2. Як змінюється величина власної споживаної потужності технічного вольтметра від величини вимірюваної напруги?

### Контрольні запитання

1. Який зміст та послідовність виконання роботи?
2. Чому вольтметри виготовляються з великим внутрішнім опором?
  - 1) Тому, що вони вмикаються паралельно до навантаження;
  - 2) Щоб не впливати на режим роботи електричного кола;
  - 3) Щоб через вольтметр проходив малий струм.
  - 4) Всі відповіді правильні.
3. Який прилад використовують в колах постійного струму для розширення меж вимірювання вольтметра?
  - 1) Додатковий опір;
  - 2) Трансформатор напруги;
  - 3) Додатковий опір та трансформатор напруги;
  - 4) Всі відповіді правильні.
4. Які дані треба мати, щоб розрахувати додатковий опір вольтметра?
5. Що таке абсолютна, відносна та зведена похибки вимірювального приладу?
6. Яких систем прилади можна використати для вимірювання напруги?
7. Як вмикають вольтметр в електричне коло? Чому?
8. Що вимірює вольтметр увімкнений послідовно до споживача?
9. Вивести формулу для розрахунку величини додаткового опору для розширення меж вимірювання вольтметра.
10. Яку фізичну величину вимірюють вольтметром у випадках, зображених на рисунках (а) та (б)?



## Вимірювання сили струму та розширення меж вимірювання амперметра

**Мета:** Оволодіти прийомами вимірювання сили струму, використання шунта для розширення меж вимірювання амперметра та визначення власних втрат амперметра.

### *Робоче завдання*

1. Перевірити точність вимірювання технічного амперметра, побудувати графік поправок та визначити власну потужність приладу.
2. Обчислити величину опору шунта для розширення меж вимірювання амперметра та виконати за його використання вимірювання сили струму.

### *Програма підготовки до виконання завдання*

I. Опрацювати теоретичні відомості за літературою:

Основна: Л-І, с.82-86; Л-3, с. 27-36.

Додаткова: Л-2, с.55-61.

2. Виконати письмово такі завдання:

2.1. Пояснити, чому амперметр вмикається послідовно до навантаження і має досить малий власний внутрішній опір.

2.2. Вказати способи розширення меж вимірювання амперметра та пояснити фізичну суть принципу дії необхідних приладів. Виконати схеми вмикання.

2.3. Які системи електровимірювальних приладів можуть бути використані для виготовлення амперметрів.

**Задача.** Як використати прилад магнітоелектричної системи для вимірювання сили струму 5 А, якщо струм повного відхилення приладу становить «» А, а власний внутрішній опір становить 0,1 ом. величину струму повного відхилення взяти а таблиці 1.

*Таблиця 1*

|   |   |   |   |   |   |   |     |     |     |     |
|---|---|---|---|---|---|---|-----|-----|-----|-----|
|   | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7   | 8   | 9   | 10  |
| А | 1 | 2 | 3 | 2 | 5 | 4 | 0,5 | 0,8 | 0,9 | 0,6 |

|   |     |     |     |     |     |     |      |      |      |      |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|
| Б | 0,4 | 0,2 | 0,1 | 0,9 | 0,8 | 0,3 | 0,15 | 0,21 | 0,35 | 0,54 |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|

Особливості правил техніки безпеки

1. Прилади розташувати на робочому місці так, щоб було зручно пересувати повзунок реостата та спостерігати покази приладів.
2. Уважно стежити за показом мілівольтметра, не допускаючи його перевантаження.

**Методичні рекомендації до виконання робочого завдання**

1. Для визначення похибки вимірювання технічного амперметра, скласти електричне коло за схемою рис. 1. Виконати п'ять вимірювань, для різних значень струму. Вирахувати абсолютну та відносну похибки технічного приладу. Результати занести до таблиці 2. За даними вимірювань побудувати графіки залежності величини поправок від напруги.

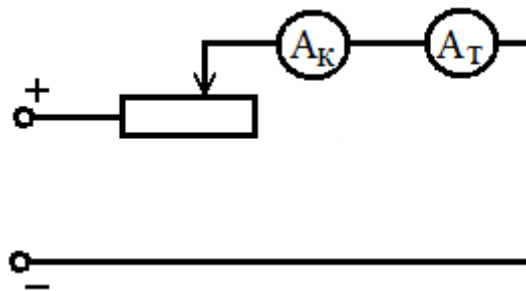


Рис. 1.

Таблиця 2

| Покази амперметрів |              | Величина похибки |          | Поправка |
|--------------------|--------------|------------------|----------|----------|
| Технічного         | Контрольного | Абсолютна        | Відносна |          |
|                    |              |                  |          |          |

2. Для розширення меж вимірювання амперметра скласти коло за схемою (рис. 2). Попередньо обчислити шунт для розширення меж його вимірювань на число кратне 2 та 3. Для цього використати формулу  $R_{ш.} = \frac{R_A}{(m-1)}$

До таблиці 3 записати значення опору шунта  $R_{ш.}$ ; кількість поділок  $n_0$ , на які відхилилась стрілка технічного амперметра при закритому вимикачеві  $K$  та відповідну силу струму  $I_0$ ; кількість поділок  $n$  при відкритому вимикачеві  $K$  та відповідну силу струму  $I_{розш.}$ . Порівняти ціну поділки амперметра в обох випадках.

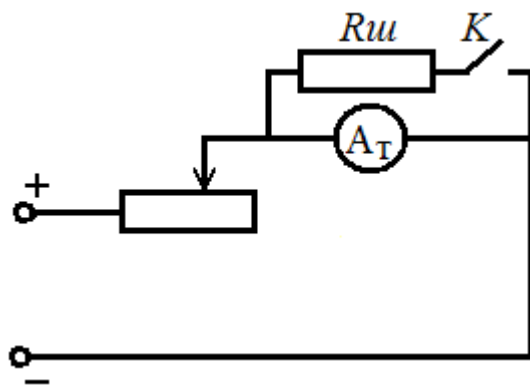


Рис. 2.

3. Для визначення власних втрат потужності технічного амперметра виконати електричну схему (рис.3). Вирахувати споживану технічним приладом потужність за силою струму та спадом напруги на ньому, а також за силою струму і його внутрішнім опором, вказаним на шкалі. Результати вимірювань та обчислень занести до таблиці 3.

Таблиця 3.

| №<br>п/п | U(mV) | I | $R_V$ | $P = IU$ | $P = I^2 R.$ |
|----------|-------|---|-------|----------|--------------|
|          |       |   |       |          |              |

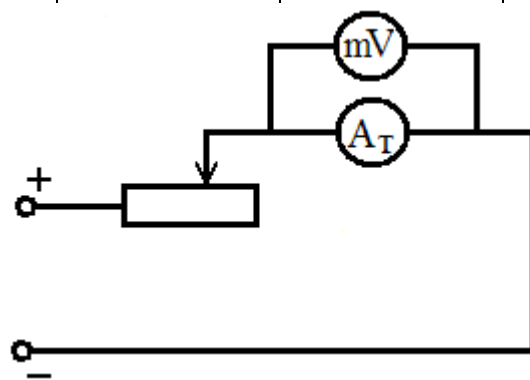


Рис. 3.

#### Додаткове завдання

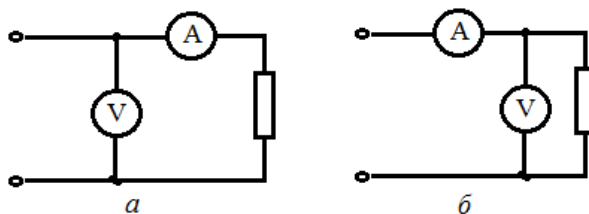
1. Самостійно розробити варіант даної лабораторної роботи для учнів школи та ПТНЗ.
2. Розробити наочність для пояснення даної теми на уроці фізики відповідно до програми.

#### Контрольні запитання

1. Який зміст та послідовність виконання роботи?



2. Чому амперметр виготовляють з малим внутрішнім опором?
- 1) Тому, що він вмикається послідовно до навантаження.
  - 2) Щоб не впливати на режим роботи електричного кола.
  - 3) Щоб спад напруги на клеммах амперметра був малим.
  - 4) Всі відповіді вірні.
3. Чи можна амперметр використати в якості вольтметра?
- 1) Так.
  - 2) Ні.
  - 3) Так, при певних умовах.
4. Як можна розширити межі вимірювання амперметра в колах постійного струму?
- 1) За допомогою трансформатора струму.
  - 2) Користуючись шунтом.
  - 3) За допомогою трансформатора струму та шунта.
5. Яке значення змінного струму вимірюють аналоговими приладами?
6. Чи може бути, щоб опір шунта був більшим за опір амперметра?
7. Що буде, якщо амперметр увімкнути паралельно до споживача?
8. У яких випадках прилади вмикають за схемою (а), а в якому випадку за схемою (б)?



9. Вивести формулу для розрахунку величини опору шунта.
10. Яких систем прилади можна використати для вимірювання сили струму?

**Вимірювання опорів.**

**Мета:** Оволодіти прийомами вимірювання опорів різними способами; вивчити принцип дії таких приладів: мультиметра, омметра, подвійного містка та мегометра.

*Робоче завдання*

1. Перевірити градування омметра за допомогою магазину опорів.
2. Визначити опір електроплитки при різних її температурах. Побудувати графік залежності опору від температури спіралі плитки.
3. Визначити опори провідників різних матеріалів подвійним містком та визначити цей метал за допомогою його питомого опору.
4. За допомогою мегометра визначити величину опору ізоляції електродвигуна.

*Програма підготовки до виконання завдання*

1. Опрацювати теоретичні відомості за літературою:  
Основна: Л-1, с. 82-86; Л-3, с. 50-69.  
Додаткова: Л-2, с. 78-81; Л-5, с. 132-141.
2. Виконати письмово такі завдання:
  - 2.1. Дати визначення поняття електричного опору провідника. Вказати від чого він залежить.
  - 2.2. Перерахувати основні способи вимірювання опорів та проаналізувати їх практичне використання.
  - 2.3. Замалювати електричну схему омметра, пояснити принцип дії цього приладу та правила користування ним.
  - 2.4. Записати вирази для визначення повного, активного та реактивного опорів у колах змінного струму, а також співвідношення між ними.

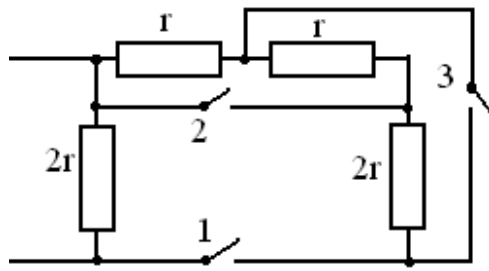


Рис.1. Схема до задачі.

**Задача. 1.** Визначити еквівалентний опір всього кола для таких 5 випадків, коли на схемі (рис.1) увімкнено: 1) вимикач – 1; 2) вимикач 1 та 2; 3) усі вимикачі; 4). вимикач 1 та 3.

Величину опору взяти з таблиці 1.

Таблиця 1.

|   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
|   | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 |
| А | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 |
| Б | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 32 |
| В | 40 | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 | 47 | 48 | 49 |

2. Визначити опір повзункового реостату, виготовленого з нікелевого дроту діаметром 0.5 мм, що намотаний виток за витком на керамічний циліндр діаметром 6 см та довжиною  $L$ , взятою з таблиці 1.

### Особливості правил техніки безпеки

1. При вимірюванні опору електроплитки бути обережним, щоб не отримати опіків, температура її нагрівання висока.

2. Не вмикати на досить тривалий час гальванометр, омметр, гальванометр подвійного містка та інших приладів, оскільки це призводить до розрядження джерел їх живлення.

### **Методичні рекомендації до виконання завдання**

1. Виставити стрілку омметра на нуль. Встановити по черзі 5 значень опорів на магазині, які є точними, виміряти їх значення за допомогою омметра. Визначити абсолютну та відносну похибки вимірювань. Результати занести до таблиці 2.

Таблиця 2.

| Покази магазину опорів $R_0(Ом)$ | Покази омметра $R(Ом)$ | Абсолютна похибка $\Delta R(Ом)$ | Відносна похибка $\nu$ |
|----------------------------------|------------------------|----------------------------------|------------------------|
|                                  |                        |                                  |                        |

2. Цифровим омметром визначити опір електроплитки в холодному стані. Увімкнути електричну плитку в електромережу і через кожні 3 хвилини вимірювати величину опору її спіралі. За величиною опору ніхромової спіралі, визначити її температуру за формулою  $R_t = R_0(1 + \alpha t^{\circ}C)$ . Де  $R_t$  – опір спіралі нагрітої плитки;  $R_0$  – опір спіралі при кімнатній температурі;  $\alpha$  – термічний коефіцієнт опору, взятий з таблиці;  $t^{\circ}C$  – температура нагрітої плитки. Дослід повторити 5 разів. Результати занести до *таблиці 3*. Побудувати графік залежності величини опору від температури спіралі.

*Таблиця 3.*

|                          |  |  |  |  |  |
|--------------------------|--|--|--|--|--|
| Час – $t(c)$             |  |  |  |  |  |
| Опір – $R(Ом)$           |  |  |  |  |  |
| Температура $t^{\circ}C$ |  |  |  |  |  |

3. Вивчити будову і правила користування містком опорів. Виміряти значення опорів 3 провідників, розрахувати їх питомий опір і за таблицею питомих опорів визначити матеріал, з якого вони виготовлені. Дані занести до *таблиці 4*.

*Таблиця 4.*

| $L$<br>( $m$ ) | $D$<br>( $mm$ ) | $S$<br>( $mm^2$ ) | $R$<br>( $Om$ ) | $\frac{Om}{mm^2}$<br>$\rho$ , ( $mm^2$ ) | Матеріал |
|----------------|-----------------|-------------------|-----------------|--|----------|
|                |                 |                   |                 |  |          |

4. Ознайомитися з принципом дії та будовою мегометра. Користуючись мегометром типу М1101, виміряти опір ізоляції між котушками електродвигуна та його корпусом.

### Контрольні запитання

1. Пояснити зміст та послідовність виконання роботи.
2. Який фізичний зміст омичного, активного, індуктивного, ємнісного, та повного опорів?
3. Порівняти поняття активного та омичного опорів.
4. Назвати способи вимірювання опорів.

5. Як вмикаються в коло амперметр та вольтметр, при вимірюванні великих та малих опорів, відповідно до закону Ома?
6. Які особливості вимірювання опору провідників за допомогою омметра? Яка принципова будова омметра?
7. Пояснити принцип вимірювання опору містковою схемою.
8. Будова та принцип дії логометра.
9. В чому полягає принципова відмінність омметра та логометра?
10. Призначення, будова та принцип дії мегометра.

**Вимірювання потужності та енергії в електричних колах змінного струму.**

**Мета:** Вивчити будову і принцип дії ватметра та лічильника електричної енергії однофазного змінного струму; оволодіти прийомами вимірювання потужності та електричної енергії за допомогою ватметра та лічильника індукційної системи.

*Робоче завдання*

1. Користуючись вольтметром, амперметром та ватметром, визначити активну і повну потужність в електричному колі змінного струму.
2. Вивчити будову та принцип дії однофазного лічильника індукційної системи. За його допомогою виміряти спожиту енергію на активному навантаженні, визначити абсолютну та відносну похибки вимірювань.

*Програма підготовки до виконання завдання*

1. Опрацювати теоретичні відомості за літературою:  
Основна: Л-1. с. 75-76. Л-3. с. 36-43.  
Додаткова: Л-2. с. 63-68, 71-78. Л-5. с. 161-162. Л-6 с. 147-148.
2. Виконати письмово такі завдання:
  - 2.1. Довести, що електрична потужність визначається, як добуток величини струму на напругу.
  - 2.2. Дати коротку характеристику приладів електродинамічної, феродинамічної та індукційної систем.
  - 2.3. Перерахувати основні вузли і деталі однофазного лічильника індукційної системи, назвати їх функції, виконати схематичний малюнок.
  - 2.4. Охарактеризувати номінальну та дійсну сталі лічильників.

**Задача.** В електричне коло змінного струму увімкнена котушка індуктивності. Для визначення його параметрів кола використані прилади: амперметр, вольтметр, ватметр та лічильник електричної енергії. Межа вимірювання амперметра 3 А, вольтметра – 220 В. Стрілка ватметра, що має 150 поділок на шкалі з номінальним

струмом  $5\text{ A}$  та номінальною напругою  $300\text{ В}$ , відхилилась на  $n$  поділок. При цьому диск лічильника, на шкалі якого позначено, що  $1\text{ кВт/год}$  відповідає  $1280\text{ об/хв}$ , здійснив  $k$  обертів. Визначити активну, реактивну та повну потужності, що споживаються котушкою, відносну та постійну сталу лічильника, можливість його використання. Намалювати електричну схему до задачі. Кількість поділок  $n$  взяти з *таблиці 1*, кількість обертів диска прийняти в 10 раз більше. Час обертання диска  $10\text{ с}$ .

Таблиця 1.

|   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
|   | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 |
| А | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| Б | 10 | 9  | 8  | 7  | 6  | 5  | 4  | 3  | 2  | 1  |
| В | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 |

Особливості правил техніки безпеки

1. До початку роботи поставити ручку регулятора напруги (РНШ) у крайнє ліве положення, тобто, щоб напруги на клеммах РНШ не було.
2. Без дозволу керівника занять не дозволяється перемикати межі вимірювання ватметра за струмом та напругою.
3. Зауважимо, що перша та третя клеми лічильника вмикаються до джерела електричного струму, а друга та четверта – до навантаження.

**Методичні рекомендації до виконання завдання**

1. Скласти електричне коло за схемою (рис. 1)

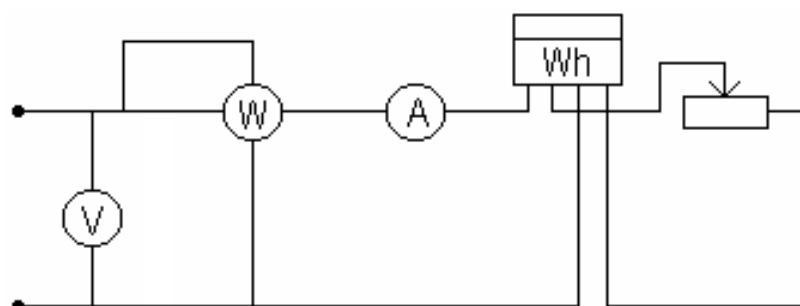


Рис. 1. Схема ввімкнення ватметра та однофазного електролічильника.

2. Визначити повну потужність, що споживає реостат, за допомогою амперметра та вольтметра. Виміряти активну потужність за допомогою ватметра для цієї ж величини навантаження. Дослід повторити для 5 значень підведеної напруги.
3. Обчислити величину коефіцієнту потужності та значення реактивної потужності. Результати занести де таблиці 2.

Таблиця 2.

|     |     |      |        |                      |                           |
|-----|-----|------|--------|----------------------|---------------------------|
| $I$ | $U$ | $P$  | $S=UI$ | $\cos \varphi = P/S$ | $Q=UI \sin \varphi$ (Var) |
| (A) | (B) | (Вт) | (ВА)   |                      |                           |



|  |  |  |  |  |  |
|--|--|--|--|--|--|
|  |  |  |  |  |  |
|--|--|--|--|--|--|

4. Вивчити будову однофазного лічильника, скориставшись розбірним лічильником та плакатами.

5. Визначити номінальну сталу лічильника, скориставшись даними вказаними на його шкалі.

6. Визначити дійсну сталу лічильника для 5 значень навантаження, встановлених реостатом. Для цього секундоміром виміряти час, за який диск лічильника виконує 10 обертів при кожному значенні навантаження. Записати до *таблиці 3* значення напруги, сили струму, номінальної сталої, час обертання та кількість обертів диска. Підрахувати значення дійсної сталої лічильника  $C_d$ , абсолютної  $\Delta C$  та відносної  $\beta$  похибок вимірювання.

*Таблиця 3.*

| $U$<br>(В) | $I$<br>(А) | $C_n$ | $t$<br>(сек) | $n$<br>(об) | $C_d$ | $\Delta C = C_n - C_d$ | $\beta = (C_n - C_d) / C_d$ |
|------------|------------|-------|--------------|-------------|-------|------------------------|-----------------------------|
|            |            |       |              |             |       |                        |                             |

Контрольні запитання

1. Який зміст та послідовність виконання роботи?
2. До якої системи електровимірювальних приладів належать ватметр і фазометр?
3. Які параметри електричного кола одночасно фіксує ватметр? Якими елементами приладу?
4. Яку потужність вимірюють ватметром у колах змінного струму? Яка формула цієї потужності?
5. Як створюється обертовий момент диска однофазного лічильника?
6. Яку енергію вимірює побутовий лічильник? Формула розрахунку електричної енергії.
7. Які параметри одночасно фіксує лічильник? Якими елементами приладу?
8. Яке призначення постійного магніту однофазного лічильника?
9. Що таке самохід лічильника?

10. Пояснити зміст номінальної та дійсної сталої лічильника.

**Дослідження характеристик електричних джерел освітлення.**

**Мета:** Вивчити будову і принцип дії різних електричних джерел освітлення та навчитися визначати їх основні параметри.

*Робоче завдання*

1. Вивчити конструкцію, принцип дії та можливості використання люмінесцентних ламп та ламп розжарення.
2. Дослідити характеристики ламп при різних напругах. Побудувати графіки залежності освітленості від споживаної лампою потужності при різних напругах.
3. Порівняти світловіддачу різних типів досліджуваних ламп.

*Програма підготовки до виконання завдання*

1. Опрацювати теоретичні відомості за літературою:

Основна: Л-1, с.283-304; Л-3, с. 303-310.

Додаткова: Л-15, с.32-42.

2. Виконати письмово такі завдання:

2.1 Визначити основні переваги електричних джерел освітлення перед відомими іншими.

2.2 Схематично зарисувати будову лампи розжарення. Зазначити назву та призначення основних її частин.

2.3 Виконати схему ввімкнення люмінесцентної лампи та пояснити призначення її окремих складових: інертного газу, парів ртуті та інших, а також дроселя і стартера.

2.4 Перерахувати переваги і недоліки ламп розжарення та люмінесцентних ламп.

2.5 Познайомитись з особливостями будови та принципом дії сучасних енергозберігаючих ламп.

**Задача.** Люмінесцентна лампа типу ЛД-220-75 споживає струм  $0,6A$ , при цьому створює світловий потік  $\Phi=1200$  лм. Визначити повнупотужність лампи, коефіцієнт потужності, світловий потік на поверхню площею  $S$  та світлову віддачу  $H$ . Величину площі взяти з таблиці 1.

Таблиця 1.

|   | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| А | 0.6 | 1.2 | 0.7 | 1.4 | 0.8 | 1.8 | 2.0 | 1.0 | 1.5 | 1.9 |
| Б | 2.6 | 3.3 | 3.7 | 3.4 | 3.8 | 4.2 | 0.3 | 1.6 | 2.1 | 3.1 |
| В | 6.2 | 2.3 | 7.4 | 4.3 | 8.4 | 2.8 | 3.0 | 0.5 | 6.1 | 7.6 |

### Особливості правил техніки безпеки

1. При роботі з лампами необхідно бути обережним, щоб не розбити скляний балон.
2. Перед тим, як вмикати напругу, закрити дерев'яним ящиком досліджувані лампи. Повзунок регулятора напруги поставити на нульове положення.
3. Забороняється вмикати лампу, якщо в її балон попало повітря або зіпсована спіраль.

### **Методичні рекомендації щодо виконання завдання**

1. Вивчити будову і правила роботи з люксметром.
2. Вивчаючи будову лампи розжарення, знайти відповідні деталі на малюнку і на самій лампі. Скласти електричне коло для дослідження параметрів лампи розжарення за схемою, зображеною на рис. 1а. Після перевірки викладачем зібраного кола, увімкнути напругу. Збільшуючи регулятором величину напруги від  $U=0,5U_n$  до значень  $U=1,1U_n$ , записати покази приладів для 5 значень.

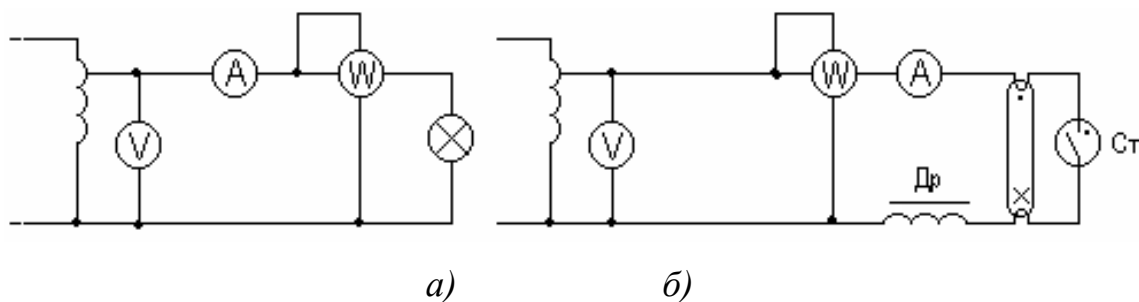


Рис.1. Схема дослідження ламп:

а) – розжарення, б) – люмінесцентної.

Вирахувати величину світлового потоку  $\Phi=EF$  ( $F$ – площа освітлюваної поверхні), повну потужність лампи  $S=UI$ , коефіцієнт потужності  $\cos\varphi=P/S$  та світлову віддачу  $H$ . Результати занести до таблиці 2.

