

**ДРОГОБИЦЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ПЕДАГОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ ІВАНА ФРАНКА  
Кафедра технологічної та професійної освіти**

**Юрій ПАВЛОВСЬКИЙ  
Мирослав ПАГУТА**

**Лабораторний практикум з електротехніки  
та електроніки**

**Навчально-методичний посібник**

**Дрогобич  
2022**

*Рекомендовано до друку вченою радою  
Дрогобицького державного педагогічного університету  
імені Івана Франка (протокол № 5 від 28.04.2022 р.)*

**Рецензенти:**

*Яким Р.С.* – доктор технічних наук, професор, професор кафедри технологічної та професійної освіти Дрогобицького державного педагогічного університету імені Івана Франка;

*Столярчук І.Д.* – доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедри фізики Дрогобицького державного педагогічного університету імені Івана Франка.

**Відповідальний за випуск:**

*Нищак І.Д.* – доктор педагогічних наук, професор, професор кафедри технологічної та професійної освіти Дрогобицького державного педагогічного університету імені Івана Франка.

**Павловський Ю.В., Пагута М.В.**

**П12** Лабораторний практикум з електротехніки та електроніки [навчально-методичний посібник]. Дрогобич: Редакційно-видавничий відділ Дрогобицького державного педагогічного університету імені Івана Франка, 2022. 123 с.

Навчально-методичний посібник містить інструкції до виконання лабораторних робіт з курсу «Електротехніка та електроніка» в кожній з яких вказана тема роботи, мета та завдання, необхідне обладнання, короткі теоретичні відомості, послідовність виконання роботи, електрична схема, форма звіту, перелік питань для самоконтролю та рекомендована література.

Посібник призначений для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються за спеціальностями 014 Середня освіта (Трудове навчання та технології) і 015 Професійна освіта (Транспорт).

Бібліографія – 25 назв.

© Павловський Ю.В., Пагута М.В., 2022  
© Дрогобицький державний  
педагогічний університет імені Івана Франка,

## ЗМІСТ

|                                                                                                                              |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| Організація лабораторних занять з електротехніки .....                                                                       | 4          |
| Вимоги техніки безпеки та охорони праці при виконанні<br>лабораторних робіт.....                                             | 5          |
| Форма звіту .....                                                                                                            | 7          |
| Основні елементи електричного кола та його параметри.....                                                                    | 8          |
| <b>Лабораторна робота № 1. Електричні вимірювання.</b>                                                                       |            |
| Електровимірювальні прилади, перевірка амперметрів і вольтметрів.....                                                        | 10         |
| <b>Лабораторна робота № 2. Вимірювання електричних опорів.....</b>                                                           | <b>18</b>  |
| <b>Лабораторна робота № 3. Передача електричної енергії<br/>двопровідною лінією.....</b>                                     | <b>25</b>  |
| <b>Лабораторна робота № 4. Дослідження фазометра.....</b>                                                                    | <b>30</b>  |
| <b>Лабораторна робота № 5. Послідовне з'єднання опорів у колі<br/>змінного струму. Резонанс напруг.....</b>                  | <b>34</b>  |
| <b>Лабораторна робота № 6. Паралельне з'єднання опорів у колі<br/>змінного струму. Резонанс струмів .....</b>                | <b>43</b>  |
| <b>Лабораторна робота № 7. Трифазне коло змінного струму при<br/>з'єднанні споживачів зіркою .....</b>                       | <b>51</b>  |
| <b>Лабораторна робота № 8. Трифазне коло змінного струму при<br/>з'єднанні споживачів трикутником .....</b>                  | <b>61</b>  |
| <b>Лабораторна робота № 9. Дослідження експлуатаційних<br/>характеристик однофазного трансформатора .....</b>                | <b>67</b>  |
| <b>Лабораторна робота № 10. Дослідження експлуатаційних<br/>характеристик трифазного трансформатора.....</b>                 | <b>76</b>  |
| <b>Лабораторна робота № 11. Дослідження роботи електричних<br/>фільтрів.....</b>                                             | <b>83</b>  |
| <b>Лабораторна робота № 12. Дослідження роботи напівпровідникових<br/>діодів.....</b>                                        | <b>90</b>  |
| <b>Лабораторна робота №13. Практичне використання напівпровідникових<br/>діодів. Схеми випрямлення та стабілізації .....</b> | <b>101</b> |
| <b>Лабораторна робота № 14. Дослідження роботи транзисторів .....</b>                                                        | <b>109</b> |
| Список використаних літературних джерел.....                                                                                 | 120        |
| ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК .....                                                                                                    | 122        |

## **ОРГАНІЗАЦІЯ ЛАБОРАТОРНИХ ЗАНЯТЬ З ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ**

Перед початком роботи в лабораторії електротехніки та електроніки для студентів проводиться вступний інструктаж із фіксуванням у спеціальному журналі реєстрації вступного інструктажу. До роботи допускаються лише ті студенти, які пройшли вступний інструктаж, про що свідчить наявність їхнього підпису в журналі.