Таблиця 2.

| Тип лампи | $U$<br>(В) | $I$<br>(А) | $P$<br>(Вт) | $E$<br>(Лк.) | $S=UI$<br>(ВА) | $\Phi=EF$<br>Лм. | $H=\Phi/P$<br>(Лм/Вт) | $\cos\varphi=P/S$ |
|-----------|------------|------------|-------------|--------------|----------------|------------------|-----------------------|-------------------|
|           |            |            |             |              |                |                  |                       |                   |

3. Повторити таке ж завдання для люмінесцентної, енергозберігаючої та світлодіодної ламп відповідно схемі, зображеній на рис. 1б.

4. Познайомитися з будовою інших електричних ламп. Визначити їх призначення, будову, потужність та інші особливості.

#### Контрольні запитання

1. Пояснити зміст та послідовність виконання роботи?
2. Які типи ламп ви знаєте?
3. Назвати основні елементи ламп розжарення.
4. Які види газорозрядних ламп ви знаєте.
5. Назвати основні елементи люмінесцентної лампи і пояснити принципи її дії.
6. Яке призначення стартера і дроселя в люмінесцентних світильниках?
7. Пояснити будову і принцип дії газорозрядних ламп ДРЛ.
8. Розшифрувати аббревіатуру: ЛБ, ЛДЦ, ЛХБ, ЛД, ЛТБ.
9. Що називається світловіддачею?
10. Які лампи мають велику світловіддачу і чому?

**Аналіз та розрахунок нерозгалуженого кола однофазного струму.**

**Мета:** Дослідити основні параметри кола однофазного змінного струму при різних активно-реактивних навантаженнях та умови створення резонансу струмів.

*Робоче завдання*

1. Визначити параметри кола при ввімкнених окремо резисторі, котушці індуктивності, конденсаторі.
2. Визначити параметри електричного кола для трьох випадків: при послідовному вмиканні резистора та котушки індуктивності; резистора та конденсатора; резистора, котушки індуктивності та конденсатора. Для останнього дослідження виконати три варіанти:  $X_L > X_C$ ;  $X_L < X_C$ ;  $X_L = X_C$ .
3. Для всіх випадків нарисувати електричні схеми, векторні діаграми та вирахувати всі величини, що відзначені в таблиці 3.

*Програма підготовки до виконання завдання*

1. Опрацювати теоретичні відомості за літературою:  
Основна: Л-1, с. 11-44; Л-3, с. 83-88.  
Додаткова: Л-2, с. 7-24; Л-4, с. 46-60.
2. Виконати письмово такі завдання:
  - 2.1. Дати визначення та записати аналітичні вирази для миттєвих, амплітудних та діючих значень змінного струму, напруги та ЕРС.
  - 2.2. Визначити поняття: період, частота, фаза, початкова фаза та зсув фаз для змінного струму.
  - 2.3. Зарисувати електричні схеми, векторні діаграми та графіки для активного, індуктивного, ємнісного, активно-індуктивного та активно-ємнісного навантажень у колах змінного струму.
  - 2.4. Зарисувати електричні схеми, векторні діаграми струму та напруги для електричного кола з активно-індуктивно-ємнісним навантаженням при

$X_L > X_C; X_C > X_L; X_C = X_L$ , записати значення повного опору для кожного з видів навантажень.

2.5. Зарисувати електричну схему (рис. 1) з певною комбінацією вимикачів відповідно до Вашого варіанту.

Таблиця 1.

|        |        |        |        |        |        |   |   |   |        |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---|---|---|--------|
| 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7 | 8 | 9 | 10     |
| 1 і 11 | 2 і 11 | 3 і 11 | 4 і 11 | 5 і 11 | 6 і 11 | 9 | 8 | 7 | 3 і 10 |

Визначити параметри одержаного електричного кола: силу струму; повний опір кола; коефіцієнт потужності; повну, реактивну та активну потужності. Побудувати векторну діаграму для сили струму та напруги.

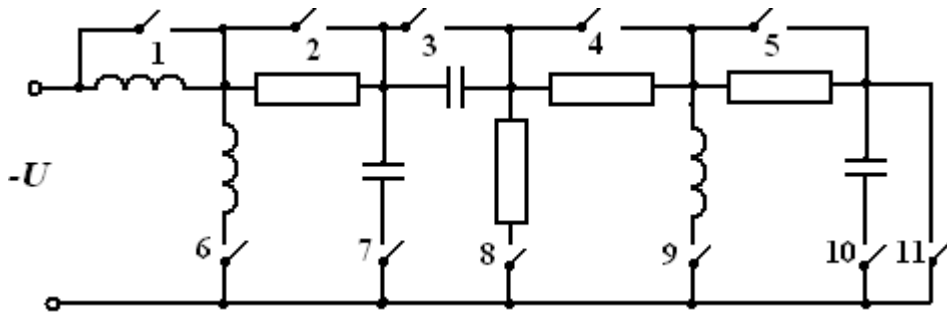


Рис. 1. Схема до завдання 2.5.

**Задача.** Конденсатор та котушка під'єднані послідовно до джерела змінного струму з частотою 50 Гц. Визначити всі параметри електричного кола і побудувати векторну діаграму для сили струму та напруг. Величину напруги взяти з таблиці 2. Величину активного опору котушки взяти у 10 раз меншу від величини напруги, величину індуктивності котушки взяти в 1000 разів меншою від величини напруги. Ємність конденсатора, що вимірюється в мкФ, взяти рівною величині напруги, а активним опором конденсатора знехтувати.

Таблиця 2.

|   |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|   | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  |
| А | 220 | 240 | 260 | 280 | 300 | 320 | 340 | 360 | 380 | 400 |
| Б | 60  | 80  | 100 | 120 | 140 | 160 | 180 | 200 | 260 | 480 |
| В | 210 | 250 | 270 | 290 | 310 | 330 | 350 | 370 | 390 | 410 |

### Особливості правил техніки безпеки

1. Вимкнений конденсатор може зберігати залишковий заряд, тому після

вимкнення електричного кола його необхідно розрядити.

2. Особливо обережно необхідно виконувати вимірювання спадів напруг на кожній ділянці кола. При перемиканні діапазонів вимірювання амперметра обов'язково вимикати загальну напругу в електричному колі.

3. Не вмикати одночасно в коло котушку індуктивності та конденсатор без резистора.

### Методичні рекомендації щодо виконання завдання

1. Скласти електричне коло за схемою, зображеною на рис. 2.

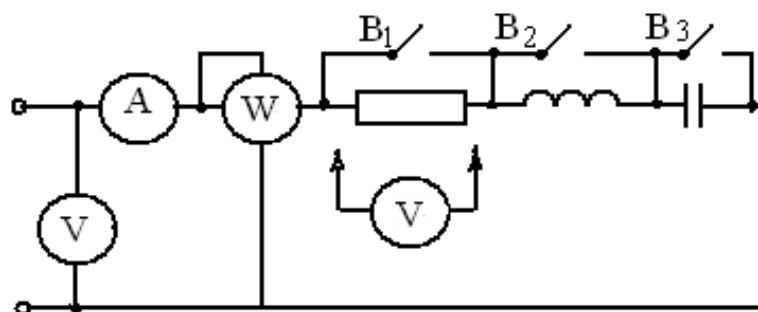


Рис. 2. Схема послідовного ввімкнення активно-реактивного навантаження.

2. Замкнути вимикачі  $B_2$  та  $B_3$ , а  $B_1$  залишити розімкненим. Так як ключі мають шунтуючу дію, то матимемо коло лише з активним навантаженням.

3. За допомогою ключів отримати варіанти електричних кіл з активним, індуктивним, активно-індуктивним та активно-ємнісним навантаженнями.

4. Виміряти силу струму, потужність та напругу в колах для кожного випадку. Обчислити повний опір кола, коефіцієнт потужності, повну потужність. Результати занести до *таблиці 3*.

5. Для випадку, коли вмикаються реостат, котушка та конденсатор одночасно, змінюючи ємність конденсатора відповідно до *таблиці 3*, досягти явища резонансу.

6. Для всіх варіантів вмикання електричного кола побудувати векторні діаграми струмів та спадів напруг.

*Таблиця 3.*

|           |
|-----------|
| Увімкнено |
|-----------|



|                     | Резистор | Катушка | Конденсатор | Резистор та катушка | Резистор та конденсатор | Резистор, катушка, конденсатор | C=8<br>(МкФ) | C=16<br>(МкФ) | C=32<br>(МкФ) |
|---------------------|----------|---------|-------------|---------------------|-------------------------|--------------------------------|--------------|---------------|---------------|
| U(B)                |          |         |             |                     |                         |                                |              |               |               |
| U <sub>a</sub> (B)  |          |         |             |                     |                         |                                |              |               |               |
| U <sub>L</sub> (B)  |          |         |             |                     |                         |                                |              |               |               |
| U <sub>C</sub> (B)  |          |         |             |                     |                         |                                |              |               |               |
| I(A)                |          |         |             |                     |                         |                                |              |               |               |
| P(Вт)               |          |         |             |                     |                         |                                |              |               |               |
| cosφ                |          |         |             |                     |                         |                                |              |               |               |
| sinφ                |          |         |             |                     |                         |                                |              |               |               |
| r (Ом)              |          |         |             |                     |                         |                                |              |               |               |
| X <sub>C</sub> (Ом) |          |         |             |                     |                         |                                |              |               |               |
| X <sub>L</sub> (Ом) |          |         |             |                     |                         |                                |              |               |               |
| Z (Ом)              |          |         |             |                     |                         |                                |              |               |               |
| Q<br>(Вар)          |          |         |             |                     |                         |                                |              |               |               |
| S (ВА)              |          |         |             |                     |                         |                                |              |               |               |

### Контрольні запитання

1. Пояснити зміст та послідовність виконання лабораторної роботи?
2. Якими параметрами характеризують однофазний змінний струм?
3. Якими способами можна виразити змінний струм, напругу, е.р.с.?
4. Яке співвідношення фаз коливання струму і напруги в колах з активним, індуктивним та ємнісним навантаженням? Виразити алгебраїчно та векторно.
5. Що називають діючим значенням сили струму, напруги, е.р.с., таяк їх вирахувати?
6. Зобразити графічно залежність  $i=f(t)$  для активного, індуктивного та ємнісного навантаження.
7. побудувати векторну діаграму для кола з трьома видами навантажень – активним, індуктивним та ємнісним.
8. Побудувати трикутник напруг, опорів та потужностей.
9. Що таке резонанс напруг?
10. Що називають коефіцієнтом потужності?

**Дослідження трифазного електричного кола змінного струму  
при з'єднанні споживачів «зіркою» і «трикутником».**

**Мета:** Дослідити основні параметри електричного кола трифазного струму. Розрахувати і побудувати векторні діаграми струмів і напруг при з'єднанні активних споживачів «зіркою» і «трикутником».

*Робоче завдання*

1. Дослідити параметри трифазного кола при симетричному і несиметричному вмиканні активних споживачів зіркою.
2. Дослідити коло з симетричним навантаженням при обриві лінійного провідника.
3. Дослідити коло трифазного струму з симетричним навантаженням при вмиканні активних споживачів «трикутником».
4. Побудувати векторні діаграми струмів та напруг для «зірки» і «трикутника».

*Програма підготовки до виконання завдання*

1. Опрацювати теоретичні відомості за літературою:  
Основна: Л-1, с.48-61; Л-3, с. 108-123.  
Додаткова: Л-4, с.70-86.
2. Виконати письмово такі завдання:
  - 2.1. Дати визначення з'єднань споживачів «зіркою» та «трикутником».
  - 2.2. Які співвідношення між фазними та лінійними напругами і струмами при з'єднанні споживачів «зіркою» і «трикутником»? Накреслити електричні схеми таких з'єднань з позначенням всіх лінійних та фазних напруг і струмів.
  - 2.3. Виконати електричні схеми різних способів визначення потужності в трифазному колі при з'єднанні споживачів «зіркою» і «трикутником».
  - 2.4. Перерахувати переваги та недоліки з'єднання споживачів зіркою та трикутником.

**Задача.** Три активних опори з'єднанні спочатку зіркою, а потім трикутником у трифазному колі з лінійною напругою  $U$ . Визначити всі параметри кола для обох випадків з'єднання. Побудувати векторні діаграми струмів та напруг. Величину напруги взяти з *таблиці 1*. Величину активного опору взяти такою, що в 10 разів менша чисельного значення величини напруги.

*Таблиця 1.*

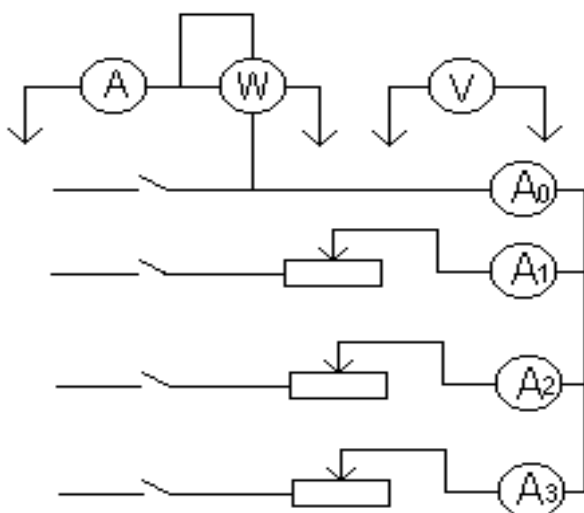
|   | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| А | 60  | 40  | 20  | 30  | 10  | 50  | 70  | 80  | 90  | 100 |
| Б | 110 | 120 | 130 | 140 | 150 | 160 | 170 | 180 | 190 | 200 |
| В | 210 | 220 | 230 | 240 | 250 | 260 | 270 | 280 | 290 | 300 |

*Особливості правил техніки безпеки*

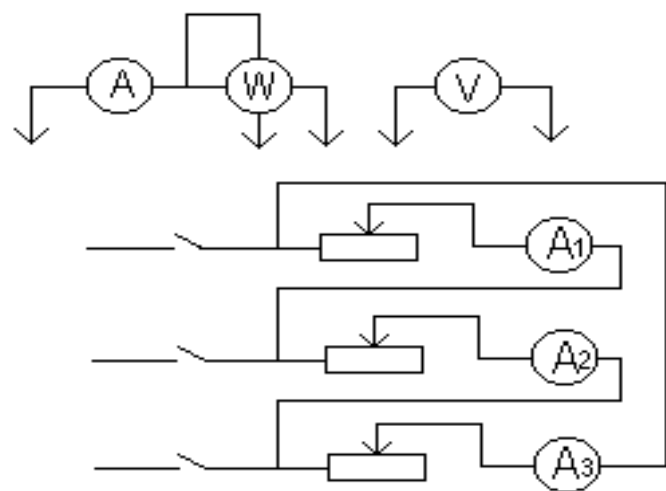
1. Перед вмиканням напруги слід перевірити межі вимірювання ватметра.
2. Перемикання вимірювальних приладів у всіх випадках здійснювати лише при вимкненій напрузі.

***Методичні рекомендації до виконання завдання***

1. Для дослідження параметрів електричних кіл, у яких навантаження з'єднані зіркою або трикутником, скористатися схемами, що зображені на рис.1 та рис. 2 відповідно.



*Рис. 1. З'єднання споживачів зіркою.*



*Рис. 2. З'єднання споживачів трикутником*

2. При з'єднанні споживачів зіркою, здійснити виміри при симетричному і

несиметричному навантаженнях. Величини навантажень змінювати за допомогою опорів реостатів. Аналогічні досліди виконати при обриві лінійного та нульового проводів.

3. Для всіх випадків записати величини лінійних напруг  $U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}$ ; фазних напруг  $U_{\phi 1}, U_{\phi 2}, U_{\phi 3}$ ; лінійних  $I_{L1}, I_{L2}, I_{L3}$  та фазних  $I_{\phi 1}, I_{\phi 2}, I_{\phi 3}$  струмів. Потужність всього кола  $P = P_1 + P_2 + P_3$ . Зауважимо, що ватметр вимірює активну потужність лише однієї фази.

4. Повторити пункти 1-3 для кола при з'єднанні споживачів трикутником. Врахувати, що при з'єднанні споживачів трикутником, по-перше, відсутній нульовий провід; по-друге, при такому з'єднанні несиметричне навантаження не застосовують.

5. Обрахувати для всіх випадків співвідношення між лінійними та фазними струмами і напругами, величину активного опору в кожній фазі, величину активної потужності всього кола за відповідними формулами:

$$P = 3I_{\phi}^2 r; P = 3U_{\phi} I_{\phi} = \sqrt{3}U_L I_L; P = 3P_{\text{ватметра}}$$

6. Побудувати векторні діаграми струмів та напруг. Вибрати масштаб векторів так, щоб діаграма мала кращу наочність.

Таблиця 2.

|       | З'єднання зіркою        |            |                            |  |                           |            |                            |  | З'єднання трикутником   |                            |  |
|-------|-------------------------|------------|----------------------------|--|---------------------------|------------|----------------------------|--|-------------------------|----------------------------|--|
|       | Симетричне Навантаження |            |                            |  | Несиметричне навантаження |            |                            |  | Симетричне навантаження |                            |  |
|       | Усе ввімкнено           | Обрив нуля | Обрив лінійного проводника |  | Усе ввімкнено             | Обрив нуля | Обрив лінійного проводника |  | Усе ввімкнено           | Обрив лінійного проводника |  |
| $I_A$ |                         |            |                            |  |                           |            |                            |  |                         |                            |  |
| $I_B$ |                         |            |                            |  |                           |            |                            |  |                         |                            |  |
| $I_C$ |                         |            |                            |  |                           |            |                            |  |                         |                            |  |
| $I_a$ |                         |            |                            |  |                           |            |                            |  |                         |                            |  |

|                   |  |  |  |  |  |  |  |  |
|-------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|
| $I_b$             |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $I_c$             |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $I_0$             |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $U_{AB}$          |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $U_{BC}$          |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $U_{CA}$          |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $U_a$             |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $U_b$             |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $U_c$             |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $R_A$             |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $R_B$             |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $R_C$             |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $P_A$             |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $P_B$             |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $P_C$             |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $P_{\text{кола}}$ |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $I_A/I_a$         |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $I_B/I_b$         |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $I_C/I_c$         |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $U_{AB}/U_a$      |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $U_{BC}/U_b$      |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $U_{CA}/U_c$      |  |  |  |  |  |  |  |  |

### Контрольні запитання

1. Який зміст та послідовність виконання лабораторної роботи?
2. Що називають трифазною системою?
3. Як з'єднують обмотки трифазних генераторів, що живлять електромережі?
4. Яке співвідношення між фазними та лінійними значеннями сили струму і напруги при з'єднанні споживачів «зіркою» і «трикутником»?
5. Як визначається активна потужність споживачів при з'єднанні їх «зіркою» і «трикутником» у трифазній системі?
6. Яке співвідношення між потужностями при з'єднанні споживачів «зіркою» і «трикутником»?
7. Яка величина струму в нульовому проводі при симетричному та несиметричному навантаженні; при обриві лінійного провідника?
8. Яка величина струму в нульовому проводі при обриві лінійного?
9. Яка напруга подається до приватних осель, фазна чи лінійна?
10. Пояснити поняття «заземлення» та «занулення». З якою метою їх застосовують?

## Лабораторна робота №10

### Дослідження лінійного електричного кола постійного струму.

**Мета:** Познайомитись з методами розрахунку електричних кіл постійного струму та їх практичного застосування.

#### *Робоче завдання*

1. Провести дослідження можливих режимів роботи джерел постійного струму при різних навантаженнях.
2. Перевірити справедливість методу накладання для розрахунку електричного кола постійного струму.
3. Побудувати потенціальну діаграму для одного із замкнутих контурів електричного кола.

#### *Програма підготовки до виконання завдання*

1. Опрацювати теоретичний матеріал за літературою:  
Основна: Л-4, с.24-32; Л-7, с. 28-34.  
Додаткова:Л-6, с. 31-41
2. Виконати письмово такі завдання:
  - 2.1. Сформулювати закони Кірхгофа, записати їх математичний вираз та пояснити фізичну суть.
  - 2.2. На прикладі будь-якого електричного кола постійного струму пояснити принцип побудови потенціальної діаграми.

**Задача 1.** Методом контурних струмів виконати розрахунок електричного кола, наведеного на схемі (рис. 1). Вважати, що опори резисторів мають такі значення:  $r_1 = r_2 = r_3 = 10\text{ Ом}$ . Величини опорів  $r_2 = r_4 = r_6$  взяти з таблиці 1, а напругу джерел живлення взяти в десять разів більшою від величини відповідних опорів.



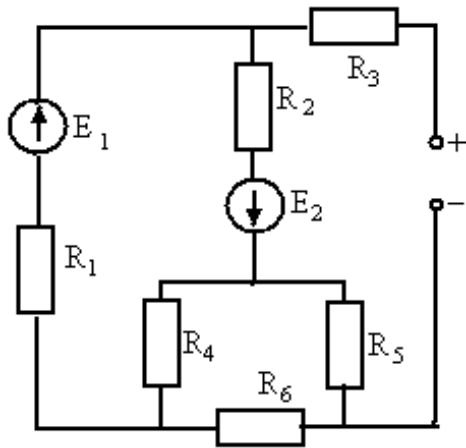


Рис. 1. Схема для розрахунку електричного кола методом контурних струмів

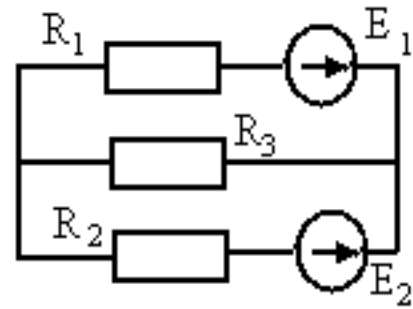


Рис. 2. Схема для розрахунку електричного кола методом накладання

**Задача 2.** Методом накладання виконати розрахунок електричного кола, зображеного на схемі (рис. 2). Величину опорів взяти з попередньої задачі, а ЕРС  $E_1 = E_2 = 10\text{В}$ .

**Задача 3.** Методом вузлових напруг виконати розрахунок параметрів електричного кола у попередній задачі.

Таблиця 1.

|   | 1  | 2   | 3   | 4  | 5   | 6   | 7  | 8   | 9  | 10 |
|---|----|-----|-----|----|-----|-----|----|-----|----|----|
| А | 60 | 108 | 164 | 94 | 140 | 206 | 54 | 176 | 16 | 52 |
| Б | 72 | 154 | 230 | 98 | 106 | 28  | 46 | 90  | 70 | 50 |
| В | 20 | 25  | 36  | 48 | 56  | 26  | 24 | 14  | 38 | 42 |

### Особливості правил техніки безпеки

1. Електричні джерела постійного струму вмикаються відповідно до їх полярності.
2. Зміну величини струму реостатами виконувати плавно, не допускаючи значних коливань.

### **Методичні рекомендації щодо виконання завдання**

1. Скласти електричне коло за схемою, зображеною на рис. 3. Виміряти величини прямих та зворотних струмів в окремих вітках, використовуючи при

цьому амперметри з двохсторонньою шкалою. Напря́м струму вважа́ти пря́мим, якщо він співпадає з напрямком електрорушійної сили джерел  $E_1$  або  $E_2$ . Очевидно, при ввімкненні ключів  $K_1$  та  $K_2$ , стрілки амперметрів  $A_1$  та  $A_2$  будуть відхилитися в ту або іншу сторону, показуючи прямий або зворотній електричний струм у вітках.

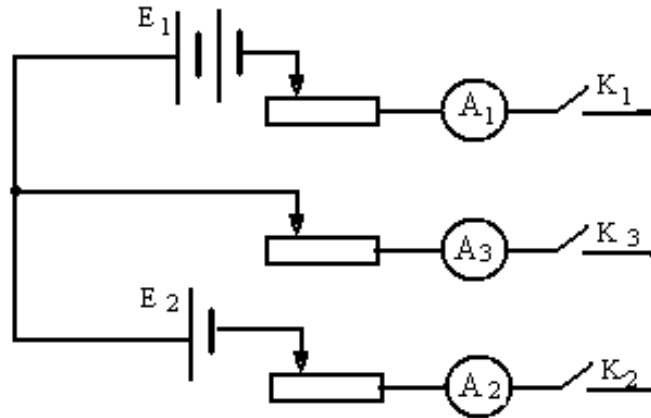


Рис. 3. Електрична схема до виконання роботи.

2. Для дослідження режиму розрядки джерела  $E_2$  увімкнути всі три вимикачі. Змінюючи величину опорів реостатів, встановити прямий напрям струму  $I_2$ . Записати покази амперметрів. При вимкнутих вимикачах, виміряти та записати до *табл. 2* величини опорів обох реостатів.

3. Для дослідження режиму холостого ходу джерела струму  $E_2$ , увімкнути всі три вимикачі. Змінюючи величини опорів на реостатах, встановити величину струму на амперметрі  $A_2$  рівною нулеві. Записати покази приладів до *таблиці 2*. Визначити величину опорів реостатів та записати їх значення до тієї ж таблиці.

Таблиця 2.

| Режим роботи джерела | Параметри |          |          |           |           |           |
|----------------------|-----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
|                      | $I_1(A)$  | $I_2(A)$ | $I_3(A)$ | $R_1(Ом)$ | $R_2(Ом)$ | $R_3(Ом)$ |
| Розрядка джерела     |           |          |          |           |           |           |
| Холостий хід         |           |          |          |           |           |           |
| Зарядка джерела      |           |          |          |           |           |           |

4. Для дослідження режиму зарядки джерела  $E_2$ , повторити досліди пунктів 2-3 так, щоб струм  $I_2$  мав зворотній напрям. Записати покази приладів та значення опорів реостатів до *таблиці 2*.

5. Перевірити практично метод накладання при розрахунках електричного

кола постійного струму. Для цього встановити режим розрядки джерела  $E_2$ . По черзі видаляти джерела  $E_1$  та  $E_2$  і виміряти амперметрами величини струмів, дані занести до *таблиці 3*. Виміряти величини опорів усіх реостатів у положенні розімкнених ключів. Здійснити розрахунки струмів окремих віток і порівняти їх значення з показами амперметрів.

*Таблиця 3*

|                    | Значення струму у вітках |             |             |
|--------------------|--------------------------|-------------|-------------|
| Джерело $E_1$      | $I'_1$ (А)               | $I'_2$ (А)  | $I'_3$ (А)  |
|                    |                          |             |             |
| Джерело $E_2$      | $I''_1$ (А)              | $I''_2$ (А) | $I''_3$ (А) |
|                    |                          |             |             |
| Джерела $E_1, E_2$ | $I_1$ (А)                | $I_2$ (А)   | $I_3$ (А)   |
|                    |                          |             |             |

6. Побудувати потенціальну діаграму для контура з джерелом  $E_2$ .

Додаткове завдання

Перевірити практично метод розрахунку електричного кола методом вузлових напруг.

### Контрольні запитання

1. Який зміст та послідовність виконання роботи?
2. Пояснити фізичну суть понять: сила струму, напруга, опір, потужність, електроенергія.
3. Як співвідносяться фізичні поняття напруги та ЕРС?
4. Пояснити фізичну суть закону Ома.
5. Пояснити фізичну суть законів Кірхгофа.
6. Чи може загальний спад напруги в замкнутому контурі, при побудові потенціальної діаграми, мати значення, що відрізняється від нуля?
7. Пояснити фізичну суть методу контурних струмів.
8. Пояснити фізичну суть методу вузлових напруг.
9. Пояснити фізичну суть методу накладання.
10. Які джерела постійного струму ви знаєте?

**Дослідження роботи однофазного силового трансформатора.**

**Мета:** Вивчити будову та принцип дії однофазного трансформатора, дослідити основні його характеристики в різних режимах роботи.

*Робоче завдання*

1. Дослідити режим холостого ходу однофазного трансформатора. Побудувати зовнішню характеристику і векторну діаграму для цього режиму.
2. Дослідити роботу однофазного трансформатора при активному, індуктивному та ємнісному навантаженнях. Побудувати зовнішні характеристики для таких видів навантажень.
3. Визначити кількість витків первинної та вторинної обмоток трансформатора за допомогою додаткової обмотки.

*Програма підготовки до виконання завдання*

1. Опрацювати теоретичні відомості за літературою:  
Основна: Л-1, с. 94-123; Л-2, с. 123-140.  
Додаткова: Л-3, с. 265-289; Л-4, с. 154-169.
2. Виконати письмово такі завдання:
  - 2.1. Дати визначення і виразити математично принцип саморегулювання трансформатора.
  - 2.2. Побудувати векторну діаграму роботи трансформатора в режимі холостого ходу. Коротко пояснити хід побудови.
  - 2.3. Назвати основні можливі втрати потужності в трансформаторі та способи їх визначення.

**Задача.** Однофазний трансформатор з коефіцієнтом трансформації  $K=0,01S$  розрахований на номінальну потужність  $S(kVA)$ . Напряга первинної обмотки становить  $400\text{ В}$ , величина магнітного потоку в магнітопроводі  $\Phi=2 \cdot 10^{-1} \text{ Вб}$ , коефіцієнт потужності первинної та вторинної обмоток становить

$$\cos \varphi_1 = 0,8; \cos \varphi_2 = 0,7$$

Обчислити сили струмів первинної і вторинної обмоток, коефіцієнт корисної дії трансформатора і кількість витків у первинній та вторинній обмотках. Значення потужності у ватах взяти з *таблиці 1*.

*Таблиця 1.*

|   | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| А | 200 | 500 | 180 | 420 | 240 | 440 | 160 | 300 | 280 | 470 |
| Б | 300 | 210 | 320 | 230 | 410 | 190 | 390 | 270 | 370 | 290 |
| В | 400 | 80  | 90  | 120 | 70  | 50  | 80  | 260 | 450 | 150 |

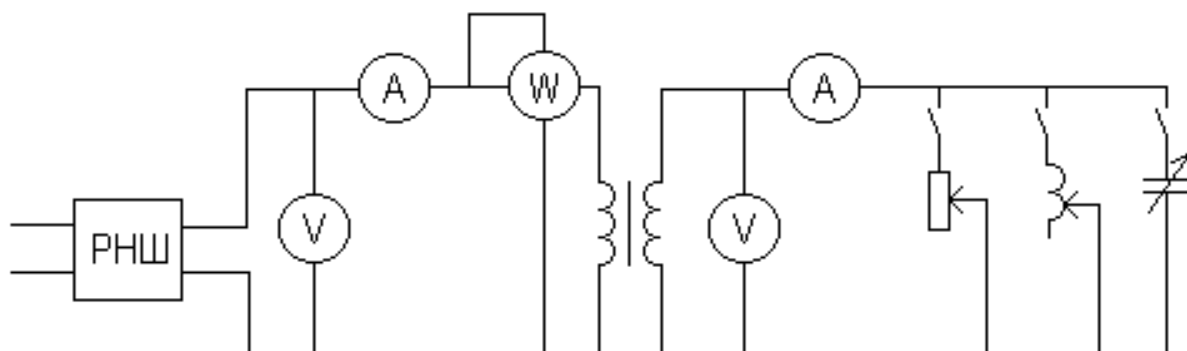
### Особливості правил техніки безпеки

1. Перед вмиканням електричного кола в мережу, вивести ручку регулятора напруги РНШ в крайнє ліве положення (повернути ручку проти годинникової стрілки до кінця), що відповідає мінімальному значенню напруги на виході автотрансформатора.

2. Стежити за тим, щоб не пошкодити ізоляцію на обмотках трансформатора та не здійснити короткого замикання у вторинній обмотці.

### **Методичні рекомендації до виконання завдання**

1. Скласти електричне коло за схемою (рис. 1).



*Рис. 1. Електрична схема для дослідження роботи однофазного трансформатора*

2. Дослідити роботу трансформатора в режимі холостого ходу. Для цього розімкнути всі ключі у колі вторинної обмотки. Змінюючи напругу  $U_1$  від 0 до 220 В на первинній обмотці кратно 40 В, фіксувати напругу вторинної обмотки  $U_2$ .

Дані вимірювань записати до *таблиці 2*.

Для кожного випадку розрахувати  $\cos\varphi$  та коефіцієнт трансформації  $K$ .

*Таблиця 2.*

| $UI$<br>(В) | $I$<br>(А) | $U_2$<br>(В) | $P$<br>(Вт) | $\cos\varphi$ | $K = \frac{U_2}{U_1}$ |
|-------------|------------|--------------|-------------|---------------|-----------------------|
|             |            |              |             |               |                       |

3. Дослідити трансформатор під навантаженням. Для цього вмикати по черзі окремо активний, індуктивний та ємнісний опори; записувати до *таблиці 3* покази приладів для 5 значень напруги на первинній обмотці. Обчислити для кожного випадку повну споживану потужність  $S$ , коефіцієнт потужності  $\cos\varphi$  та коефіцієнт трансформації  $K$ . Побудувати зовнішні характеристики трансформатора в одній координатній системі для різних за характером навантажень і пояснити отримані графіки.

*Таблиця 3.*

| $UI$<br>(В) | $I_1$<br>(А) | $P$<br>(Вт) | $U_2$<br>(В) | $I_2$<br>(А) | $K = \frac{U_2}{U_1}$ | $\cos\varphi$ | $S=UI$<br>(ВА) |
|-------------|--------------|-------------|--------------|--------------|-----------------------|---------------|----------------|
|             |              |             |              |              |                       |               |                |

4. Для визначення кількості витків у первинній та вторинній обмотках трансформатора скористатися додатковою обмоткою з кількістю витків  $n_2$ . Через РНШ подати на первинну обмотку трансформатора напругу  $U_1$ , виміряти напругу на кінцях додаткової обмотки  $U_2$ . Розрахувати коефіцієнт трансформації  $K = \frac{U_2}{U_1}$ . Скориставшись коефіцієнтом трансформації, вирахувати кількість витків первинної обмотки за формулою  $n_1 = Kn_2$ .

### Контрольні запитання

1. Пояснити зміст та послідовність виконання лабораторної роботи?
2. Пояснити будову однофазного силового трансформатора.
3. Як визначити коефіцієнт трансформації?
4. Пояснити сутність виразу для обчислення ЕРС трансформатора.

5. Яке фізичне явище процесів лежить в основі роботи трансформатора?
6. Чи може працювати трансформатор від джерела постійного струму? Чому?
7. Пояснити принцип саморегулювання трансформатора.
8. Які втрати в трансформаторі відбуваються під час його роботи? В якому режимі їх можна виміряти?
9. Чому в режимі навантаження напруга на клеммах вторинної обмотки трансформатора зменшується при збільшенні навантаження?
10. Назвіть спеціальні види трансформаторів.



**Дослідження трифазного асинхронного двигуна.**

- Мета:** 1. Вивчити будову і принцип дії асинхронних двигунів. Дослідити механічну та робочі характеристики трифазного асинхронного двигуна.
2. Навчитись користуватися фазометром.

*Робоче завдання:*

1. Вивчити будову трифазного асинхронного двигуна.
2. Визначити початки і кінці фазних обмоток статора двигуна.
3. Провести дослідження асинхронного двигуна на холостому ході і при навантаженні. За експериментальними даними побудувати механічну та робочу характеристики двигуна.

*Програма підготовки до виконання завдання*

I. Опрацювати теоретичні відомості за літературою:

Основна: Л-1, с.123-154; Л-2, с.140-156.

Додаткова: Л-3, с.291-345; Л-4, с.169-176.

2. Виконати письмово такі завдання:

2.1. Описати спосіб визначення початку і кінця фазних обмоток статора трифазного асинхронного двигуна.

2.2. Дати визначення коефіцієнту ковзання і виразити його математично.

2.3. Виконати електричні схеми різних способів пуску асинхронних двигунів та їх реверсування.

2.4. Дати визначення робочої та механічних характеристик двигуна, записати їх математично та зобразити графічно.

**Задача.** Трифазний асинхронний двигун увімкнений до мережі з лінійною напругою  $380\text{ В}$  при частоті  $f=50\text{ Гц}$ . Номінальна потужність двигуна  $P_n$ , номінальна частота обертання ротора  $n=600\text{ об/хв}$ , коефіцієнт потужності  $\cos \varphi = 0,84$ . Визначити номінальний струм у фазі статора, ККД, номінальне ковзання, число

пар полюсів обмотки статора, номінальний момент на валу ротора. Значення потужності взяти з *таблиці 1*.

*Таблиця 1.*

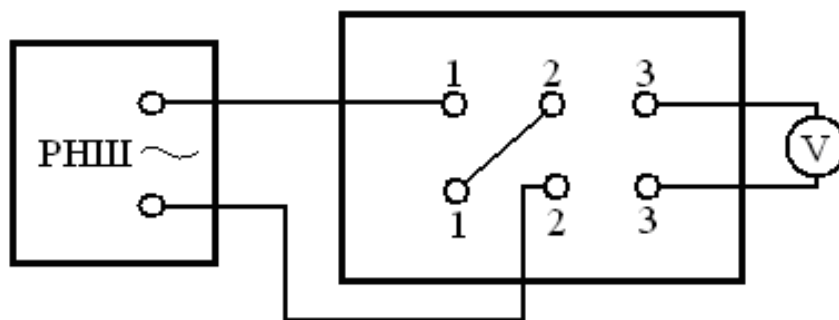
|   | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| А | 1,2 | 5,6 | 3,5 | 2,2 | 1,8 | 20  | 16  | 0,6 | 7,8 | 3,2 |
| Б | 0,8 | 7,0 | 1,5 | 0,3 | 0,9 | 1,7 | 6,4 | 8,8 | 14  | 4,3 |
| В | 3,8 | 8,6 | 30  | 2,4 | 0,7 | 7,4 | 4,8 | 6,8 | 10  | 7,6 |

### Особливості правил техніки безпеки

1. Перед виконанням завдань уважно вивчити правила користування фазометром і стробоскопічним тахометром.
2. Навантаження на валу асинхронного двигуна збільшувати плавно без поштовхів.
3. Запобігаючи перегріванню двигуна, не вмикати його на тривалий час під навантаженням.
4. Завдання виконувати обережно, не забуваючи про рухомі частини двигуна.

### **Методичні рекомендації до виконання завдання**

1. Для вивчення будови асинхронного двигуна використати стенд “Будова асинхронного двигуна” і плакат.
2. На папері замалювати клемний щиток, тобто три пари контактів (рис. 1).
3. За допомогою омметра визначити пари кінців обмоток статора двигуна і позначити їх на рисунку.
4. Визначити початки і кінці кожної фазної статорної обмотки. Для цього до однієї з обмоток, наприклад до контактів 3-3, під’єднують вольтметр. Інші дві обмотки з’єднують між собою послідовно і на їх вільні кінці подають напругу від РНШ (рис. 1).



*Рис. 1. Зразок схеми для визначення початків та кінців обмоток статора.*

Якщо обмотки з’єднані узгоджено, то вольтметр зафіксує напругу. І, навпаки, якщо обмотки з’єднані зустрічно, то вольтметр напругу не зафіксує. Виконати маркування кожного початку та кінця обмоток на клеммах.

5. Приєднати вольтметр до іншої обмотки, а ті, що

залишилися, з'єднати послідовно і повторити пункти 2-4.

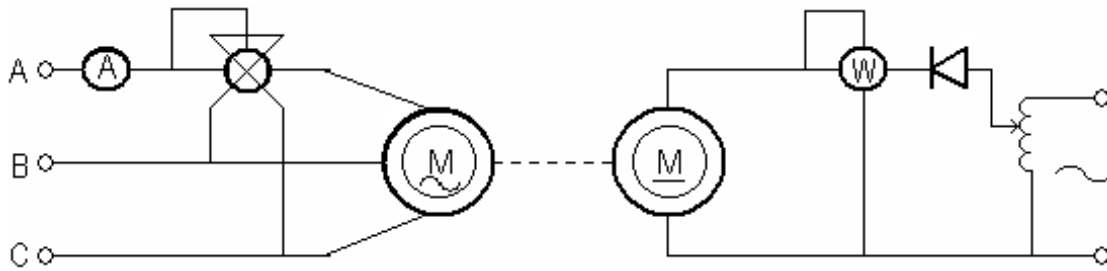


Рис. 2. Схема для дослідження параметрів асинхронного двигуна.

6. Зібрати електричне коло за схемою (рис. 2) і дослідити характеристики двигуна. Вивчити правила користування фазометром для визначення коефіцієнту потужності. Увімкнути трифазний двигун та дослідити його параметри в режимі холостого ходу: виміряти величину лінійного струму  $I_L$ , який споживає асинхронний двигун, його коефіцієнт потужності  $\cos\varphi$  та швидкість обертання ротора  $n_2$ . Вирахувати ковзання  $S$  і споживану активну потужність  $P$ .

При обрахунках скористатися виразами:  $P = 3U_\phi I_\phi \cos\varphi = \sqrt{3}U_L I_L \cos\varphi$ ,  
 $U_L = 380\text{В}$ .

7. Дослідити робочі характеристики асинхронного двигуна. Виміри виконати у такій послідовності: увімкнути постійну напругу для живлення двигуна постійного струму  $M$ , який має зустрічний обертовий момент відносно АД. Цей двигун є електромагнітним гальмом для асинхронного двигуна, він створює навантаження на його валові.

Поступово збільшуючи напругу постійного струму за допомогою РНШ, та записуючи покази приладів (параметри електричного кола) до табл. 1 для 5 випадків, довести коефіцієнт потужності до 0,6.

Параметрами кола асинхронного двигуна є лінійна напруга  $U_L = 380\text{В}$ , змінний лінійний струм  $I_L$ , коефіцієнт потужності  $\cos\varphi$ , швидкість обертання ротора  $n_2$ . Для двигуна постійного струму – споживана ним активна потужність  $P$ , напруга постійного струму  $U_n$ .

Вирахувати споживану асинхронним двигуном активну потужність  $P_1$ , ковзання  $S$ , обертовий момент на валу  $M$ , ККД  $\eta$  і корисну потужність на валу  $P_2$ . У досліджуваному двигуні швидкість обертання магнітного поля статора  $n_1 = 1500$

об/хв., ККД двигуна постійного струму  $\eta_{n.c.}=0,5$ . Результати занести до таблиці 2.

Таблиця 2.

| Виміряти |       |     |     |               |       | Вирахувати |       |       |     |        |
|----------|-------|-----|-----|---------------|-------|------------|-------|-------|-----|--------|
| $U_l$    | $U_n$ | $I$ | $P$ | $\cos\varphi$ | $n_2$ | $S$        | $P_1$ | $P_2$ | $M$ | $\eta$ |
|          |       |     |     |               |       |            |       |       |     |        |
|          |       |     |     |               |       |            |       |       |     |        |
|          |       |     |     |               |       |            |       |       |     |        |
|          |       |     |     |               |       |            |       |       |     |        |

За отриманими даними побудувати робочі та механічні характеристики двигуна.

### Контрольні запитання

1. Який зміст та послідовність виконання лабораторної роботи?
1. Будова та принцип дії двигунів.
2. Яких конструкцій бувають ротори асинхронних двигунів? Від чого залежить застосування конкретної конструкції ротора?
3. Що називають ковзанням? Як змінюється ковзання при зменшенні навантаження на валу двигуна?
4. Пояснити принцип саморегулювання асинхронних двигунів.
5. Які характеристики відносяться до механічних, а які до робочих?
6. Переваги та недоліки асинхронних двигунів.
7. Де використовують асинхронні двигуни?
8. Пояснити будову і принцип дії однофазного асинхронного двигуна.
9. Які варіанти під'єднання трифазного асинхронного двигуна до однофазної мережі ви знаєте.

**Дослідження генератора постійного струму паралельного та змішаного збуджень.**

**Мета:** Вивчити будову, принцип дії та дослідити основні характеристики генератора постійного струму (ПС).

*Робоче завдання*

1. Вивчити будову, основні вузли та фізичні закони, які покладені в основу принципу дії генераторів.
2. За допомогою омметра визначити маркування контактів генератора.
3. Дослідити характеристику холостого ходу, зовнішню та регульовальну характеристики генератора з паралельним збудженням .
4. Дослідити регульовальну та зовнішню характеристики генератора змішаного збудження при узгодженому і неузгодженому вмиканні обмоток збудження.

*Програма підготовки*

1. Опрацювати теоретичні відомості за літературою:

Основна: Л-1, с.180-197; Л-2, с.186-204.

Додаткова: Л-3, с.366-389; Л-4, с.187-205; Л-5, с.332-259.

2. Виконати письмово такі завдання:

2.1. Перерахувати основні вузли, вказати їх призначення і зарисувати електричні схеми генераторів постійного струму з різними способами ввімкнення обмоток збудження.

2.2. Записати основні відмінності характеристик холостого ходу, зовнішньої та регульовальної для генераторів постійного струму з послідовним, паралельним та мішаним збудженням?

2.3. Що таке реакція якоря та комутація?

2.4. Записати причини, які викликають зменшення величини напруги нерегульованого генератора паралельного збудження при збільшенні

навантаження.

**Задача.** Номінальна напруга генератора постійного струму  $U$ , корисна потужність  $P$ . Опір обмотки якоря  $r=0,1\text{Ом}$ , послідовної обмотки збудження  $r_c=0,02\text{Ом}$ , паралельної  $r_{ш}=12\text{Ом}$ . Визначити ЕРС якоря, загальний струм, струм якоря і збудження, електричну потужність генератора. Величину напруги взяти в *таблиці 1*, величину потужності прийняти чисельно в 50 разів більшою від величини напруги.



Таблиця 1.

|   | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 |
|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| А | 24 | 40 | 58 | 74 | 28 | 46 | 64 | 80 | 34 | 52 |
| Б | 88 | 26 | 42 | 60 | 76 | 30 | 48 | 66 | 82 | 36 |
| В | 22 | 90 | 26 | 44 | 62 | 78 | 32 | 50 | 68 | 84 |

### Особливості правил техніки безпеки

1. Перед увімкненням двигуна перевірити наявність його заземлення.
2. Під час роботи стежити, щоб на пасову передачу між двигуном та генератором не потрапляли сторонні предмети.
3. З метою запобігання К.З., при увімкненні навантаження реостат  $R_n$  повинен перебувати в середньому положенні.

### **Методичні рекомендації до виконання завдання**

1. Для вивчення будови генератора скористатися стендом та плакатом. Уважно розглянути основні частини та вузли всієї установки. За допомогою омметра визначити кінці паралельної (клеми  $Ш_1$  та  $Ш_2$ ), послідовної (клеми  $C_1$  і  $C_2$ ) обмоток збудження та обмотки якоря – клеми  $Я_1$  і  $Я_2$ .

2. Дослідити характеристику холостого ходу генератора з паралельним збудженням. Для цього скласти електричне коло за схемою (рис. 1), з'єднати провідником (закоротити) клеми  $C_1$ - $C_2$  послідовної обмотки збудження і ключем  $K$  вимкнути навантаження. Реостатом  $R_{зб}$  встановити номінальну напругу на затискачах генератора. Регулюючи величину струму збудження, зменшити напругу на клеммах генератора від номінального значення  $U_n$  до  $U=0,5U_n$ . Покази приладів записати до таблиці 1 для 5 випадків.

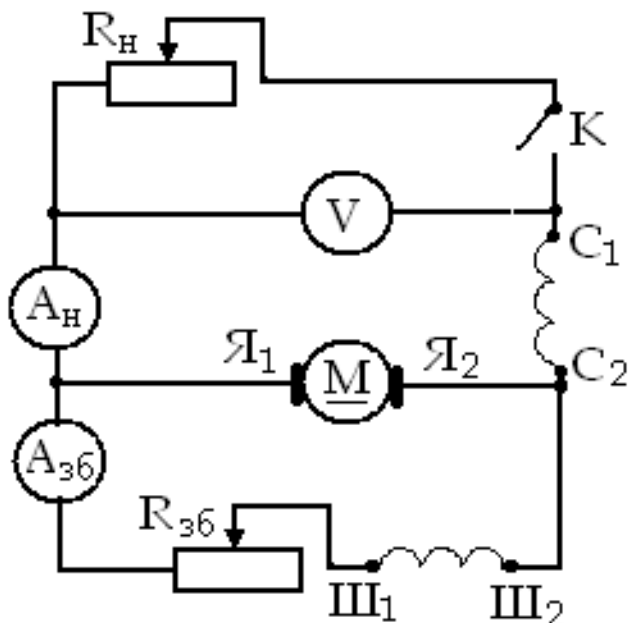


Рис. 1. Електрична схема до роботи

3. Дослідити зовнішню характеристику генератора з паралельним збудженням. Установити номінальну напругу (вказана в паспорті на генераторі) на виході генератора  $U_{ном}$ , увімкнути навантаження і, збільшуючи його до значення  $I=I_n$ , записати покази приладів до таблиці 2 для 5 випадків.

4. Для дослідження регульовальної характеристики генератора з паралельним збудженням, поступово навантажувати генератор за допомогою реостата  $R_n$ . Одночасно за допомогою реостата  $R_{36}$  змінювати струм збудження так, щоб напруга на клемі генератора залишилась незмінною. Записати покази приладів для 5 випадків до таблиці 2.

5. Дослідити генератор в режимі – з мішаним збудженням. Зняти перемичку з клем  $C_1$ –  $C_2$ . Дослідити зовнішню характеристику з узгодженим та неузгодженим увімкненням послідовної обмотки збудження. При цьому виконати такі дії:

а) увімкнути мінімальне навантаження, збільшуючи його до значення  $I=I_{ном}$ . (вказана в паспорті на генераторі), записати покази приладів для 5 випадків;

б) поміняти місцями провідники на клемі  $C_1$  та  $C_2$ , тим самим змінити напрямок струму у послідовній обмотці, а отже і напрямок магнітного поля цієї обмотки. Записати покази приладів для 5 випадків до таблиці 3.

Самостійно встановити, при якому напрямку струму у послідовній обмотці було узгоджене, а в якому зустрічне вмикання обмоток.

6. Для дослідження регульовальної характеристики генератора з мішаним

збудженням, одночасно зі зміною навантаження змінювати струм збудження так, щоб напруга на клеммах генератора залишалася незмінною. Дослід провести для узгодженого вмикання обмоток. Дані записати для 5 випадків і занести до таблиці 3.

7. Для всіх випадків вирахувати опір зовнішнього кола, потужність навантаження, ККД генератора (значення споживаної потужності задає керівник заняття).

Таблиця 2.

Таблиця для дослідження генератора з паралельним збудженням

| Характеристики |       |          |       |          |       |        |              |       |       |       |     |
|----------------|-------|----------|-------|----------|-------|--------|--------------|-------|-------|-------|-----|
| Хол. хід.      |       | Зовнішня |       |          |       |        | Регулювальна |       |       |       |     |
| $I_{zb}$       | $U_r$ | $I_n$    | $U_r$ | $R_n$    | $P_n$ | $\eta$ | $I_{zb}$     | $I_n$ | $U_r$ | $P_n$ | $H$ |
| $A$            | $B$   | $A$      | $B$   | $\Omega$ | $Вт$  |        | $A$          | $A$   | $B$   | $Вт$  |     |
|                |       |          |       |          |       |        |              |       |       |       |     |

Таблиця 3.