Всі лабораторні роботи з електротехніки мають приблизно однакову структуру:

I етап – допуск до лабораторної роботи, під час якого викладач перевіряє готовність студентів до заняття: знання теоретичного матеріалу, розуміння завдань роботи, послідовності виконання, електричних схем, наявність підготовлених письмових заготовок.

II етап – складання електричної схеми, виконання лабораторної роботи та одержання експериментальних даних.

III етап – обробка результатів експериментальних досліджень та оформлення звітів.

IV етап – захист звіту з лабораторної роботи.

В окремих випадках, коли студент не встигає оформити звіт на поточному занятті внаслідок тривалих експериментальних досліджень та громіздких обчислень допускається здача звіту на наступному занятті в спеціально зазначений час.

Робочі місця в лабораторії електротехніки та електроніки оснащені спеціальною апаратурою, пристроями та матеріалами, необхідними для виконання лабораторних робіт.

Кожне робочому місці забезпечується інструкцією, в якій вказується тема роботи, мета та завдання, необхідне обладнання, короткі теоретичні відомості, послідовність виконання роботи, електрична схема, форма звіту, перелік питань для самоконтролю та рекомендовані літературні джерела.

## **ВИМОГИ ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ ТА ОХОРОНИ ПРАЦІ ПРИ ВИКОНАННІ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ**

### **Перед початком роботи необхідно**

1. Вивчити інструкцію лабораторної роботи.
2. Ознайомитися з електричною схемою, розміщенням приладів та обладнання.
3. Звернути особливу увагу на щиток, звідки подається та вимикається напруга.
4. Звернути увагу на справність клемних затискачів приладів, щитків подачі живлення, провідників.
5. Визначити в схемі місця можливого ураження електричним струмом.

### **При виконанні лабораторної роботи**

1. Підібрати прилади для лабораторної роботи.
2. Напругу до робочого стола може вмикати лише викладач після перевірки монтажною схемою. Про ввімкнення напруги до стола свідчить засвічування контрольної лампи на щитку живлення.
3. Після кожного виміру слід вимикати напругу, що подається до схеми, за допомогою червоної кнопки вимикача на щитку живлення.
4. Якщо покази виходять за шкалу приладу, схему слід від'єднати від електромережі за допомогою червоної кнопки вимикача на щитку живлення. Повторне ввімкнення схеми можливе тільки після усунення пошкодження і виконується з дозволу викладача.

### **Забороняється**

1. При ввімкненій напрузі проводити в схемі будь-які перемикання, виконувати роботи, які не передбаченні інструкцією лабораторної роботи.
2. Загромаджувати лабораторний стіл сторонніми предметами.
3. Вмикати вимірювальні прилади у схему шкалою від себе.
4. При ввімкненій напрузі тримати прилади в руках або на колінах, спиратися на них, торкатися затискачів, пересувати та розвертати прилади.
5. Перевищувати номінальні значення напруг і струмів.
6. Залишати без нагляду робоче місце, займатися іншими справами під час виконання роботи.

## **ПРИМІТКА**

**Невиконання вимог правил техніки безпеки та охорони праці, при проведенні лабораторних робіт, може призвести до ураження електричним струмом чи виходу з ладу приладів.**

### **При ураженні електричним струмом необхідно**

1. Негайно припинити подачу напруги на стіл або в лабораторію. Це здійснюється натисканням на червону кнопку вимикача на щитку живлення або на розподільному щитку з номером відповідного робочого стола, або вимиканням вимикача з правого боку розподільного щита, при цьому припиняється подача напруги на всі столи.

2. Надати потерпілому допомогу згідно інструкції з техніки безпеки та охорони праці [1].

### **Після виконання лабораторної роботи необхідно**

1. Вимкнути напругу на щитку живлення.
2. Повідомити викладача про закінчення дослідів.
3. Розібрати монтажну схему, покласти провідники, прилади та інструменти у відведені для них місця.
4. У разі виникнення пошкоджень повідомити про це викладача.
5. Навести порядок на робочому столі.
6. Виходити з лабораторії тільки з дозволу викладача.