Таблиця для дослідження генератора з мішаним збудженням

| Характеристики                      |     |          |       |       |        |                                       |       |     |          |       |        |              |       |     |          |      |        |
|-------------------------------------|-----|----------|-------|-------|--------|---------------------------------------|-------|-----|----------|-------|--------|--------------|-------|-----|----------|------|--------|
| Зовнішня при узгодженому ввімкненні |     |          |       |       |        | Зовнішня при неузгодженому ввімкненні |       |     |          |       |        | Регулювальна |       |     |          |      |        |
| $I_z$                               | $U$ | $R_n$    | $I_n$ | $P_n$ | $\eta$ | $I_z$                                 | $I_n$ | $U$ | $R_n$    | $P_n$ | $\eta$ | $I_z$        | $I_n$ | $U$ | $R_n$    | $P$  | $\eta$ |
| $A$                                 | $B$ | $\Omega$ | $A$   | $Вт$  |        | $A$                                   | $A$   | $B$ | $\Omega$ | $Вт$  |        | $A$          | $A$   | $B$ | $\Omega$ | $Вт$ |        |
|                                     |     |          |       |       |        |                                       |       |     |          |       |        |              |       |     |          |      |        |

8. Для всіх випадків побудувати в одній координатній системі характеристики холостого ходу: зовнішні та регулювальні.

### Контрольні запитання

1. Який зміст та послідовність виконання лабораторної роботи?
2. Де застосовуються генератори постійного струму з різними способами збудження?

3. Пояснити будову і принцип дії генераторів постійного струму з паралельним збудженням. Переваги та недоліки цих генераторів.
4. Пояснити будову і принцип дії генератора постійного струму з послідовним збудженням. Чим відрізняється зовнішня характеристика генератора постійного струму з послідовним збудженням від генератора постійного струму з паралельним збудженням?
5. Пояснити будову і принцип дії генератора з мішаним збудженням. Особливості зовнішньої характеристики такого генератора.
6. Яка ЕРС індукується в обмотках якоря генератора струму?
7. Яка частина генератора постійного струму нерухома по відношенню до його основного магнітного потоку?
8. Як змінюється сумарне магнітне поле генератора з мішаним збудженням, якщо його обмотки збудження перемкнуті з узгодженого на неузгоджене збудження?
9. Як змінюється величина напруги на клеммах генератора мішаного збудження якщо його обмотки збудження перемкнуті з неузгодженого на узгоджене вмикання?
10. Як зміниться сила струму в паралельній обмотці збудження компаундного генератора при збільшенні навантаження на клеммах.

**Дослідження роботи двигуна постійного струму  
з послідовним та паралельним збудженням.**

**Мета:** Вивчити будову двигуна постійного струму, засвоїти способи його вмикання і пуску; дослідити робочі та механічні характеристики двигуна при різних способах вмикання обмоток збудження.

*Робоче завдання*

1. Здійснити маркування виводів обмоток двигуна за допомогою омметра.
2. Дослідити характеристику холостого ходу двигуна при паралельному та послідовному ввімкненні обмоток збудження.
3. Дослідити робочу та регульовальну характеристики двигуна при паралельному та послідовному збудженні.

*Програма підготовки до виконання завдання*

1. Опрацювати теоретичні відомості за літературою:

Основна: Л-1, с.197-207; Л-2, с. 204-217.

Додаткова: Л-3, с. 364-384, 205-215; Л-5, с. 332-382.

2. Виконати письмово такі завдання:

2.1. Назвати типи двигунів постійного струму (ДПС) за способом збудження, замалювати їх електричні схеми та записати рівняння швидкості.

2.2. Пояснити фізичну суть рівняння швидкості обертання якоря двигуна.

2.3. Записати рівняння і пояснити фізичну суть явища електричної рівноваги для двигунів послідовного та паралельного збудження

2.4. Записати і пояснити рівняння для визначення споживаної потужності.

2.5. Проаналізувати механічні характеристики двигуна постійного струму – холостого ходу, робочу та регульовальну.

**Задача.** Двигун постійного струму паралельного збудження живиться від джерела постійного струму напругою  $U$ , споживає струм  $I_n$ . Опір обмотки якоря

$I_{я}$ , опір обмотки збудження  $R_{зб}$ , а коефіцієнт корисної дії  $\eta = 0,85$ . Визначити: споживану потужність; потужність на валу; втрати в якорі, обмотці збудження та механічні втрати. Величину напруги взяти з *таблиці 1*. Величину струму взяти у 5 раз меншою від чисельного значення напруги, опір якоря – у 100 раз, опір збудження – у 2 рази .

*Таблиця 1.*

|   | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11 | 12  |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|
| А | 110 | 220 | 350 | 50  | 140 | 250 | 370 | 70  | 180 | 300 | 90 | 330 |
| Б | 40  | 100 | 230 | 130 | 250 | 150 | 270 | 170 | 290 | 190 | 50 | 400 |
| В | 340 | 410 | 120 | 240 | 360 | 60  | 160 | 200 | 80  | 320 | 70 | 210 |

Увага! Прискладанні електричного кола за робочою схемою і при виконанні завдання обов'язково враховувати технічні дані електродвигуна.

### Особливості правил техніки безпеки

1. Перед вмиканням напруги, повністю вивести РНШ. Для цього повернути ручку регулювання напруги проти стрілки годинника до положення обмеження.
2. При зміні навантаження на валу двигуна потрібно вимикати напругу.

### **Методичні рекомендації щодо виконання завдання**

1. За допомогою омметра визначити кінці обмоток збудження та якоря. Вони мають різну величину опору. Опір обмотки збудження більший від опору обмотки якоря.
2. Для дослідження характеристик двигуна з послідовним збудженням у режимі холостого ходу (без навантаження на валу) зібрати електричне коло за схемою, зображеною на рис. 1. Змінюючи силу струму якоря  $I_{я}$  (а отже й струму збудження  $I_{зб}$ ), виміряти частоту обертання якоря для 5 випадків.

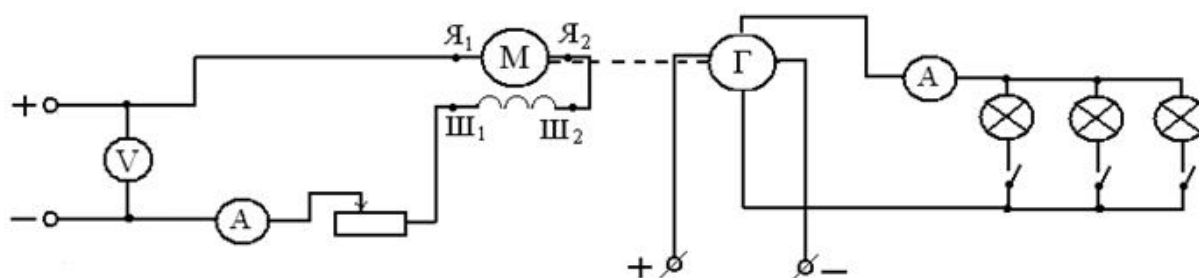


Рис. 1. Схема для дослідження двигуна з послідовним збудженням.

Результати вимірювань занести до таблиці 2.

Таблиця 2.

| $U(B)$               | $I_{зб}(A)$ | $n(об/хв)$ | $S(BA)$ |
|----------------------|-------------|------------|---------|
| Послідовне збудження |             |            |         |
|                      |             |            |         |
| Паралельне збудження |             |            |         |
|                      |             |            |         |

3. При дослідженні характеристик двигуна з послідовним збудженням у режимі навантаження, схема залишається попередньою.

Навантаженням для ДПС є генератор, який живить 3 електричні лампи, розташовані на стенді. При вимкнених лампочках генератор, а отже й двигун, працює в режимі ХХ. Для створення механічного навантаження на валу двигуна, вмикають по черзі електричні лампочки. Тому механічне навантаження (механічний обертовий момент) на валу двигуна залежить від кількості ламп, увімкнених до генератора.

Для кожного значення обертового моменту фіксувати частоту обертання вала  $n$  за допомогою тахометра, а також напругу живлення  $U$  та споживаний двигуном струм  $I_n$ . Дані вимірювань занести до таблиці 3.

Таблиця 3.

| $U$<br>(В) | $I$<br>(А) | $n$<br>(об/хв) | $S$<br>(ВА) | $M$<br>(Нм) | $P$<br>(Вт) | $\eta$ |
|------------|------------|----------------|-------------|-------------|-------------|--------|
|            |            |                |             |             |             |        |

За даними вимірювань обчислити споживану двигуном повну потужність  $S$ , корисну потужність на валу  $P$  та коефіцієнт корисної дії  $\eta$ . Розрахунки корисної

потужності та ККД здійснити за такими виразами:  $P = \frac{Mn}{0,159}$ ;  $\eta = \frac{P}{S}$ . Результати розрахунків занести до таблиці 3.

4. Для дослідження характеристик двигуна з паралельним збудженням на холостому ході, скласти електричне коло за схемою, зображеною на рис. 2. Змінюючи струм збудження  $I_{зб}$ , виміряти швидкість обертання якоря  $n$  для 5

значень.

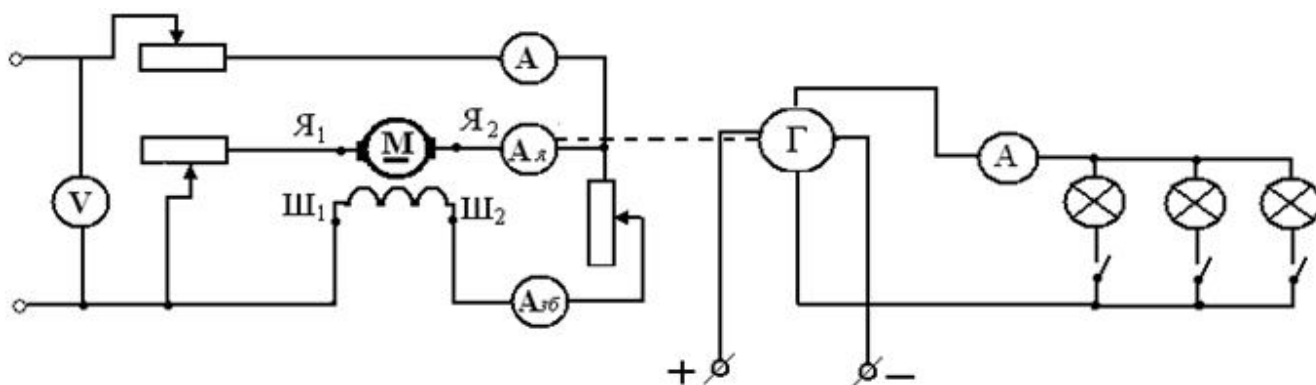


Рис. 2. Схема для дослідження двигуна з паралельним збудженням.

Результати вимірювань занести до таблиці 2.

5. Для дослідження робочих характеристик навантаженого двигуна з паралельним збудженням (рис. 2), виконати дії пункту 3. Покази приладів занести до таблиці 4.

Таблиця 4.

| $U$<br>(В) | $I_{зб}$<br>(А) | $I_{я}$<br>(А) | $I_{заг}$<br>(А) | $S$<br>(ВА) | $P$<br>(Вт) | $n$<br>(об/хв) | $M$<br>(Нм) | $\eta$ |
|------------|-----------------|----------------|------------------|-------------|-------------|----------------|-------------|--------|
|            |                 |                |                  |             |             |                |             |        |

6. При дослідженні регульовальної характеристики двигуна з паралельним збудженням, встановити постійне навантаження  $M$  (увімкнені три лампочки). Змінюючи силу струму якоря і струм збудження так, щоб напруга на затискачах двигуна та частота обертання якоря залишалися постійними, записати покази решти приладів до табл. 5. Завдання виконати для 5 випадків.

Таблиця 5.

| $U$<br>(В) | $I_{зб}$<br>(А) | $I_{я}$<br>(А) | $I_{заг}$<br>(А) | $n$<br>(об/хв) | $F$<br>(Н) |
|------------|-----------------|----------------|------------------|----------------|------------|
|            |                 |                |                  |                |            |

7. Побудувати характеристики: регульовальні, холостого ходу  $n = f(I_{зб})$  та робочі  $M = f(P); n = f(P); \eta = f(P)$ .

### Додаткове завдання

1. Дослідити зовнішні характеристики двигуна, що відображають залежність частоти обертання та струму якоря від зміни навантаження на його валу.



2. Розробити схему і дослідити характеристики двигуна з незалежним збудженням.
3. Назвати фізичні закони, що проявляються в роботі двигуна постійного струму.

Контрольні запитання

1. Пояснити зміст і послідовність лабораторної роботи.
2. Назвати основні вузли ДПС, пояснити принцип його дії.
3. Яка частина ДПС називається якорем?
4. Яке призначення колектора машини?
5. Для чого зменшують пусковий струм?
6. Як зміниться частота обертання якоря (рис. 12), якщо опір резистора збільшити?

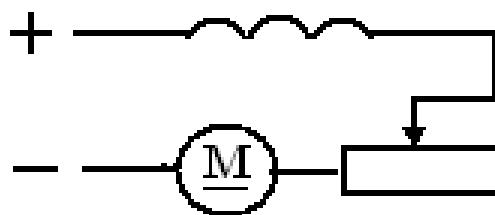


Рис.12.

7. Чому у міському транспорті використовують двигуни постійного струму?
8. Чим регулюють швидкість обертання якоря двигуна з паралельним збудженням?
9. Чим регулюють швидкість обертання якоря двигуна з послідовним збудженням?
10. Як змінюється ККД двигуна, при збільшенні його навантаження?

**Дослідження універсального двигуна.**

**Мета:** Вивчити будову колекторного універсального двигуна, способи його вмикання в мережу постійного та змінного струмів; дослідити основні його характеристики.

*Робоче завдання*

1. Дослідити залежність частоти обертання ротора універсального двигуна від величини напруги живлення та струму якоря. Досліди виконати для змінного і постійного струмів живлення.
2. Дослідити споживану двигуном потужність при зміні навантаження на валу для змінного та постійного струмів.
3. Познайомитися з типом і будовою електроприводів ручних електричних інструментів.

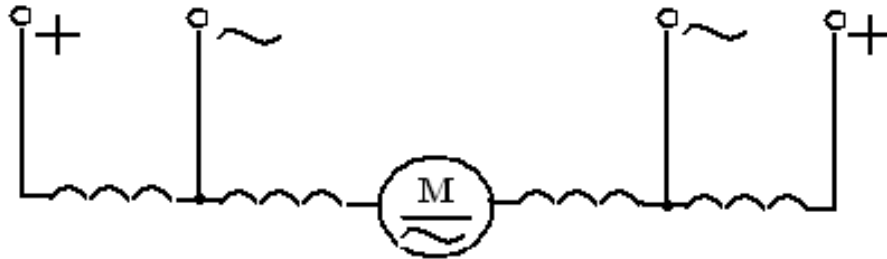
*Програма підготовки*

1. Опрацювати теоретичні відомості за літературою:  
Основна: Л-1, с. 207, 328-342; Л-2, с.179-186.  
Додаткова: Л-4, с.215-221.
2. Виконати письмово такі завдання:
  - 2.1. Описати будову колекторного універсального двигуна та призначення його частин.
  - 2.2. Перерахувати електричні приводи, що використовуються в сучасних електромеханічних побутових апаратах; назвати умови вибору типу електродвигуна.
  - 2.3. Дати визначення, математичне і графічне відображення електромеханічної та механічної характеристик універсального двигуна.
  - 2.4. Перерахувати схожість та відмінність конструкцій основних вузлів

універсального колекторного двигуна та машини постійного струму.

**Задача.** 1) Довести, що формула для розрахунку потужності на валу

електродвигуна має такий вигляд: 
$$N = \frac{\pi d n}{t} \cdot F$$
. Де:  $N$  – потужність на валу двигуна;  $d$  – діаметр шківів;  $n$  – число обертів вала за час  $t$ ; сила  $F$  – навантаження на валу.



*Рис. 1. Схема обмотки збудження універсального колекторного двигуна.*

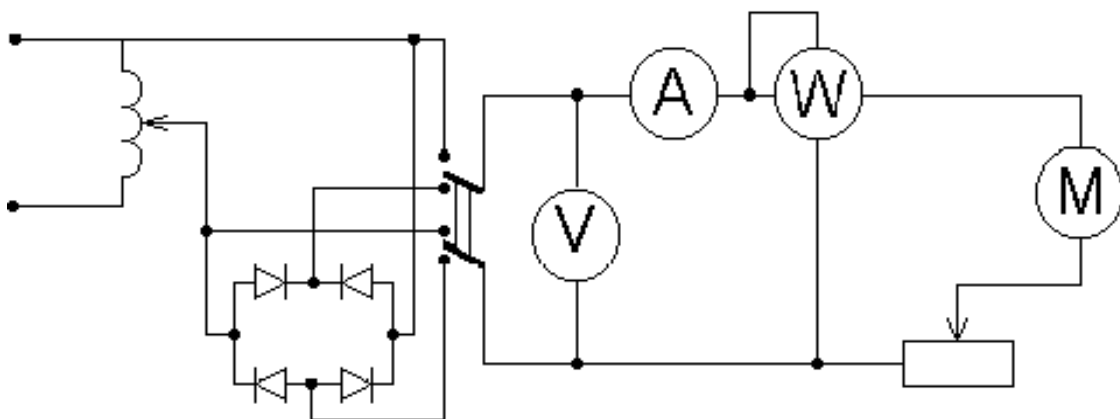
2) Чому вмикання універсального двигуна в мережу змінного струму обмежується двома котушками, а для постійного струму використовуються 4 котушки, як показано на схемі (рис. 1).

### Особливості правил техніки безпеки

1. Перед пуском універсального двигуна повністю ввести реостат.
2. У режимі холостого ходу швидкість обертання ротора не повинна перевищувати її номінального значення.

### **Методичні рекомендації до виконання завдання**

1. Скласти електричне коло за схемою, зображеною на рисунку 2.



*Рис.2. Електрична схема до виконання роботи.*

2. Для дослідження залежності частоти обертання ротора  $n$  від величини постійної напруги живлення  $U$  в режимі холостого ходу, здійснити 5 вимірювань

для різних її значень при незмінній величині струму якоря. (для змінного та постійного струмів живлення).

3. Виконати 5 дослідів для вимірювання частоти обертання ротора залежно від величини споживаного струму якоря при стабільній постійній напрузі без навантаження на валу двигуна. Дані вимірювань занести до *таблиці 1*.

*Таблиця 1.*

| <i>Постійна напруга</i> |                |                 |                | <i>Змінна напруга</i> |                |                 |                |
|-------------------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------------|----------------|-----------------|----------------|
| <i>I=const</i>          |                | <i>U= const</i> |                | <i>I= const</i>       |                | <i>U= const</i> |                |
| <i>U</i>                | <i>n</i>       | <i>I</i>        | <i>n</i>       | <i>U</i>              | <i>n</i>       | <i>I</i>        | <i>n</i>       |
| <i>(В)</i>              | <i>(об/хв)</i> | <i>(А)</i>      | <i>(об/хв)</i> | <i>(В)</i>            | <i>(об/хв)</i> | <i>(А)</i>      | <i>(об/хв)</i> |
|                         |                |                 |                |                       |                |                 |                |

4. Дослідити механічні характеристики двигуна. Для цього змінювати величину механічного навантаження на шківу і за допомогою стробоскопа визначати частоту його обертання.

5. Перевести перемикач в положення змінної напруги живлення і повторити пункти 2-3.

Регулювання навантаження здійснювати завдяки натягу стрічки динамометра, яка має зчеплення з шківом, і при цьому гальмує вал двигуна з силою тертя  $F$ , що виникає між ними.

Записати покази приладів при постійному та змінному струмах для 5 показів динамометра: 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5Н. Напруга повинна бути стабільною (однаковою) для всіх 5 вимірів.

Вирахувати для кожного випадку коефіцієнт потужності  $\cos \varphi$ , потужність на валу  $N$  та ККД двигуна  $\eta$ . Результати вимірювань та обчислення занести до таблиці 2.

*Таблиця 2.*

| <i>F</i>   | <i>U</i>   | <i>I</i>   | <i>P</i>    | <i>N</i>       | <i>N</i>    | $\cos \varphi$ | $\eta$ |
|------------|------------|------------|-------------|----------------|-------------|----------------|--------|
| <i>(Н)</i> | <i>(В)</i> | <i>(А)</i> | <i>(Вт)</i> | <i>(об/хв)</i> | <i>(Вт)</i> |                |        |
|            |            |            |             |                |             |                |        |

### Контрольні запитання

1. Пояснити зміст та послідовність виконання лабораторної роботи.
2. Які двигуни використовуються в різних побутових електромеханічних пристроях і апаратах, ручних електричних інструментах та які причини їх вибору?
3. Пояснити принцип дії та будову універсального колекторного двигуна.
4. Як зміниться показ амперметра, якщо перемикач перевести з положення 2 у положення I (див. рис. 3):

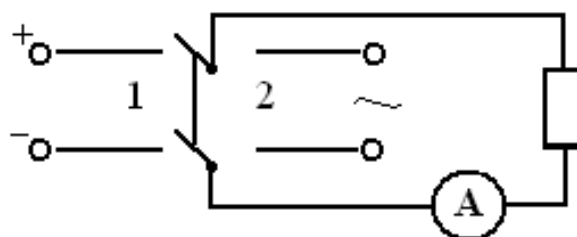
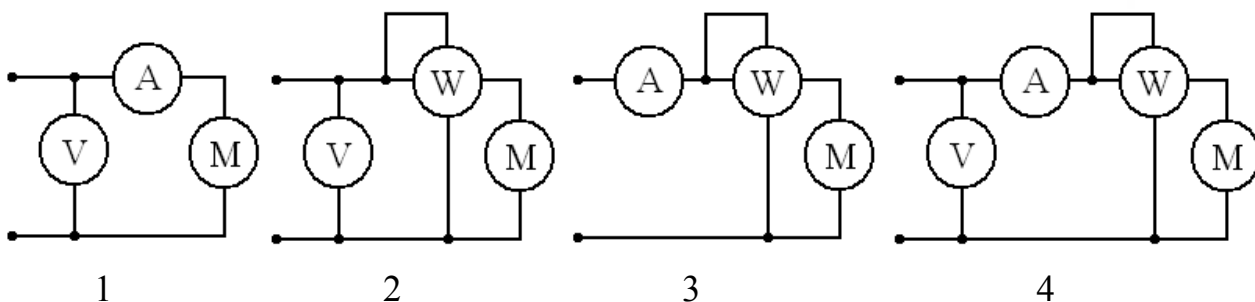


Рис. 3.

5. Як з'єднані обмотки індуктора і якоря в універсальних двигунах.
6. Чому повністю оминають обмотку збудження двигуна при живленні його змінним струмом, а при постійному струмі використовують частину обмотки статора?
7. Як зміниться величина опору універсального двигуна, якщо його від'єднати від мережі постійного струму та увімкнути до мережі змінного струму однакової напруги?
8. Залежність між якими параметрами є механічна характеристика універсального двигуна?
9. Як регулюють частоту обертання універсального двигуна?
10. Яка з поданих схем може бути використана для визначення коефіцієнту потужності двигуна?



**Дослідження параметрів змінного струму.**

**Мета:** Поглибити знання з розділу електротехніки «Змінний струм», навчитися працювати з програмою EWB при дослідженні параметрів електричних кіл змінного струму.

*Робоче завдання*

1. Скласти віртуальні електричні кола і дослідити графіки змінного струму трьох видів гармонік – синусоїдної, трикутної та П-подібної.
2. За допомогою віртуального осцилографа визначити амплітудні значення струму і напруги заданих гармонік.
3. Порівняти співвідношення між амплітудними значеннями струму і напруги з діючими значеннями цих параметрів. Виміри здійснити за допомогою віртуального осцилографа і вольтметра.

*Програма підготовки*

1. Опрацювати теоретичні відомості за літературою:  
Основна: Л-1, с. 11-44; Л-2, с. 7-24.  
Додаткова: Л-8, с.206-212.
2. Виконати письмово такі завдання:
  - 2.1. Вивести вираз для встановлення співвідношення між амплітудними та діючими значеннями напруги (струму) – синусоїдальної, трикутної та П-подібної гармонік змінного струму.
  - 2.2. Зарисувати робочі схеми до виконання роботи.
  - 2.3. Зарисувати таблицю для запису даних вимірювань.
3. Знати основні елементи програми EWB і прийоми виконання віртуальних електричних кіл у ній.

*Методичні рекомендації до виконання завдання*

1. У програмі EWB скласти електричне коло, що має функціональний генератор, який утворює синусоїдну, трикутну і П-подібну гармоніки, ідеальний генератор змінної напруги, перемикач [Space], вольтметр V та осцилограф (рис. 1).

2. Встановити на функціональному генераторі гармоніку трикутної форми (рис. 2).

3. Встановити параметри функціонального генератора та генератора змінної синусоїдної напруги:

- амплітудне значення функціонального генератора  $U_{\max} = 20 \text{ В}$ ;
- діюче значення напруги генератора синусоїдної гармоніки  $U = 20 \text{ В}$ ;
- частоту гармонійних коливань  $f = 50 \text{ Гц}$ .

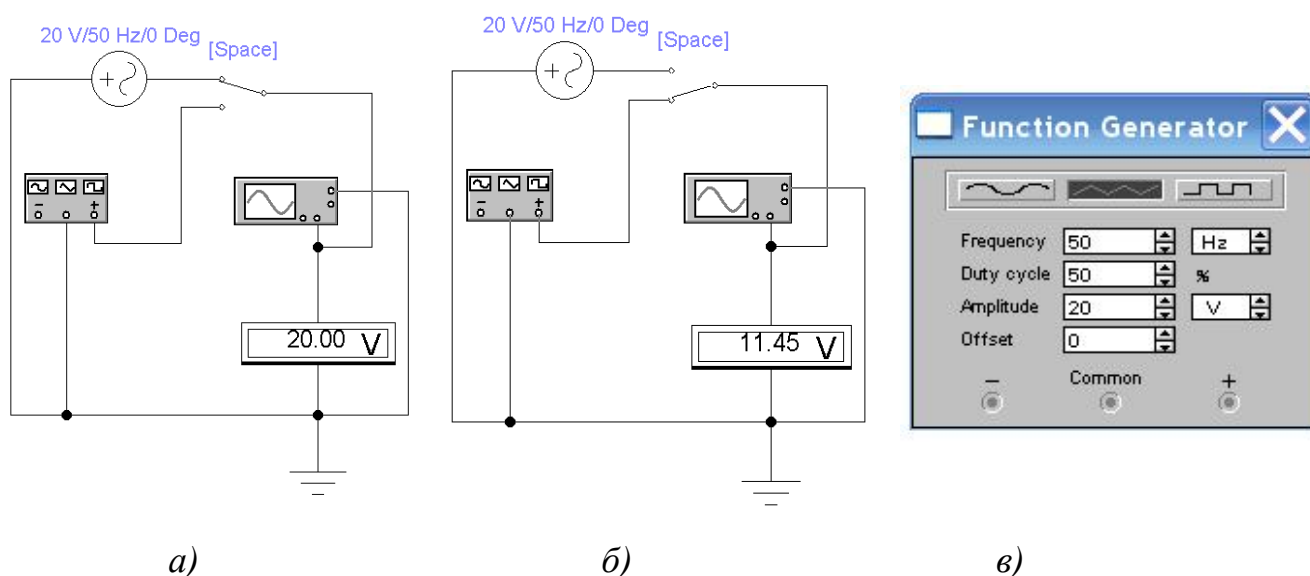


Рис. 1. Схема електричного кола з генератором синусоїдального струму – а, функціональним генератором (ФГ) – б, панель ФГ – в.

3. Вольтметр виставити в режим вимірювання діючого значення змінної напруги (AC), так як «по умовчанию» він працює в режимі вимірювання постійної напруги (DC).

4. Перемикачем [Space] за допомогою клавіші z увімкнути по черзі генератори синусоїдної напруги та функціональний і здійснити вимірювання амплітудних значень напруги на виході генераторів за показами осцилографа (рис. 2). Для цього на панелі осцилографа підвести візирні лінійки до вершин графіків і прочитати величини амплітудних значень напруги. Дані записати до таблиці 1.

5. За показами вольтметра виміряти діючі значення напруги. Дані показів записати до таблиці 1.

6. За завданням викладача здійснити 5 вимірів при різних значеннях напруги і частоти. Переконайтеся у справедливості співвідношень діючих і

амплітудних значень напруги синусоїдального струму –  $U = \frac{U_{\max}}{\sqrt{2}}$  та гармоніки

трикутної форми –  $U = \frac{U_{\max}}{\sqrt{3}}$ .

Таблиця 1.

| №<br>п/п | Форма гармоніки | $U_{\max}$<br>(В) | $U$<br>(В) | $I_{\max}$<br>(А) | $I$<br>(А) |
|----------|-----------------|-------------------|------------|-------------------|------------|
| 1        | Синусоїдальна   |                   |            |                   |            |
| 2        | Трикутна        |                   |            |                   |            |
| 3        | П-подібна       |                   |            |                   |            |

7. За допомогою курсора вибрати на функціональному генераторі гармоніку П-подібної форми (рис. 3) і повторити п. 1-6. Пересвідчитись, що максимальні і діючі значення параметрів змінного струму, що має гармоніку П-подібної форми, будуть рівними:  $I=I_{\max}$  та  $U=U_{\max}$ .



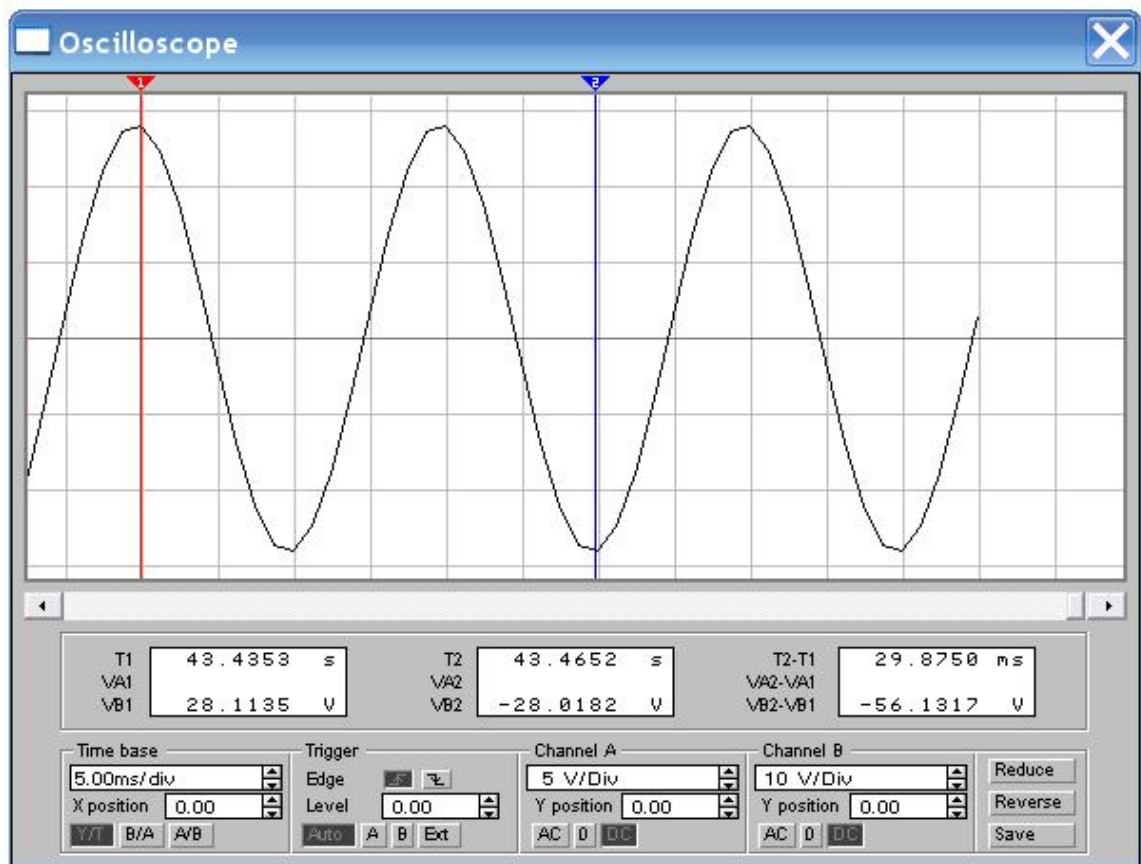
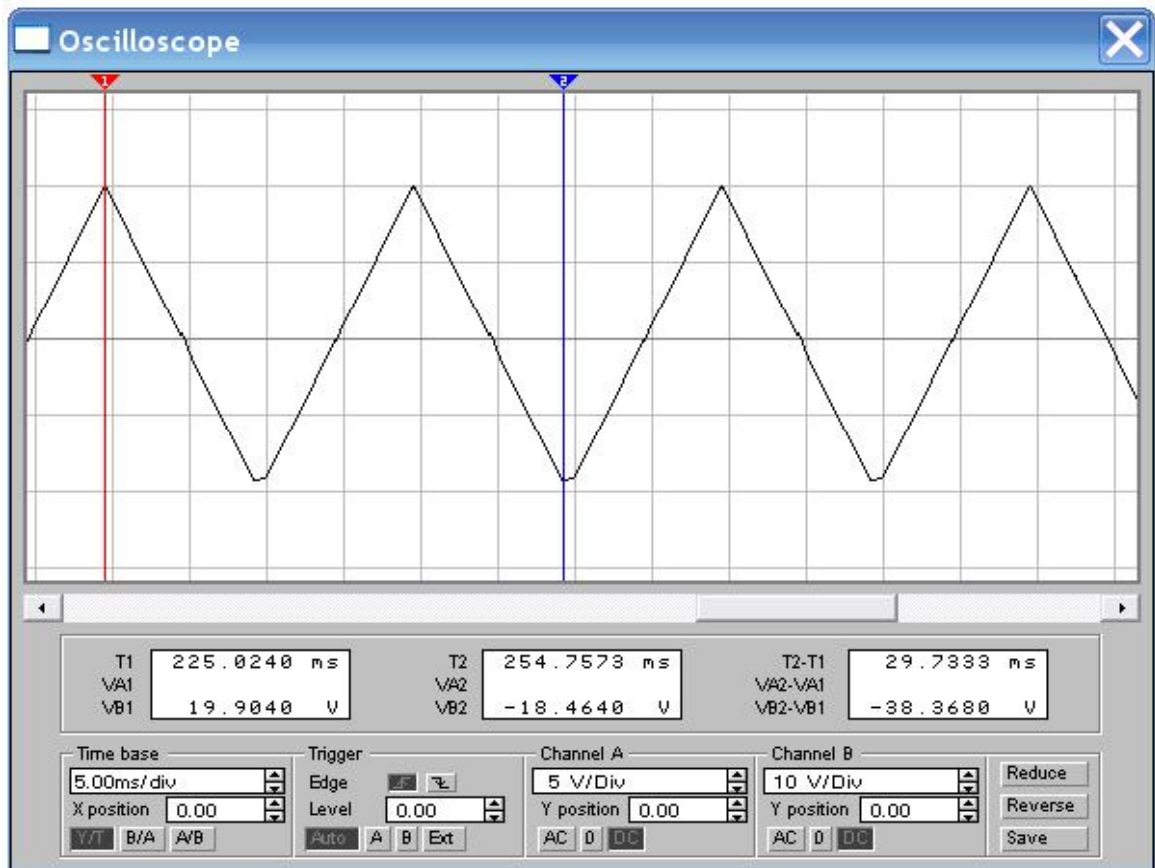
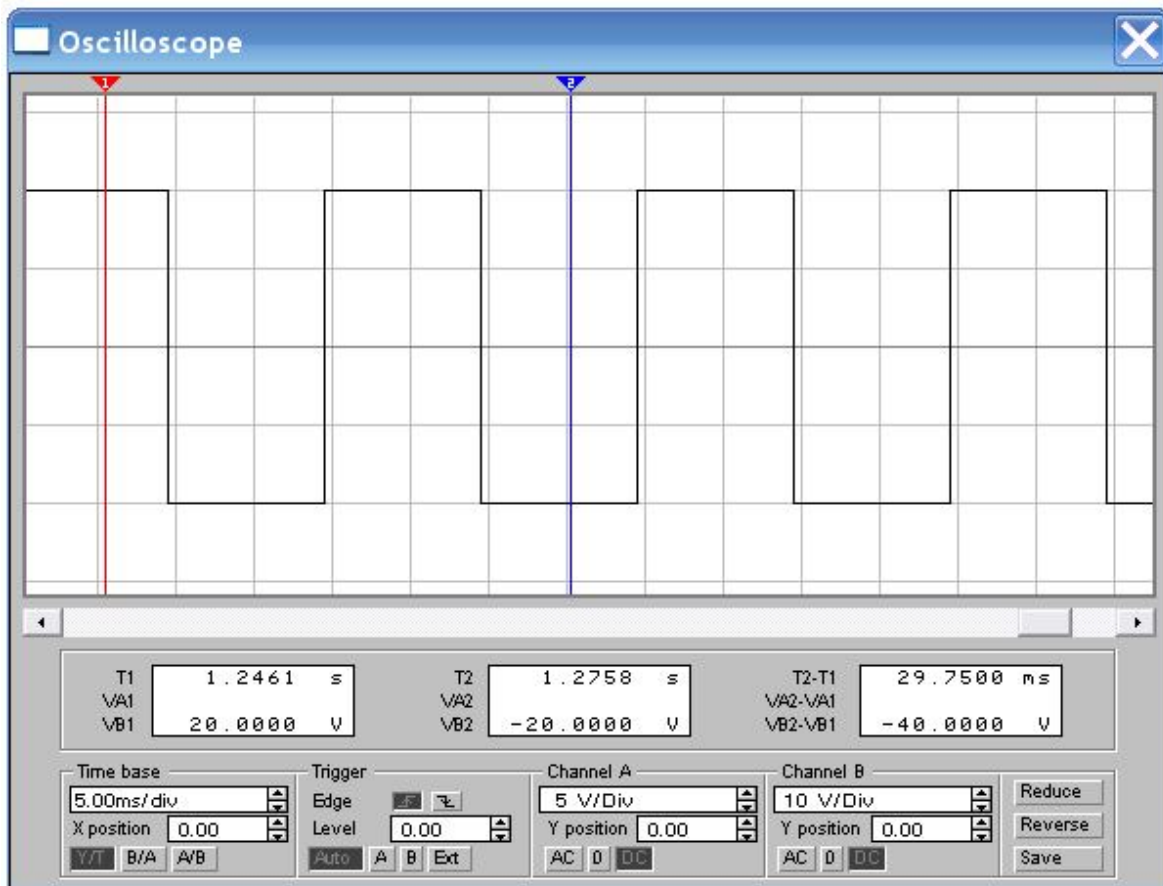


Рис. 2. Осцилограми змінних струмів: синусоїдного ідеального генератора та трикутної гармоніки функціонального генератора.



*Рис. 3. Осцилограма змінного струму функціонального генератора П-подібної форми.*

### Контрольні запитання

1. Який зміст та послідовність виконання роботи?
2. Який струм називається змінним?
3. За яким законом змінюються електричні параметри (сила струму і напруга) в колах змінного струму?
4. Що таке фаза коливань?
5. Що називають початковою фазою?
6. Дати визначення понять миттєвого, амплітудного та діючого значення струму і напруги.
7. Як співвідносяться амплітудні значення синусоїдної, трикутної та П-подібної гармонік, якщо діючі значення струмів однакові?
8. Записати вирази для обчислення діючих значень напруг синусоїдної, трикутної та П-подібної гармонік.

9. Як визначити амплітудне значення напруги за допомогою віртуального електричного кола (рис. 1).
10. Як визначити діюче значення напруги за рис. 1.

**Дослідження параметрів електричного кола при паралельному з'єднанні двох або більше генераторів змінного струму.**

**Мета:** За допомогою програми EWB дослідити явище суперпозиції змінних струмів однакової частоти.

*Робоче завдання*

1. Скласти віртуальне електричне коло за схемою, зображеною на рис. 1 і задати значення параметрів змінних струмів обох віртуальних генераторів.
2. Порівняти співвідношення між амплітудними значеннями та фазами коливань струмів окремих генераторів з амплітудою і фазою коливань результуючого струму.
3. Розрахувати початкову фазу та амплітудне значення резонансного струму та порівняти ці параметри з показами віртуальних приладів.

*Програма підготовки*

1. Опрацювати теоретичні відомості за літературою:  
Основна: Л-1, с. 11-44; Л-2, с. 7-24.  
Додаткова: Л-8, с. 212-218.
2. Виконати письмово такі завдання:
  - 2.1. Розрахувати амплітудне значення сумарного струму, який виник у наслідок суперпозиції (додавання) двох інших струмів, створених окремими генераторами змінного струму. Для цього скористатися теоретичною частиною даної лабораторної роботи.
  - 2.2. Розрахувати початкову фазу коливань новоствореної гармоніки.
  - 2.3. Зарисувати робочі схеми до виконання роботи.
  - 2.4. Зарисувати таблицю для запису даних вимірювань.
3. Знати основні елементи побудови електричних схем в програмі EWB.

**Задача.** Два генератори змінного струму мають частоту обертання якоря

$n = 120 \frac{\text{об}}{\text{хв}}$ , початкові фази  $\varphi_1 = \frac{\pi}{2}; \varphi_2 = \frac{\pi}{3}$ . Діючі значення струмів відповідно дорівнюють  $-I_1 = 5A; I_2 = 10A$ . Обчислити амплітудне значення сумарного струму  $I_{3\max}$  та початкову фазу. Записати закон, за яким змінюється змінний струм сумарної гармоніки.

### Методичні рекомендації до виконання завдання

1. Визначити діючі значення струмів.

1.1. Скласти коло за схемою, зображеною на рис. 1. На схемі є два генератори змінного струму, 3 амперметри, резистори ( $R_1, R_2, R_3$ ), осцилограф та перемикач (Space).

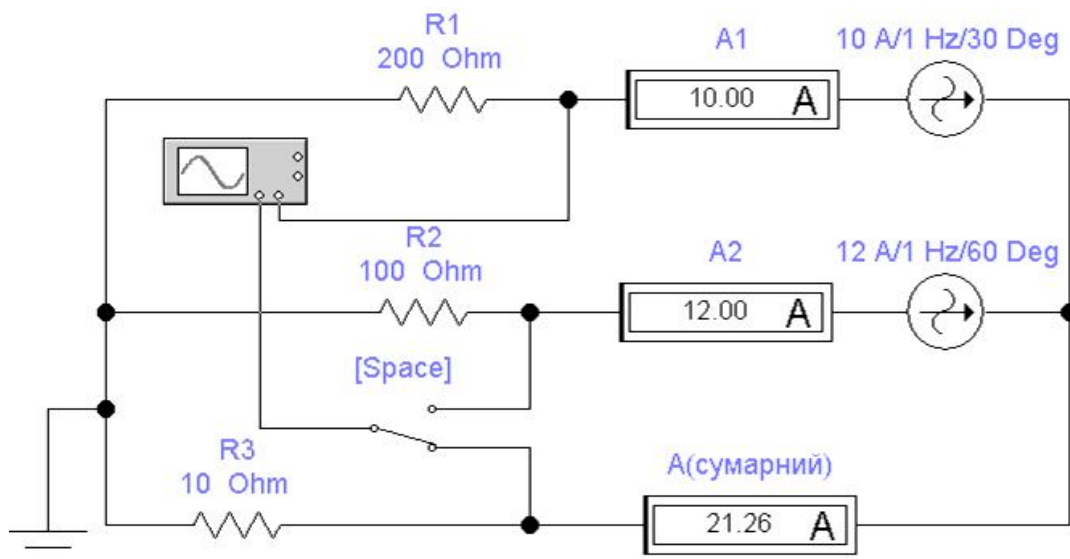


Рис. 1. Схема віртуального електричного кола для визначення амплітудного значення, а також фази сумарного струму.

1.2. За допомогою діалогового вікна задати параметри кола (табл. 1) і встановити режим роботи амперметрів – АС (змінний струм).

Таблиця 1.

| $f(\Gamma\text{ц})$ | $\varphi_1$ | $\varphi_2$ | $R_1(\text{Ом})$ | $R_2(\text{Ом})$ | $R_3(\text{Ом})$ | $I_1(\text{A})$ | $I_2(\text{A})$ |
|---------------------|-------------|-------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|-----------------|
| 1                   | 60          | -60         | 200              | 100              | 150              | 5               | 10              |

1.3. Увімкнути коло, амперметри покажуть значення струмів. Покази приладів записати до таблиці 2.

1.4. За заданими числовими значеннями параметрів двох генераторів ( $\varphi_1; \varphi_2; I_1; I_2$ ) обчислити амплітудне значення струму  $I_3$  та початкову фазу  $\varphi_3$  і

порівняти їх з показами приладів (табл. 2).

Таблиця 2.

| №<br>п/п | $I_1$<br>(A) | $I_2$<br>(A) | $I_3$<br>(A) | $I_{\max 1}$<br>(A) | $I_{\max 2}$<br>(A) | $I_{\max 3}$<br>(A) | $\varphi_3$ |
|----------|--------------|--------------|--------------|---------------------|---------------------|---------------------|-------------|
|          |              |              |              |                     |                     |                     |             |

2. Встановити перемикач (Space) в інше положення, при якому осцилограф увімкнений в контур двох зустрічно увімкнених генераторів. Таке положення перемикача увімкне осцилограф на віднімання струмів, створених генераторами. Виконати п. 1.1. – 1.4.

3. Визначити фазу коливань сумарної гармоніки за допомогою осцилографа.

3.1. Скласти електричне коло за попередньою схемою. За допомогою курсору встановити режим роботи осцилографа (Expand).

3.2. Поставити перемикач у праве положення для фіксації каналом В осцилографа сумарної фази коливань струму на резисторі  $R_3$ . На осцилографі з'явиться дві синусоїди – канал А фіксує осцилограму на резисторі  $R_1$ , а канал В – на резисторі  $R_3$ .

3.3. Поставити візирні лінійки в точки, які відповідають, наприклад, нульовим значенням струмів  $I_1$ ,  $I_3$ . Так як період коливань вказаний на горизонтальній координаті дорівнює 1 с. (частота 1Гц.), то ціна поділки дорівнює 0,1с. або  $360^{\circ}/10=36^{\circ}$ .

3.4. Визначити різницю фаз між коливаннями змінного струму  $I_1$  та  $I_3$ . Для цього можна скласти пропорцію, з якої й визначимо різницю фаз:

$$(T_1 - T_3) \Leftrightarrow (\varphi_1 - \varphi_3);$$

$$T_3 \Leftrightarrow 360^{\circ}.$$

З цієї пропорції визначимо різницю фаз та початкову фазу коливань сумарної гармоніки:

$$(\varphi_1 - \varphi_3) = \frac{(T_1 - T_3)}{T_3} 360^{\circ}$$

### Контрольні запитання

1. Пояснити зміст і послідовність виконання роботи.

2. Який струм називається змінним?
3. Що таке фаза коливань?
4. Що таке діюче значення струму (напруги)?
5. Яке співвідношення між діючим та амплітудним значеннями синусоїдного змінного струму (напруги)?
6. Пояснити поняття резонансу струмів.
7. Які фізичні величини впливають на величину зсуву фаз між струмом і напругою?
8. Як розрахувати сумарне значення сили струму (напруги) в мережі, яке живиться від двох генераторів, що з'єднані паралельно.
9. Які значення сили струму (напруги) можна виміряти за допомогою електричного осцилографа? Як це здійснюється?
10. Як виміряти зсув фаз між струмами (напругами) двох генераторів за допомогою осцилографа?

**Дослідження лінійного електричного кола постійного струму.**

**Мета:** Познайомитися з методами розрахунку електричних кіл постійного струму: накладання, контурних струмів та вузлових напруг.

*Робоче завдання*

1. Здійснити дослідження можливих режимів роботи джерел постійного струму при різних навантаженнях.
2. Перевірити справедливість методу накладання для розрахунку електричного кола постійного струму.
3. Побудувати потенціальну діаграму для замкнутого контуру електричного кола.

*Програма підготовки до виконання завдання*

1. Опрацювати теоретичний матеріал за літературою:  
Основна: Л-4, с.24-32; Л-7, с. 28-34.  
Додаткова: Л-6, с. 31-41; Л-8, с.206-212.
2. Виконати письмово такі завдання:
  - 2.1. Сформулювати закони Кірхгофа, записати їх математичний вираз та пояснити фізичну суть.
  - 2.2. Пояснити суть методів розрахунку електричного кола: накладання, вузлових напруг, колових струмів.
  - 2.3. На прикладі будь-якого електричного кола постійного струму показати, як будується потенціальна діаграма, пояснити її фізичну суть.

*Методичні рекомендації до виконання завдання*

1. Скласти віртуальне електричне коло за схемою (рис. 1). Амперметри увімкнути так, щоб зберегти їх полярність відносно джерел ЕРС, а також вибрати режим вимірювання постійного струму (DC). Величину ЕРС обох джерел вибрати довільно.



2. Увімкнути електричне коло загальним ключем. Ключі  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$  розімкнути. Почергово вмикати одночасно ключі  $K_1 - K_3$  та  $K_2 - K_3$ , амперметри  $A_1, A_2$  та  $A_3$  при цьому мають показати прямий струм (додатні числа). Напрямок струму вважати прямим, якщо він співпадає з напрямком електрорушійної сили джерел  $E_1$  та  $E_2$  у відповідних вітках. І, навпаки, якщо струм протікає у зворотному напрямку відносно джерела ЕРС у даній вітці, його називають зворотнім.

3. Дослідити режим розрядки джерела  $E_2$  (якщо значення його ЕРС менше від джерела  $E_1$ ). Для цього увімкнути всі три вимикачі. Змінюючи величину опорів реостатів, досягти умови, щоб прямий струм  $I_2$  переважав зворотній струм у цій вітці, створений джерелом  $E_1$  (амперметр  $A_2$  покаже додатне число).

4. Записати до *таблиці 1* покази всіх трьох амперметрів та опорів реостатів.

5. Для дослідження режиму холостого ходу джерела струму  $E_2$  увімкнути всі три вимикачі. Змінюючи величини опорів реостатів, встановити величину струму на амперметрі  $A_2$  рівною нулевій (прямий і зворотній струми однакові). Записати покази амперметрів та значення опорів реостатів до *таблиці 1*.

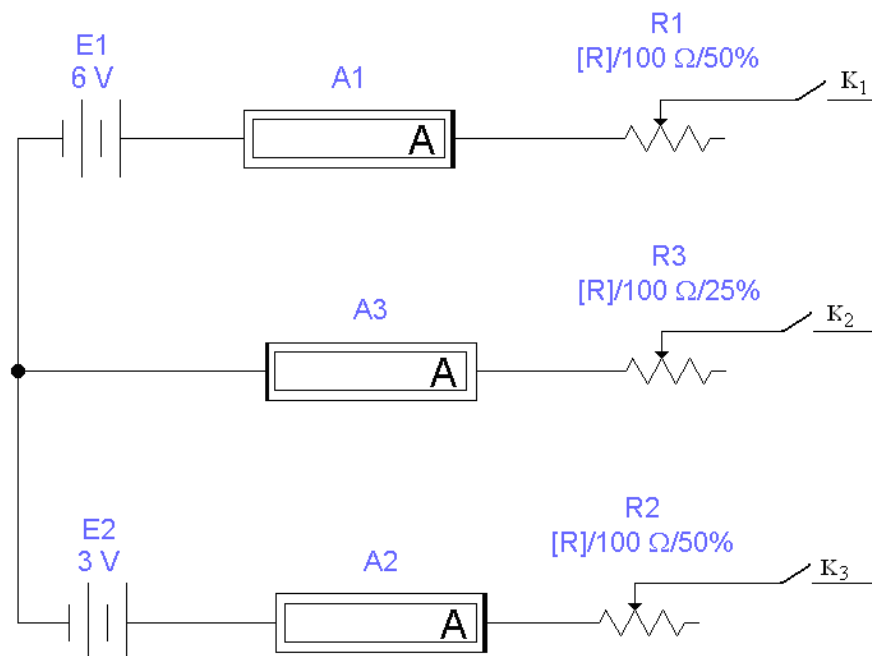


Рис. 1. Електрична схема до виконання роботи.

6. Для дослідження режиму зарядки джерела  $E_2$  повторити досліди пунктів 2-3 так, щоб струм  $I_2$  був зворотнім (амперметр  $A_2$  покаже від'ємне число). Записати покази приладів та значення опорів реостатів до *таблиці 1*.

Таблиця 1.

| Режим роботи джерела | Параметри |          |          |           |           |           |
|----------------------|-----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
|                      | $I_1(A)$  | $I_2(A)$ | $I_3(A)$ | $R_1(Ом)$ | $R_2(Ом)$ | $R_3(Ом)$ |
| Розрядка джерела     |           |          |          |           |           |           |
| Холостий хід         |           |          |          |           |           |           |
| Зарядка джерела      |           |          |          |           |           |           |

7. Побудувати потенціальну діаграму для контуру з джерелом  $E_1$ .

8. Перевірити практично метод накладання при розрахунках електричного кола постійного струму у такій послідовності:

а) від'єднати джерело  $EPC-E_2$ , а кінці провідників, що були приєднані до клем джерела, з'єднати між собою;

б) увімкнути вимикачі та виміряти амперметрами величини струмів  $I'_1, I'_2, I'_3$ , зумовлені джерелом  $E_1$ . Дані записати до таблиці 2. Амперметр  $A_1$  покаже прямиий струм  $I'_1$  у вітці з джерелом  $E_1$ , а амперметр  $A_2$  покаже зворотній струм  $I'_2$  для даної вітки;

в) не змінюючи опорів реостатів, вилучити з кола джерело  $E_1$ , замкнути звільнені кінці провідників, увімкнути джерело  $E_2$ . Значення струмів  $I''_1, I''_2, I''_3$  записати до таблиці 2;

г) не змінюючи опорів реостатів, увімкнути обидва джерела струму і покази амперметрів  $I_1, I_2, I_3$  записати до таблиці. Порівняти сумарне значення струмів  $I'_1, I'_2, I'_3$  та  $I''_1, I''_2, I''_3$  з показами амперметрів. Записати висновок.

Таблиця 2.

|                    | Значення струму у вітках |             |             |
|--------------------|--------------------------|-------------|-------------|
| Джерело $E_1$      | $I'_1$ (А)               | $I'_2$ (А)  | $I'_3$ (А)  |
|                    |                          |             |             |
| Джерело $E_2$      | $I''_1$ (А)              | $I''_2$ (А) | $I''_3$ (А) |
|                    |                          |             |             |
| Джерела $E_1, E_2$ | $I_1$ (А)                | $I_2$ (А)   | $I_3$ (А)   |
|                    |                          |             |             |

### Контрольні запитання

1. Який зміст та послідовність виконання роботи?
2. Який струм називають постійним?
3. Назвіть закони, методи за якими розраховують параметри електричних кіл постійного струму.
4. Пояснити фізичну суть I закону Кірхгофа.
5. Пояснити фізичну суть II закону Кірхгофа.
6. У чому полягає фізична суть методу колових струмів?
7. Пояснити фізичну суть методу вузлових напруг.
8. Пояснити фізичну суть методу накладання.
9. Чи може загальний спад напруги в замкнутому контурі, при побудові потенціальної діаграми, мати значення, що відрізняється від нуля?
10. Чи можна в електричному колі, що зображене на схемі до виконання лабораторної роботи, добитися значення струму  $I_3$ , рівного нулеві.

**Дослідження трифазного електричного кола змінного струму при з'єднанні споживачів зіркою та трикутником.**

**Мета:** Навчитися визначати основні параметри кола трифазного струму, а також засвоїти методи розрахунку і побудови векторних діаграм струмів і напруг при з'єднанні активних приймачів зіркою та трикутником.

*Робоче завдання*

1. Дослідити трифазне коло при симетричному вмиканні активних споживачів зіркою з нульовим проводом і при його обриві.
2. Дослідити трифазне коло при несиметричному вмиканні споживачів зіркою з нульовим проводом.
3. Дослідити симетричне коло трифазного струму при вмиканні активних споживачів трикутником.
4. Побудувати векторні діаграми струмів та напруг для активних споживачів при їх симетричному з'єднанні зіркою та трикутником.

*Програма підготовки до виконання завдання*

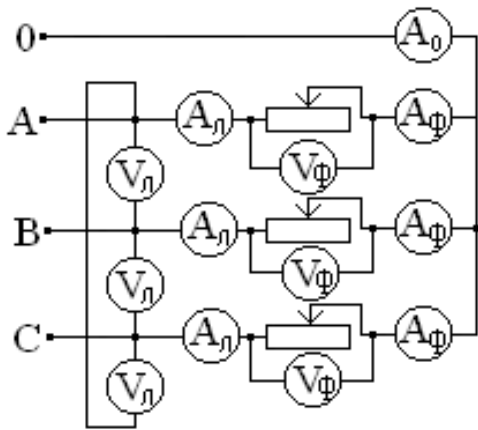
1. Опрацювати теоретичні відомості за літературою:  
Основна: Л-1, с.48-61; Л-3, с. 108-123.  
Додаткова: Л-4, с.70-86; Л-8, с.206-212.
2. Виконати письмово такі завдання:
  - 2.1. Сформулювати означення з'єднань споживачів зіркою та трикутником.
  - 2.2. Які співвідношення між фазними і лінійними напругами (струмами) при з'єднанні споживачів зіркою та трикутником. Намалювати електричні схеми таких з'єднань з позначенням всіх лінійних напруг і струмів.
  - 2.3. Виконати електричні схеми різних способів визначення потужності в трифазному колі при з'єднанні споживачів зіркою і трикутником.
  - 2.4. Перерахувати переваги та недоліки з'єднання споживачів зіркою і

трикутником.

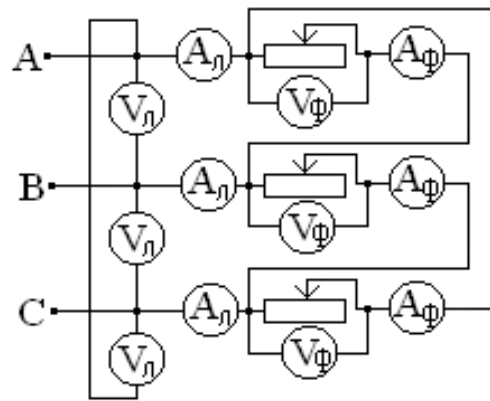
### *Методичні рекомендації до виконання завдання*

1. Для дослідження параметрів трифазного кола при з'єднанні споживачів зіркою з нульовим проводом та трикутником, можна використати схеми зображені на (рис.1) і (рис.2). Використовуючи ПК, змоделювати ці схеми на комп'ютері, використовуючи програму Electronics Workbench.

У цій програмі відсутні трифазні генератори. Тому, при виконанні схем, в якості джерела трифазного струму використати три однофазних генератора змінного струму, з'єднавши їх зіркою з нульовим проводом. Встановити на них зсув фаз у  $120^\circ$  (зразок виконаних схем подано на рис.3 та рис.4)



*Рис. 1. З'єднання споживачів зіркою.*



*Рис. 2. З'єднання споживачів трикутником.*

2. При з'єднанні споживачів зіркою з нульовим проводом виміри здійснити при симетричному і несиметричному навантаженнях, які встановлюються за допомогою величин опорів резисторів  $R$ . Такі ж досліди повторити при обриві лінійного та нульового проводів.

3. Для всіх випадків вимірювань записати величини лінійних напруг  $U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}$ ; фазних напруг  $U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}$ ; лінійних  $I_A, I_B, I_C$  та фазних  $I_a, I_b, I_c$  струмів.

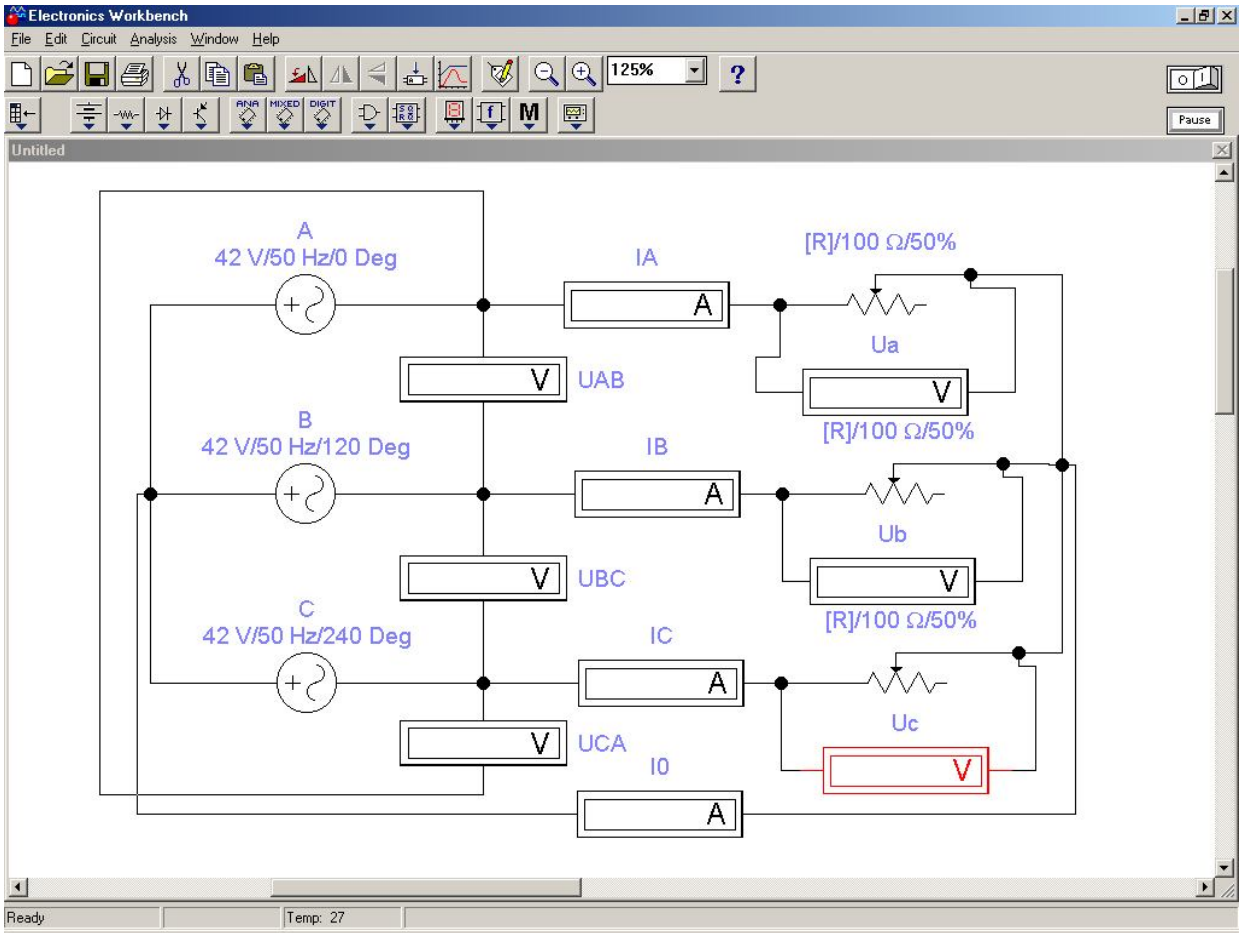


Рис. 3. Зразок з'єднання споживачів зіркою.

4. При з'єднанні споживачів трикутником, виміри виконати для випадків з симетричним навантаженням та при обриві лінійного проводу.
5. Вирахувати для всіх випадків співвідношення між лінійними та фазними струмами і напругами, величину активного опору в кожній фазі.
6. Порівняти споживану потужність одними і тими ж резисторами при симетричному з'єднанні їх зіркою і трикутником. Дані занести до таблиці 1.

Таблиця 1.

|       | З'єднання зіркою        |            |                   |                           |            |                   | З'єднання трикутником   |            |                   |
|-------|-------------------------|------------|-------------------|---------------------------|------------|-------------------|-------------------------|------------|-------------------|
|       | Симетричне навантаження |            |                   | Несиметричне навантаження |            |                   | Симетричне навантаження |            |                   |
|       | Усе ввімкнено           | Обрив нуля | лінійного проводу | Усе ввімкнено             | Обрив нуля | лінійного проводу | Усе ввімкнено           | Обрив нуля | лінійного проводу |
| $I_A$ |                         |            |                   |                           |            |                   |                         |            |                   |

|                   |  |  |  |  |  |  |  |  |
|-------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|
| $I_B$             |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $I_C$             |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $I_a$             |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $I_b$             |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $I_c$             |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $I_0$             |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $U_{AB}$          |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $U_{BC}$          |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $U_{CA}$          |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $U_{ab}$          |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $U_{bc}$          |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $U_{ca}$          |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $R_A$             |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $R_B$             |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $R_C$             |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $P_{AB}$          |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $P_{BC}$          |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $P_{CA}$          |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $P_{\text{кола}}$ |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $I_A/I_a$         |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $I_B/I_b$         |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $I_C/I_c$         |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $U_{AB}/U_{ab}$   |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $U_{BC}/U_{bc}$   |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $U_{CA}/U_{ca}$   |  |  |  |  |  |  |  |  |

7. При побудові векторних діаграм струмів та напруг підібрати масштаб векторів так, щоб діаграма мала кращу наочність.

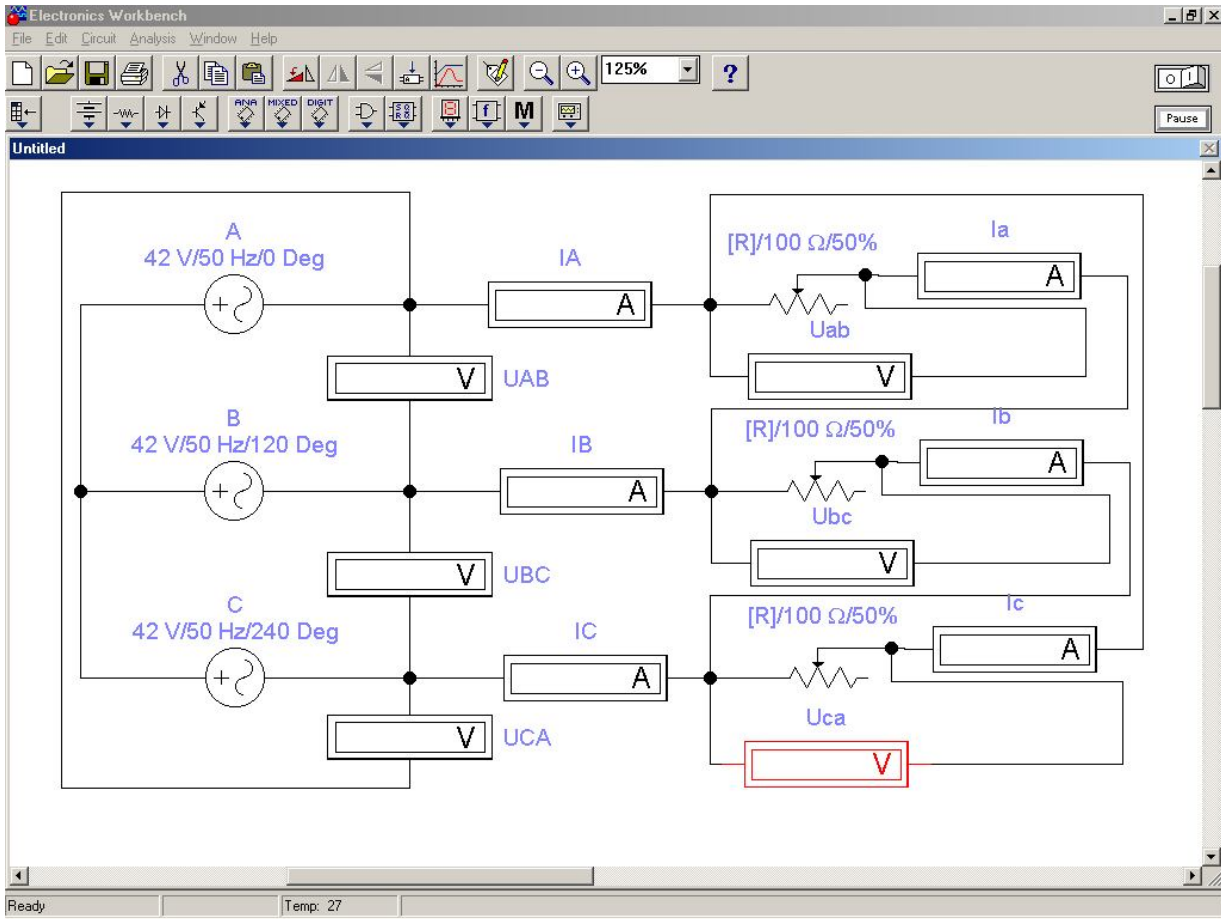


Рис. 4. Зразок з'єднання споживачів трикутником

### Контрольні запитання

1. Який зміст та послідовність виконання лабораторної роботи?
2. Що називають трифазною електричною системою?
3. Дати визначення поняття з'єднання споживачів зіркою і трикутником.
4. Яке співвідношення між фазним та лінійним струмом (напругою) при з'єднанні споживачів зіркою.
5. Яке співвідношення між фазним та лінійним струмом (напругою) при з'єднанні споживачів трикутником.
6. Чому дорівнює струм у нульовому проводі при симетричному навантаженні, при обриві лінійного проводу?
7. Чому дорівнює струм в нульовому проводі при обриві лінійного, якщо споживачі з'єднанні зіркою?
8. Яке співвідношення між споживаними потужностями одних і тих же споживачів при з'єднанні їх спочатку зіркою, а потім трикутником?
9. Як визначається активна потужність споживачів при з'єднанні їх в трифазній



системі зіркою та трикутником?

10. Як вимірюється активна потужність споживачів при з'єднанні їх в трифазній системі зіркою та трикутником?

### Дослідження напівпровідникових випрямлячів.

**Мета:** Навчитися досліджувати основні параметри кола напівпровідникового діода за допомогою програми *EWB* та засвоїти методи розрахунку і побудови вольт-амперних характеристик в програмі *Excel*.

#### *Робоче завдання*

За допомогою комп'ютерної програми EWB виконати такі завдання:

1. Дослідити форму графіків одно та двопівперіодного випрямлення змінного струму.
2. Дослідити вольт-амперну характеристику діода.
3. Побудувати графічно вольт-амперну характеристику діода в програмі Excel.

#### *Програма підготовки*

1. Опрацювати теоретичні відомості за літературою:

Основна: Л-1, с. 226-239; Л-3, с.237-261.

Додаткова: Л-2, с. 115-130; Л-8 с.206-212.

2. Виконати письмово такі завдання:

2.1. Записати основні властивості напівпровідників.

2.2. Пояснити фізичну суть утворення р-n переходу і його властивості.

2.3. Пояснити будову і принцип дії діода і транзистора.

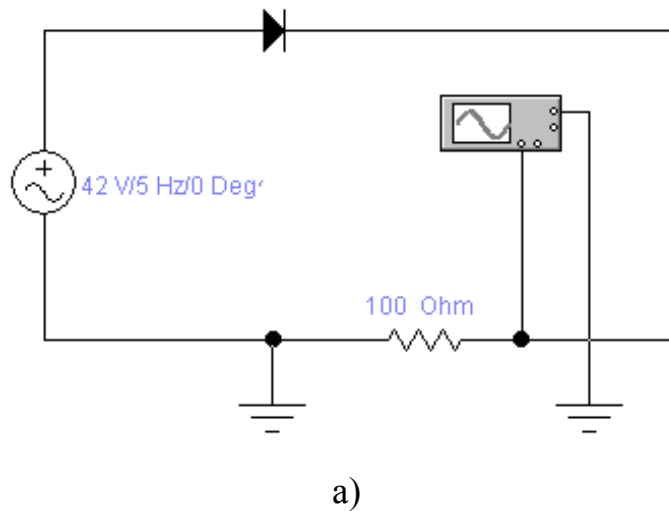
2.4. Пояснити зміст вольт-амперної та навантажувальної характеристики діода.

2.5. Зарисувати схеми одно- та двопівперіодного випрямлячів.

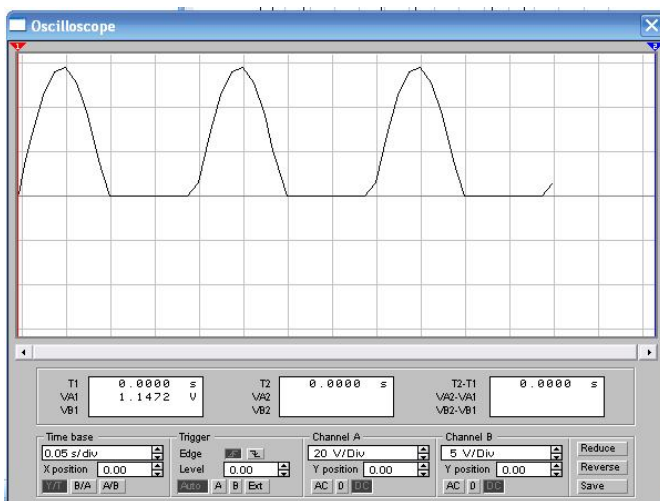
#### ***Методичні рекомендації до виконання завдання***

Завдання 1. Дослідити явище випрямлення змінного струму за допомогою напівпровідникових діодів з використанням осцилографа.

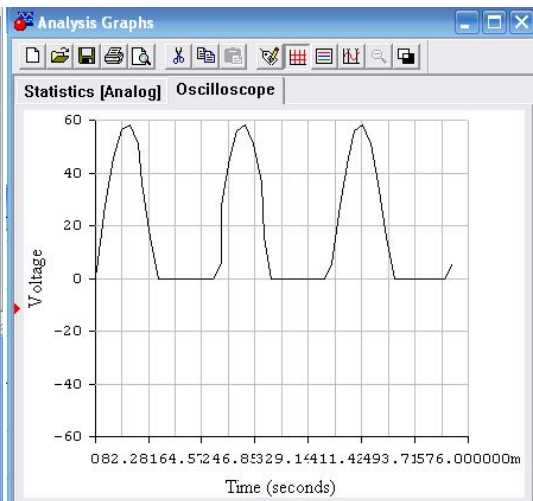
1. Скласти віртуальне електричне коло за схемою рис. 1 (а).
2. Увімкнути ключ, отримати осцилограму (б) і графік (в) та зарисувати його форму. Пояснити форму графіка.
3. Скласти віртуальне коло двопівперіодного випрямлення змінного струму за схемою середньої точки вторинної обмотки трансформатора, зображеною на рис. 2 (а). Увімкнути ключ, отримати осцилограму (б), зарисувати форму графіка (в) і пояснити його.
4. Скласти коло за містковою схемою рис. 3. За отриманою осцилограмою зарисувати графік випрямленої напруги (струму) і пояснити його.
5. Порівняти графіки одночасного двопівперіодного випрямлення напруги (струму) за схемами середньої точки трансформатора та діодного моста, що представлені на рис. 4.



а)



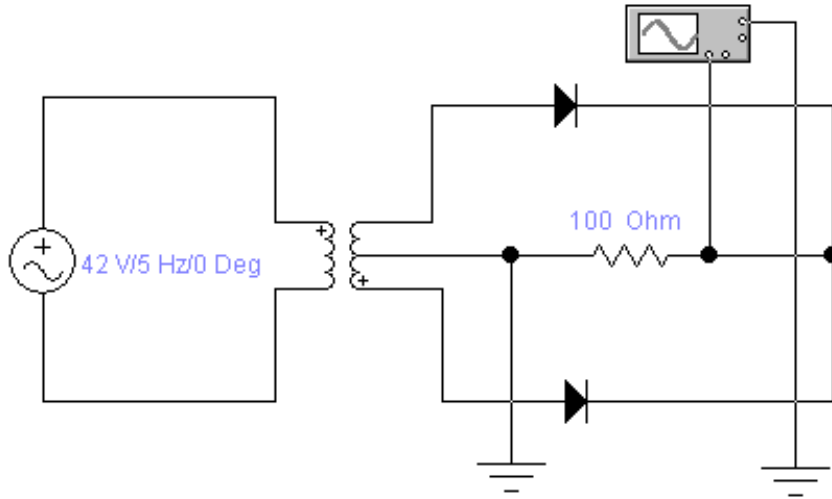
б)



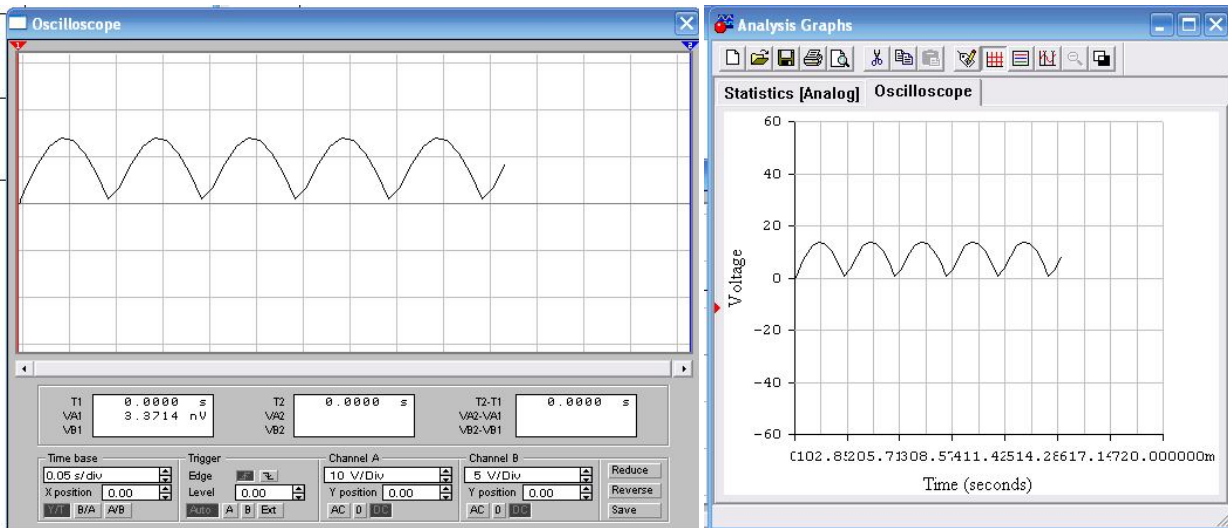
в)

Рис. 1. Схема віртуального електричного кола для дослідження однопівперіодного випрямлення напруги (струму) за допомогою напівпровідникового діода – а),

осцилограма – б), графік випрямленого струму – в).



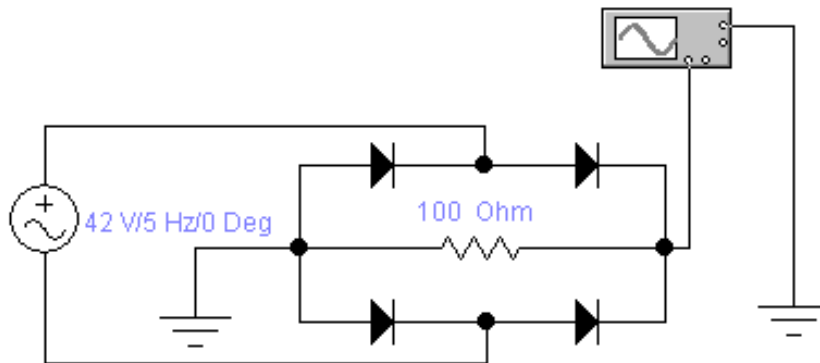
а)



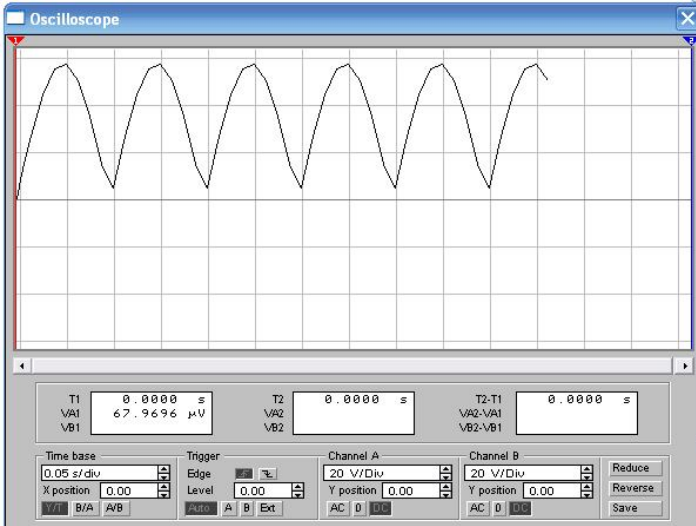
б)

в)

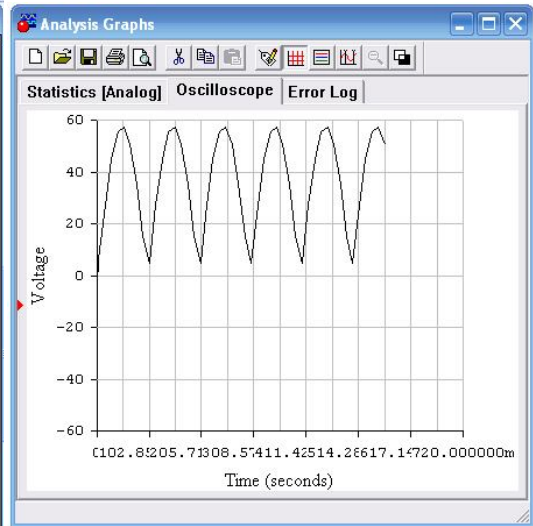
Рис. 2. Схема віртуального електричного кола для дослідження двопівперіодного випрямлення напруги (струму) за схемою середньої точки вторинної обмотки трансформатора – а), осцилограма – б), графік випрямленого струму – в).



а)

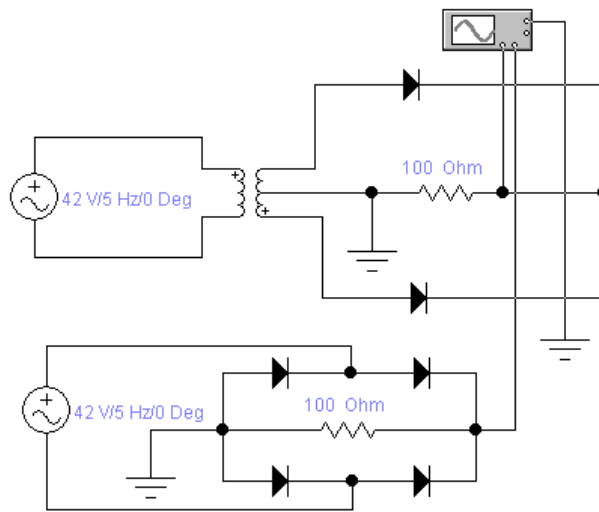


б)

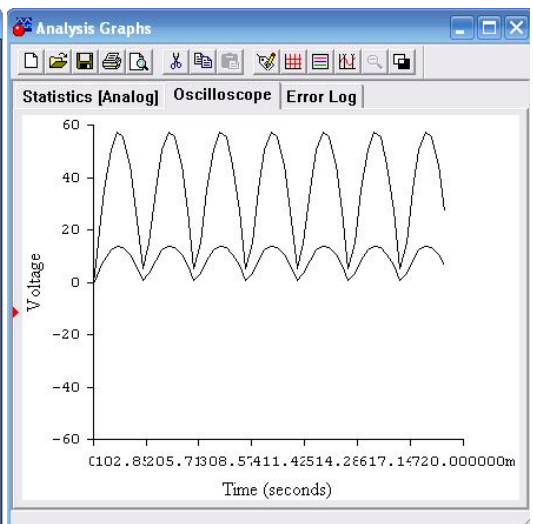
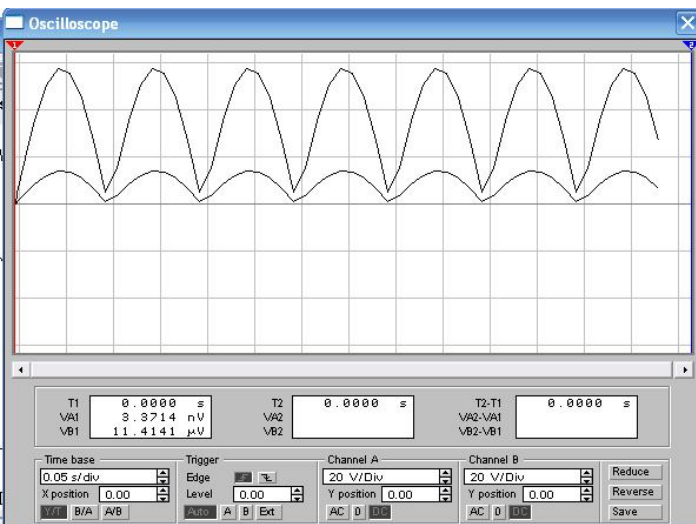


в)

Рис. 3. Схема віртуального електричного кола для дослідження двопівперіодного випрямлення напруги (струму) за схемою діодного моста – а), осцилограма – б), графік випрямленого струму – в).



а)



б)

в)

Рис. 4. Схема віртуального електричного кола для дослідження двопівперіодного випрямлення струму за схемою середньої точки вторинної обмотки трансформатора та діодного моста – а), осцилограми напруг (струмів) – б), графіки випрямлених напруг (струмів) – в).

### **Завдання 2. Дослідити вольт-амперну характеристику діода.**

1. Скласти віртуальне електричне коло за схемою зображеною на рис. 5.
2. Змінюючи значення прямої напруги  $U$  від 0 до 1В через кожних 0,5 В, фіксувати значення прямого струму  $I$ . Дані заносити до *таблиці 1*.
3. Змінюючи значення зворотної напруги від 0 до 3000В, записати до *таблиці 2* значення зворотного струму.

| U(B) | I(A) |
|------|------|
|      |      |

4. У програмі Excel побудувати графіки залежності прямого та зворотного струмів діода від значення прикладеної до нього напруги.

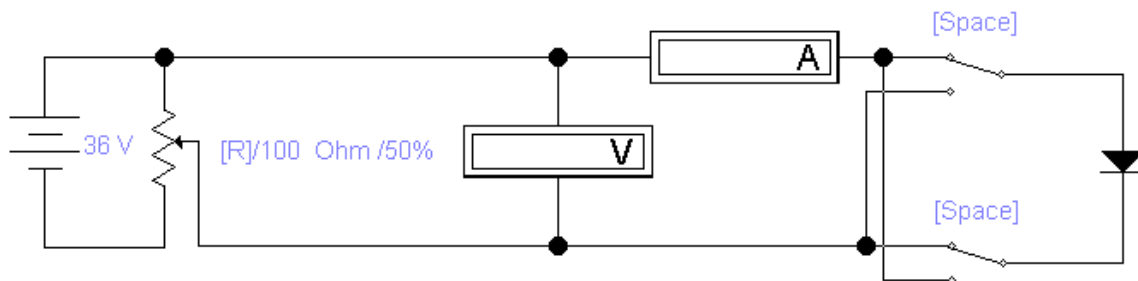


Рис. 5. Схема віртуального електричного кола для дослідження вольт-амперної характеристики діода.

### **Контрольні запитання**

1. Поясніть зміст і послідовність виконання роботи.
2. Чим відрізняються провідники від напівпровідників?
3. Які напівпровідникові сплави мають  $n$ -провідність?
4. Які напівпровідникові сплави мають  $p$ -провідність?

5. У чому полягає явище утворення *p-n*переходу?
6. Пояснити фізичний зміст вольт-амперної характеристики діода.
7. Пояснити принцип дії двопівперіодного випрямлення з середньою точкою трансформатора.
8. Пояснити принцип дії випрямляча, який працює за схемою Греца.
9. Пояснити принцип дії випрямляча, що працює за схемою середньої точки трансформатора.
10. Пояснити принцип дії випрямляча, що працює за схемою діодного моста у 3-фазному колі.

**Дослідження розгалуженого кола змінного струму.**

**Мета:** Визначити основні параметри електричного кола змінного струму з паралельним з'єднанням різних видів навантажень, здійснити їх обчислення і побудувати векторні та часові діаграми.

*Робоче завдання*

1. Визначити параметри електричного кола з паралельним вмиканням активно-індуктивного, активно-ємнісного та активно-індуктивно-ємнісного навантажень.
2. Для всіх випадків скласти електричні кола та виконати векторні і часові діаграми.

*Програма підготовки до виконання завдання*

1. Вивчити теоретичний матеріал за літературою:

Основна: Л-1, с.41-45; Л-3, с.96-104.

Додаткова: Л-2, с.29-35; Л-4, с.60-67.

2. Письмово дати відповіді на такі запитання:

2.1. Як визначити загальний струм в розгалужених колах змінного струму, якщо даються значення струмів в окремих вітках?

2.2. Пояснити фізичний зміст поняття «провідність». Визначити аналітично величини активної, реактивної та повної провідностей в розгалуженому електричному колі.

2.3. Пояснити фізичний зміст резонансу струмів, охарактеризувати співвідношення основних параметрів в такому режимі.

2.4. Накреслити часову та векторну діаграми розгалуженого кола в режимі резонансу струмів.

**Задача.** Котушка та конденсатор увімкнені паралельно до змінної напруги  $U$ . Визначити всі параметри електричного кола, якщо активний опір котушки в 5



разів, а індуктивність котушки в 100 разів менше величини напруги. Ємність конденсатора (в мкФ) прийняти у 20 разів меншою напруги, підведеної до кола. Активним опором конденсатора знехтувати. Побудувати векторну діаграму напруги та струму. Величину напруги взяти в таблиці.

Таблиця 1

|   | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| А | 190 | 180 | 170 | 160 | 150 | 140 | 130 | 120 | 110 | 100 |
| Б | 210 | 220 | 230 | 240 | 250 | 260 | 270 | 280 | 290 | 200 |
| В | 300 | 310 | 320 | 330 | 340 | 350 | 360 | 370 | 380 | 390 |

Особливості правил техніки безпеки

Обережно зменшувати ємність конденсатора, щоб не довести її до нуля.

**Методичні рекомендації до виконання завдання**

1. Скласти електричне коло за схемою, зображеною на рис. 1.
2. Дослідження виконати у такій послідовності: спочатку увімкнути резистор та котушку; потім резистор та конденсатор; і, насамкінець, резистор, котушку та конденсатор. Записати покази приладів. Останній дослід виконати для всіх можливих значень ємності конденсатора.

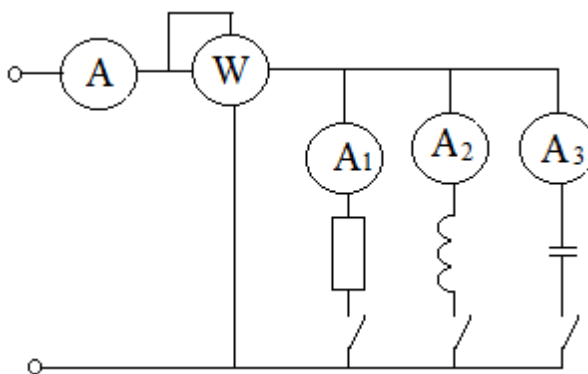


Рис. 1. Схема електричного кола

За даними вимірювань побудувати векторні діаграми, а також розрахувати: провідності активного опору, котушки, конденсатора, загальну провідність кола, а також повну і реактивні потужності, обчислити коефіцієнт потужності. Результати розрахунків записати до таблиці 2:

Таблиця 2.

| Увімкнено                           | U<br>(В) | I<br>(А) | I <sub>a</sub><br>(А) | I <sub>L</sub><br>(А) | I <sub>C</sub><br>(А) | P<br>(Вт) | Y<br>катуш-<br>ки | Yрезис-<br>тора | Yкон-<br>денс. | cosφ | Sкола<br>(ВА) | Q<br>кола<br>(ВАр) |
|-------------------------------------|----------|----------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------|-------------------|-----------------|----------------|------|---------------|--------------------|
| R <sub>L</sub> та X <sub>L</sub>    |          |          |                       |                       |                       |           |                   |                 |                |      |               |                    |
| R <sub>C</sub> та X <sub>C</sub>    |          |          |                       |                       |                       |           |                   |                 |                |      |               |                    |
| R, X <sub>L</sub> та X <sub>C</sub> |          |          |                       |                       |                       |           |                   |                 |                |      |               |                    |
| C=8                                 |          |          |                       |                       |                       |           |                   |                 |                |      |               |                    |
| C=16                                |          |          |                       |                       |                       |           |                   |                 |                |      |               |                    |
| C=32                                |          |          |                       |                       |                       |           |                   |                 |                |      |               |                    |

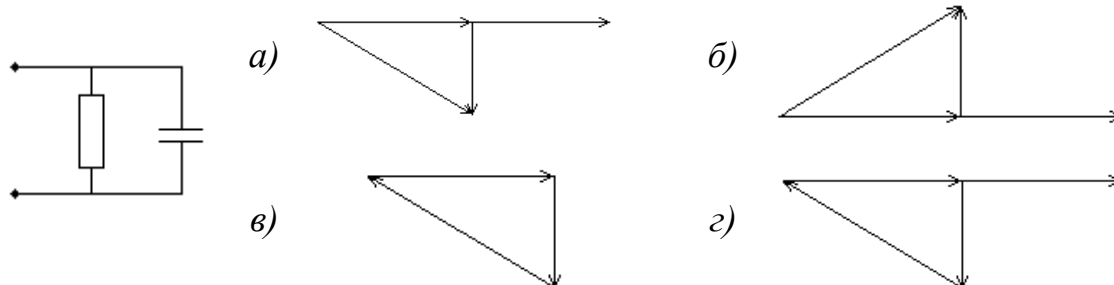
3. Визначити параметри котушки та конденсатора.

## Контрольні запитання

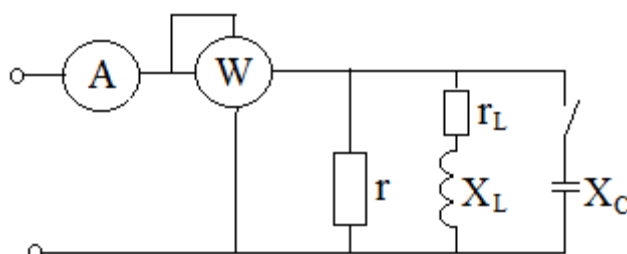
1. Чим відрізняється електричне коло розгалужене?
2. Як відрізняються вирази для додавання опорів у розгалужених та нерозгалужених колах?
3. При якому з'єднанні споживачі споживатимуть більшу потужність – паралельному чи послідовному?
4. Що називають резонансом струмів (напруг)?
5. Яке явище спостерігається при паралельному з'єднанні споживачів – резонанс струмів чи резонанс напруг?
6. Від чого залежить кут зсуву фаз між струмом та напругою в розгалужених колах змінного струму?
7. Яке співвідношення визначає коефіцієнт потужності для розгалуженого кола змінного струму?

а)  $\cos\varphi = \frac{X_L}{Z}$ ; б)  $\cos\varphi = \frac{r}{Z}$ ; в)  $\cos\varphi = \frac{X_C}{Z}$ ; г) всі відповіді правильні.

8. Яка з векторних діаграм відповідає даному розгалуженому колу:



9. Як зміняться покази ватметра і амперметра при замиканні ключа К?



- а) амперметра збільшаться, ватметра зменшаться;
- б) амперметра зменшаться, ватметра збільшаться;
- в) амперметра та ватметра збільшаться;
- г) амперметра та ватметра зменшаться.

10. Пояснити зміст та послідовність виконання лабораторної роботи.

**Дослідження трифазного трансформатора.**

**Мета:** Ознайомитись з принципом дії та основними характеристиками трифазного трансформатора.

*Робоче завдання*

1. Визначити кількість витків первинних та вторинних обмоток, коефіцієнти трансформації для різних способів з'єднання його обмоток, а також розподіл магнітних потоків в осерді.

*Програма підготовки до виконання завдання*

1. Вивчити теоретичний матеріал за літературою:

Основна: Л-1, с.127-129; Л-3, с.123-133.

Додаткова: Л-2, с.106-107; Л-4, с.147-154.

2. Виконати письмово такі завдання:

2.1. Пояснити призначення трифазних трансформаторів.

2.2. Записати закон Кірхгофа для магнітного кола на прикладі трифазного трансформатора.

2.3. Пояснити групи з'єднання котушок трифазного трансформатора за допомогою векторних діаграм.

2.4. Визначити втрати потужності трифазного трансформатора.

**Задача.** Визначити ККД трифазного трансформатора ТМ-100/10 при номінальному навантаженні та коефіцієнтах потужності  $\cos\varphi_1=1$  і  $\cos\varphi_2=0,8$ . Потужність холостого ходу трансформатора становить 760 Вт, потужність короткого замикання взяти  $P_{к.з.} = \frac{S}{2K}$ . Значення коефіцієнту трансформації дається таблиці 1.

*Таблиця 1*

|  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
|--|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
|  | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|--|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|

|   |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| А | 1,4 | 0,6 | 2,1 | 1,5 | 5,0 | 2,3 | 1,6 | 9,0 | 2,8 | 1,8 |
| Б | 2,0 | 0,7 | 4,0 | 0,9 | 6,0 | 1,3 | 8,0 | 1,8 | 1,7 | 0,4 |
| В | 0,3 | 3,1 | 0,5 | 1,6 | 2,2 | 3,5 | 0,6 | 3,7 | 2,4 | 1,9 |

Особливості правил техніки безпеки

Перемикає вольтметр для визначення первинної та вторинної напруги тільки при вимкненому трансформаторі.

**Методичні рекомендації до виконання завдання**

1. Для визначення кількості витків в обмотках трансформатора скористатися додатковою обмоткою. Намотати певну кількість витків (за вказівкою викладача) на вторинну обмотку трансформатора, подати напругу на первинну обмотку, виміряти напругу на первинній та додатковій обмотках. Результати дослідження записати до *таблиці 2*.

За виразом коефіцієнта трансформації  $k = \frac{n_2}{n_1} = \frac{U_2}{U_1}$  розрахувати кількість витків обмоток.

*Таблиця 2*

| №<br>п/п | $U_1$ | $U_2$ | $n_{\text{дод}}$ | $U_{\text{дод}}$ | $n_2$ | $n_1$ |
|----------|-------|-------|------------------|------------------|-------|-------|
|          |       |       |                  |                  |       |       |

2. Визначити магнітні потоки в кожному осерді і переконатись, що магнітний потік в стержні, на якому розташована первинна обмотка, дорівнює сумі магнітних потоків в осердях, на яких розташовані вторинні обмотки. Для цього зробити необхідні виміри параметрів і занести їх до *таблиці 3*.





*Таблиця 3*

| №<br>п/п | $U_A$ | $U_B$ | $U_C$ | $n_1$ | $\Phi_A$ | $\Phi_B$ | $\Phi_C$ |
|----------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|
|          |       |       |       |       |          |          |          |

3. З метою визначення коефіцієнтів трансформації для різних способів з'єднання «зірка-зірка», «зірка-трикутник», «трикутник-зірка» та «трикутник-трикутник», виміряти напруги на первинних та вторинних обмотках і розрахувати коефіцієнти трансформації для всіх випадків. Дані записати до *таблиці 4*. При

цьому первинну обмотку увімкнути до кола змінного струму через РНШ з напругою, що відповідає номінальній напрузі цієї обмотки.

Таблиця 4

| Вид з'єднання   | $U_{Л1}$<br>(В) | $U_{Ф1}$<br>(В) | $U_{Л2}$<br>(В) | $U_{Ф2}$<br>(В) | $k_{\phi}$ | $k_{л}$ | $\frac{k_{\phi}}{k_{л}}$ |
|---|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------|---------|--------------------------|
|  |                 |                 |                 |                 |            |         |                          |
|  |                 |                 |                 |                 |            |         |                          |
|  |                 |                 |                 |                 |            |         |                          |
|  |                 |                 |                 |                 |            |         |                          |

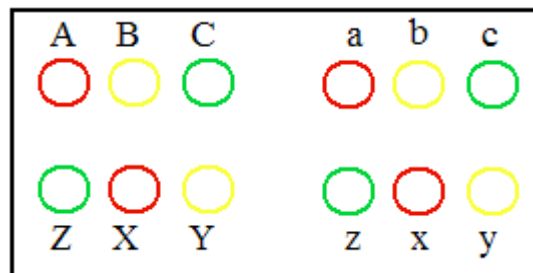
Для всіх випадків побудувати векторні діаграми е.р.с. При цьому масштаб первинної напруги прийняти більшим, ніж вторинної.

#### Додаткове завдання

Дослідити паралельну роботу трифазних трансформаторів. Виконати схему вмикання та перелік необхідних приладів.

### Контрольні питання

1. Який зміст та послідовність виконання роботи?
2. Скільки клем має трифазний трансформатор?
  - а) три; б) чотири; в) шість; г) дванадцять.
3. Чому на практиці спосіб з'єднання  $\Delta/\Delta$  майже не використовується?
4. Чому обмотка низької напруги трансформатора розташована ближче до осердя, а вищої напруги – далі?
  - а) так зручніше при монтажу електричної схеми обмоток;
  - б) при розміщенні низької напруги ближче до осердя треба менше ізоляції;
  - в) обмотка вищої напруги вимагає більш ретельного догляду;
  - г) всі відповіді вірні.
5. Як визначається група з'єднання трифазного трансформатора?
  - а) за допомогою лінійних напруг первинної та вторинної обмоток;
  - б) за допомогою векторів ЕРС первинної та вторинної обмоток;
  - в) за допомогою векторів лінійних ЕРС первинної та вторинної обмоток;
  - г) всі відповіді вірні.
6. На рисунку зображено клемний щиток 3-фазного трансформатора. Які клеми мають бути приєднані до мережі живлення?



- а) A,B,C,a,b,c; б) Z,X,Y,z,x,y; в) A,B,C,Z,X,Y; г) a,b,c,z,x,y.
7. Число витків кожної фази первинної обмотки 1000В, у кожній фазі вторинної обмотки 200. Лінійна напруга мережі живлення 1000В. Визначити напругу на виході трансформатора.
  - а) 200 В; б) 5000 В; в) 1000 В; г) для рішення недостатньо даних.
8. Розв'язати попередню задачу для з'єднання  $\Delta/\Delta$ .
  - а)  $\frac{200}{\sqrt{3}}$  В; б)  $\frac{1000}{\sqrt{3}}$  В; в)  $200 \cdot \sqrt{3}$ ; г) для рішення недостатньо даних.



9. Розв'язати попередню задачу для з'єднання  $\Delta/\lambda$ .

а)

$\frac{200}{\sqrt{3}}$  В; б)  $1000 \cdot \sqrt{3}$  В; в)  $200 \cdot \sqrt{3}$ ; г) для рішення недостатньо даних.

10. За яких умов електромережі обмотки з'єднують зіркою?

а) при високих напругах і малих струмах; б) при низьких напругах і низьких струмах;

в) при низьких напругах і високих струмах; г) при високих напругах і високих струмах.

**Дослідження роботи синхронного трифазного генератора на його моделі.**

**Мета:** Вивчити будову та принцип дії трифазного синхронного генератора та ознайомитись з її характеристиками: холостого ходу і зовнішніми.

*Робоче завдання*

1. Побудувати характеристику холостого ходу та зовнішню характеристику трифазного синхронного генератора на його моделі.

*Програма підготовки до виконання завдання*

1. Вивчити теоретичний матеріал за літературою:

Основна: Л-1, с.175-203; Л-3, с.162-179.

Додаткова: Л-2, с.166-179; Л-4, с.183-190.

2. Виконати письмово такі завдання:

2.1. Перерахувати основні частини трифазних синхронних генераторів, пояснити їх призначення та намалювати загальну електричну схему.

2.2. Коротко пояснити вплив активного, індуктивного та ємнісного навантажень на роботу синхронного генератора, його коефіцієнт потужності і напругу на клеммах.

2.3. Перерахувати умови вмикання синхронних генераторів на паралельну роботу та пояснити фізичний зміст цих умов.

2.4. Дати визначення характеристики холостого ходу, зовнішньої та регульовальної характеристик для трифазних синхронних генераторів.

**Задача.** Трифазний синхронний генератор, потужність якого  $S_{кВА}$ , число обертів ротора  $n$ , напруга становить 400В, частота 50Гц, ККД 85%. Визначити кількість пар полюсів, силу струму якоря та потужність первинного двигуна. Величину потужності генератора взяти з таблиці. Число обертів прийняти чисельно в десять разів меншою за величину потужності.

*Таблиця 1*

|   |     |     |      |     |     |     |     |     |     |      |
|---|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
|   | 1   | 2   | 3    | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10   |
| А | 3   | 0,6 | 2    | 0,2 | 4,1 | 2,5 | 4,0 | 5,0 | 3,0 | 0,4  |
| Б | 1   | 2   | 0,24 | 15  | 12  | 7,6 | 3,6 | 8,4 | 4,8 | 0,64 |
| В | 0,3 | 3,4 | 2,6  | 1,6 | 2,2 | 4,6 | 0,8 | 3,6 | 2,4 | 1,4  |

### Особливості правил техніки безпеки

Обертаючи ротор синхронної машини, необхідно бути обережним, щоб не викликати пошкодження моделі.

### **Методичні рекомендації до виконання завдання**

Для ознайомлення та вивчення будови синхронного генератора використати плакати та модель машин. Уважно розглянути основні частини, звернути увагу на будову ротора, кількість пар полюсів статора, колектора та інше. Записати номінальні паспортні дані моделі генератора.

Для проведення досліду холостого ходу зарисувати електричну схему установки, передбачивши джерело постійного струму для збудника, реостат для регулювання струму збудження, амперметр для вимірювання струму збудження, а також вольтметр для визначення напруги на клеммах моделі генератора. Рівномірно обертаючи ротор моделі, змінюючи величину струму збудження, записати покази амперметра та вольтметра для п'яти його значень. Дані занести до *таблиці 2*.

*Таблиця 2*

| №<br>п/п | $U_{зб}$ | $I_{зб}$ | $U_{ген}$ |
|----------|----------|----------|-----------|
|          |          |          |           |

Побудувати графік залежності  $U_{ген} = f(I_{зб})$ .

Щоб зняти зовнішню характеристику моделі генератора, повторити попереднє завдання, передбачивши вимірювання струму для різних видів навантаження: активного, індуктивного та ємнісного. Дані вимірювань занести до *таблиці 3*.

*Таблиця 3*

| № | $r_1$ | $r_2$ | $r_3$ | $r_4$ | $r_5$ | $X_{L1}$ | $X_{L2}$ | $X_{L3}$ | $X_{L4}$ | $X_{L5}$ | $X_{C1}$ | $X_{C2}$ | $X_{C3}$ | $X_{C4}$ | $X_{C5}$ |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|   |       |       |       |       |       |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |

|           |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|-----------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| п/п       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $U_{зб}$  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $I_{зб}$  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $I_{нав}$ |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $U_{ген}$ |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

Побудувати зовнішню характеристику генератора.

#### Додаткове завдання

Використавши другу модель генератора трифазного струму, виконати дослід для вмикання двох генераторів на паралельну роботу методом точної синхронізації.

### Контрольні питання

1. Пояснити принцип дії синхронних машин.
2. Який зміст та послідовність виконання завдання?
3. Чому дорівнює коефіцієнт ковзання синхронного генератора?

а) 1; б) 0; в) нескінченно великий.

4. Як практично регулюють частоту струму генератора?
  - а) величиною струму збудження;
  - б) швидкістю первинного двигуна;
  - в) швидкістю обертання магнітного поля статора-якоря;
  - г) відповіді дати неможливо.

5. Чи можна трифазну обмотку синхронного генератора великої потужності розташувати на роторі?

а) так; б) ні; в) можна але не доцільно.

6. Двохполюсний ротор обертається з частотою 3000 об/хв. Яка частота струму?

а) 50 Гц.; б) 500 Гц.; в) 300 Гц.

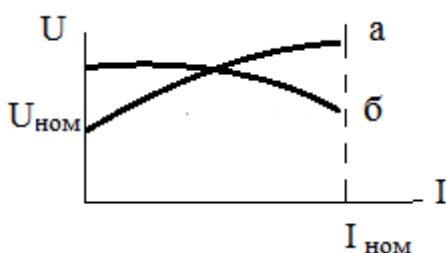
7. Для забезпечення синусоїдної форми ЕРС, що індукується, простір між ротор і статором синхронного генератора роблять:

- а) меншим в середині полюсного наконечника, більшим на краях;
- б) більшим на середині полюсного наконечника і меншим на краях;
- в) строго однаковим по всьому заокругленню.

8. За яких умов залежність  $U = f(I)$  буде зовнішньою характеристикою синхронного генератора?

а)  $\omega = const$ ; б)  $\cos\varphi = const$ ; в)  $I_{зб} = const$ .

9. Яким чином знімалися ці характеристики?



- а) а і б – при зниженні напруги;
- б) а – при підвищенні напруги, б – при зниженні напруги;
- в) а – при зниженні напруги, б – при підвищенні напруги;
- г) а і б – при підвищенні напруги.

10. Які генератори працюють на теплових гідроелектростанціях, а які на АЕС? Чим вони відрізняються?

## Лабораторна робота №24

**Тема:** Дослідження сонячних батарей.

**Мета:** Виміряти параметри сонячних батарей при послідовному і паралельному їх з'єднанні, побудувати характеристику залежності ЕРС від освітленості.

### Робоче завдання:

1. Вивчити будову дослідної установки і її роботу.
2. Виконати послідовне і паралельне з'єднання сонячних батарей та виміряти їх сумарну е.р.с.
3. Визначити потужність світлодіодної лампи.
4. Дослідити залежність е.р.с. сонячної батареї від освітленості її поверхні, за даними вимірювань побудувати графік такої залежності.

### *Програма підготовки до виконання завдання*

1. Опрацювати теоретичні відомості за літературою:
  - 1) Кучерук І.М., Горбачук І.Т. Загальний курс фізики: У 3 т.: Навч. пос. для студ. вищ. техн. і пед. навч. закл. освіти / За ред. І.М. Кучерука. – К.: Техніка, 1999. Т.3. Оптика. Квантова фізика. – 520 с.
  - 2) Москатов Е. А. Источники питания. — Киев.: "МК-Пресс", СПб.: "КОРОНА-ВЕК", 2011.—208 с, ил. [ISBN 978-5-7931-0846-1](#) ("КОРОНА-ВЕК") [ISBN 978-966-8806-71-1](#) ("МК-Пресс")
  - 3) Мачулін В., Литовченко В., Стріха М. Сонячна енергетика: порядок денний для світу й України // Вісник Національної академії наук України. Загальнонауковий та громадсько-політичний журнал. — 2011, №5.
  - 4) Ерохов В.Ю. Поверхнева функціональна мультитекстура для фотоелектричних перетворювачів сонячної енергії // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. Научный журнал. - Харьков: Технологический центр, 2009. - № 3/7 (39).
  - 5) <https://uk.wikipedia.org/wiki/>.

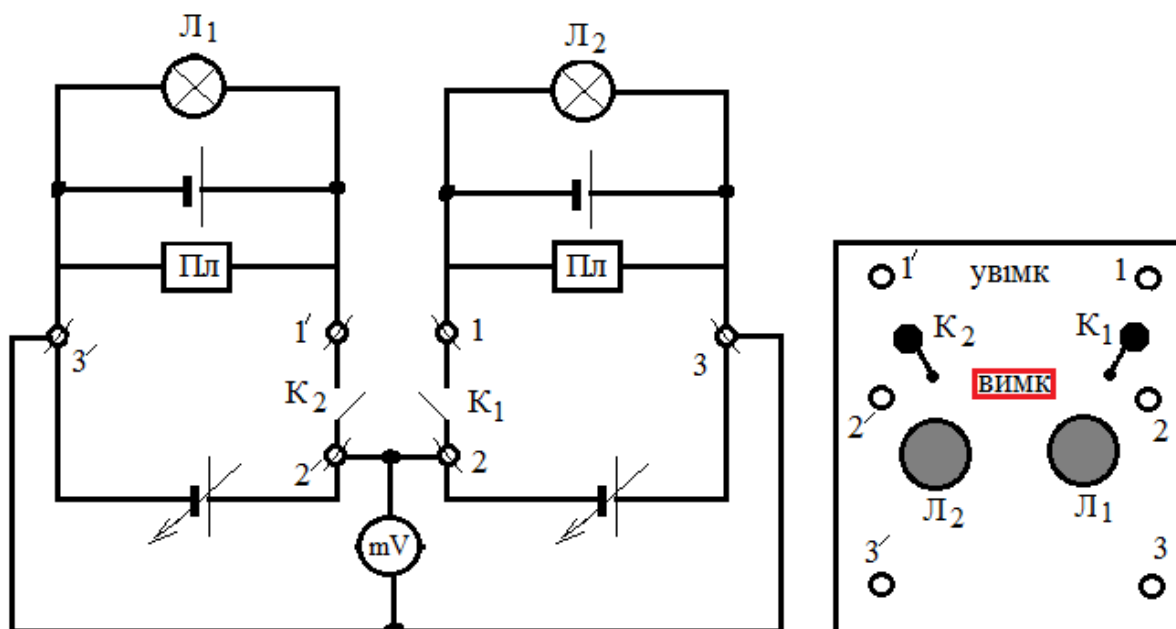
2. Виконати письмово такі завдання:

- 2.1. Дати визначення поняття фотоелектрична комірка та пояснити принцип її дії.
- 2.2. Перерахувати втрати в сонячному елементі.
- 2.3. Сонячні панелі та їх застосування.
- 2.4. Перерахувати матеріали з яких виготовляють сонячні панелі.
- 2.5. Який оптимальний температурний режим сонячних батарей?

### *Методичні рекомендації до виконання завдань*

1. Вивчення дослідної установки і спостереження її роботи.

- 1.1. Розглянути всі елементи установки і пояснити їх призначення. Відшукати ці елементи на електричній схемі.
- 1.2. Увімкнути тумблери  $K_1$  і  $K_2$ , накрити активні елементи сонячної батареї темним папером. Подивитись, що відбувається з світлодіодною лампочкою. Пояснити, яке явище при цьому відбувається.
- 1.3. Відкрити активні елементи батарей. Подивитись, що відбувається з світлодіодною лампочкою. Пояснити, яке явище при цьому відбувається.



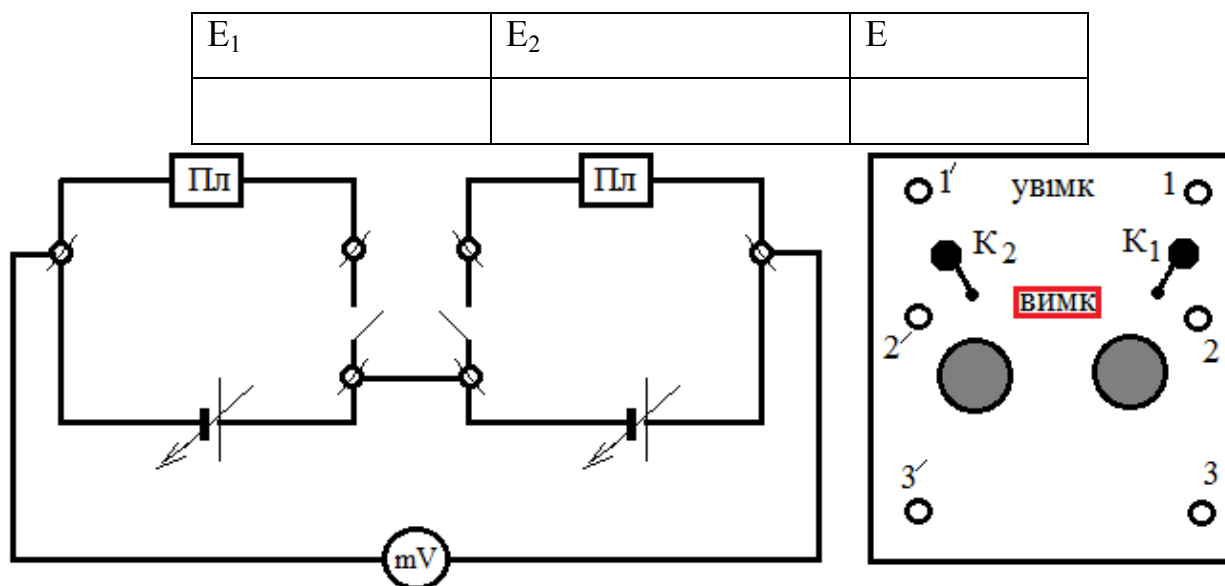
2. Послідовне з'єднання сонячних батарей.

- 2.1. Вимкнути тумблери  $K_1$  і  $K_2$ . Виміряти ЕРС на окремих сонячних батареях ( $E_1$  та  $E_2$ ). Для цього приєднати мілівольтметр по черзі до клем 3-2 та 3'-2', дані вимірювань занести до таблиці 1.



2.2. З'єднати перемичкою клеми 2-2' між собою. Приєднати до клем 3-3' мілівольтметр, виміряти сумарну ЕРС на , дані занести до таблиці 1.

Таблиця 1.

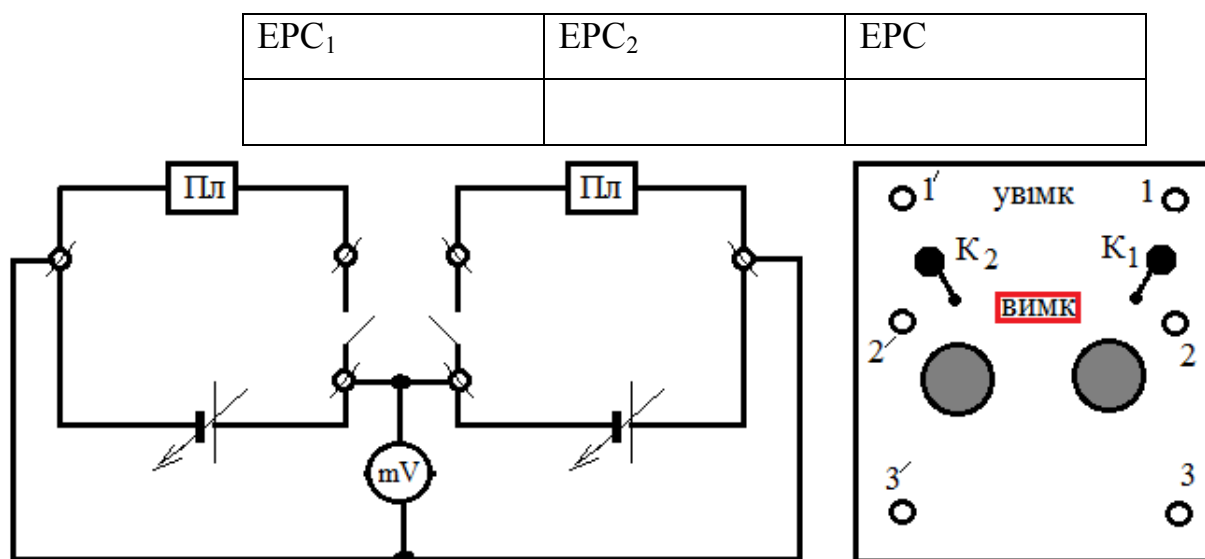


3. Паралельне з'єднання сонячних батарей.

3.1. Вимкнути тумблери  $K_1$   $K_2$ . Виміряти ЕРС на окремих сонячних батареях ( $E_1$  та  $E_2$ ). Для цього приєднати мілівольтметр по черзі до клем 3-2 та 3'-2', дані вимірювань занести до таблиці 2.

3.2. З'єднати перемичкою клеми 2-2' між собою. Приєднати до клем 2'-3' мілівольтметр, виміряти сумарну ЕРС ( $E$ ), дані занести до таблиці

Таблиця 2.



4. Визначення потужності світлодіодної лампи.

4.1. Зняти перемичку 2-2'. Вимкнути тумблер  $K_1$ . Міліамперметр приєднати до клем 1-2. Виміряти споживаний струм, дані вимірювань занести до таблиці 3.

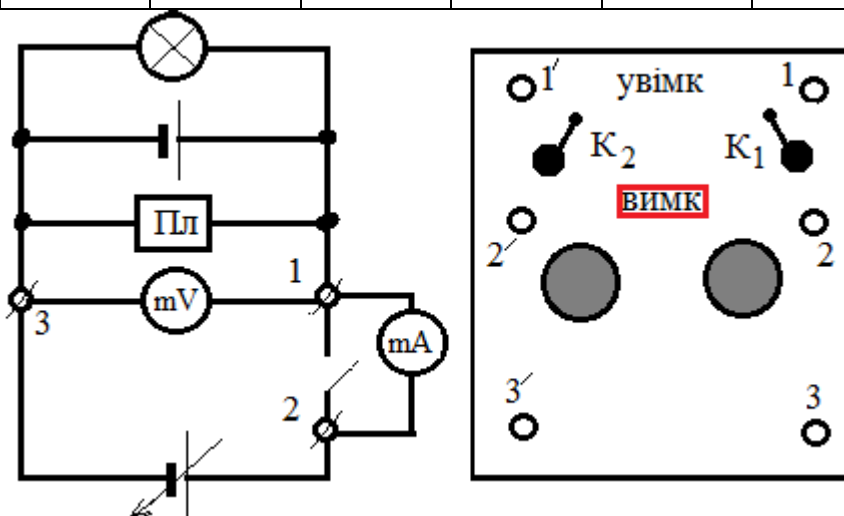
4.2. Виміряти спад напруги на лампі. Для цього приєднати мілівольтметр до клем 3-2 і його покази занести до таблиці 3.

4.3. Аналогічні виміри здійснити для іншої лампи. Значення  $U'$ (мВ),  $I'$ (мА) занести до таблиці 3.

4.4. Розрахувати споживану лампами потужність за виразом:  $P = I \cdot U$

Таблиця 3.

| U(мВ) | I(мА) | P(мВт) | U'(мВ) | I'(мА) | P'(мВт) |
|-------|-------|--------|--------|--------|---------|
|       |       |        |        |        |         |
|       |       |        |        |        |         |



5. Дослідження залежності ЕРС сонячної батареї від освітленості її поверхні (рис. 7).

5.1. Вимкнути тумблери  $K_1$  і  $K_2$ .

5.2. Під'єднати мілівольтметр до сонячної батареї (кlemi 3-2), за допомогою якого виміряти ЕРС ( $E_1$ ) при різних значеннях світлового потоку.

5.3. Освітленість поверхні активного елемента батареї виміряти за допомогою люксметра. Змінювати величину освітленості поверхні активного елемента за допомогою лампи-світильника. Дані вимірювань занести до таблиці 4.

5.4. Повторити аналогічні вимірювання й для іншої лампи. Значення освітлення  $\epsilon$  та відповідні величини ЕРС –  $E_2$  занести до таблиці 4.

5.5. Побудувати графіки залежностей  $E - f(\epsilon)$ .

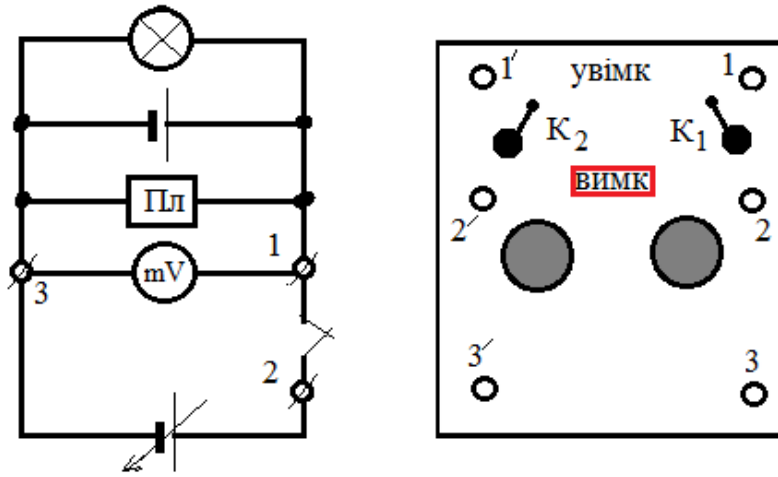


Рис. 7. Схема установки для дослідження залежності ЕРС сонячної батареї від освітленості її поверхні

Таблиця 4.

| № п\п | $\varepsilon$ (лк) | $E_1$ (В) | $\varepsilon$ (лк) | $E_2$ (мВ) |
|-------|--------------------|-----------|--------------------|------------|
|       |                    |           |                    |            |

Контрольні запитання

1. Що називають сонячною батареєю?
2. На яких законах базується принцип дії напівпровідникового світодіода.
3. В чому полягає дослід Столетова?
4. Які носії заряду у напівпровідникових матеріалах є основними, а які донорними?
5. Що таке запірний шар? Як він виникає?
6. Що називають фотоелектричною коміркою? Принцип її дії.
7. Що називають панеллю сонячної батареї?
8. Які матеріали використовують для виготовлення сонячних батарей?
9. Які втрати сонячної енергії відбуваються в сонячних батареях?
10. Від чого залежить величина е.р.с. сонячної батареї?

# СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

## ОСНОВНА ЛІТЕРАТУРА

Л-1. Вартабедян В. А. Загальна електротехніка. -К.: Вища школа. Головне видавництво, 1986.

Л-2. Евсюков А.А. Электротехника. -М.: Просвещение, 1986.

Л-3. Будіщев М.С. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка. – Львів: Афіша, 2001. – 424 с.

## ДОДАТКОВА ЛІТЕРАТУРА

Л-4. Борко П.М.. Електротехніка: лабораторний практикум. - К.: Вища школа, 1977.

Л-5. Герасимов В.Г.. Электротехника. -М.: Высшая школа, 1985.

Л-6. Гуржій А.М. Електротехніка з основами промислової електроніки: Підруч. для проф.-тех. навч. закладів/ А.М. Гуржій, А.М. Сільвестров, Н.І. Поворознюк. – К.: Форум, 2002. – 382 с.

Л-7. Иванов А.А. Электротехника, лабораторный практикум. - К.: Вища школа, 1982.

Л-8. Карлашук В.И. Электронная лаборатория на IBM PC. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. - 800 с.

Л-9. Касаткин А.С. Электротехника. -М.: Энергия, 1969.

Л-10. Общая электротехника. Программы педагогических институтов, под ред. Тхоржевского Д.А. 1980.

Л-11. Паначевний Б.І., Свергун Ю.Ф. Загальна електротехніка: теорія і практикум. - К.: Каравела, 2003. – 440 с.

Л-12. Пасечник Н.Д. Элементарная электротехника. - К.: Техника, 1964.

Л-13. Трегуб А.П. Электротехника. - К.: Вища школа, 1987.

Л-14. Бушок Г.Ф. Курс фізики. Фізичні основи / Г.Ф. Бушок, В.В. Левандовський, Г.Ф. Півень. – К.: Либідь, 2001. - 448 с.

Л-15. Атабеков В.Б. Монтаж электрических сетей и силового электрооборудования. -М.: Высшая школа, 1985.- 380с.