## **ФОРМА ЗВІТУ**

### **НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ФІЗИКИ, МАТЕМАТИКИ, ЕКОНОМІКИ ТА ІННОВАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

**Кафедра технологічної та професійної освіти**

### **ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОНІКА**

### **ЗВІТ**

**з лабораторної роботи**

Група \_\_\_\_\_  
шифр групи

Виконав студент \_\_\_\_\_  
прізвище, ініціали

\_\_\_\_\_ дата

**Лабораторна робота № \_\_\_\_**

**Тема:** \_\_\_\_\_

**Мета та завдання:** \_\_\_\_\_

**Обладнання:** \_\_\_\_\_

### **Хід роботи**

1. Послідовність виконання завдань лабораторної роботи.
2. Електричні схеми лабораторної роботи.
3. Таблиці результатів досліджень.
4. Розрахунок досліджуваних параметрів.
5. Графіки та діаграми.
6. Висновки.

Підпис студента \_\_\_\_\_

## ОСНОВНІ ЕЛЕМЕНТИ ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА ТА ЙОГО ПАРАМЕТРИ

*Електричне коло* – це сукупність з'єднаних провідниками джерел та приймачів електромагнітної енергії. Електричне коло служить для передачі, розподілу та перетворення електромагнітної енергії. Джерела електричної енергії, її приймачі та з'єднувальні провідники є основними елементами кола, оскільки при відсутності хоча б одного з них зібрати електричне коло було б неможливо [2].

Графічне зображення кола називається *електричною схемою*. Вона показує, як здійснюється з'єднання елементів в електричному колі. Тобто, електрична схема, це спрощене зображення електричного кола. Для відображення електричних компонентів (конденсаторів, резисторів, мікросхем тощо) в електричних схемах використовуються їх умовно-графічні позначення [3].

Для відображення електричних з'єднань (доріжок, проводів, з'єднання між радіoeлементами) застосовують просту лінію, яка з'єднує два умовно графічні позначення. Причому, всі непотрібні вигини доріжок видаляють. До складу електричної схеми входять: вітка та умовно-графічні позначення електричних елементів, також можуть входити контур та вузол.

*Вітка* – ділянка кола яка складається з одного або декількох елементів, уздовж якого струм однаковий. Вітки, приєднані до однієї пари вузлів, називаються паралельними. Будь-який замкнутий шлях, що проходить кількома вітками називається *контуром*. *Вузол* – місце з'єднання трьох і більше віток [4].

В електричних схемах існують два основні види позначень – графічні та літерні.

Відповідно до стандартів «ДСТУ 3120-95 Електротехніка. Літерні позначення основних величин», «ДСТУ 2815-94 Електричні й магнітні кола та пристрої. Терміни та визначення», «ДСТУ 2843-94 Електротехніка. Основні поняття. Терміни та визначення» використовуються такі основані літерні позначення величин (табл. 1) [4-6].

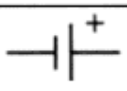
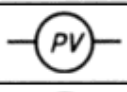
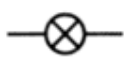
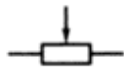
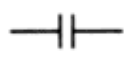
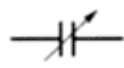
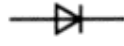
Таблиця 1

## Основні електротехнічні величини та їх літерні позначення

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- опір електричний активний <math>R</math>, Ом (ом);</li> <li>- опір електричний реактивний <math>X</math>, Ом;</li> <li>- опір електричний повний <math>Z</math>, Ом;</li> <li>- провідність електрична активна <math>G</math>, См (сименс);</li> <li>- провідність електрична реактивна <math>B</math>, См;</li> <li>- провідність електрична повна <math>Y</math>, См;</li> <li>- ємність <math>C</math>, Ф (фарад);</li> <li>- індуктивність <math>L</math>, Гн (генрі);</li> <li>- електрорушійна сила (ЕРС) <math>E</math>, В (вольт);</li> <li>- напруга <math>U</math>, В;</li> <li>- потенціал <math>\varphi</math>, В</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- струм <math>I</math>, А;</li> <li>- потужність активна <math>P</math>, Вт (ват);</li> <li>- потужність реактивна <math>Q</math>, ВАр (вольт-ампер реактивний);</li> <li>- потужність повна <math>S</math>, ВА (вольт-ампер);</li> <li>- магнітна індукція <math>B</math>, Тл (тесла);</li> <li>- напруженість магнітного поля <math>H</math>, А/м;</li> <li>- магнітний потік <math>\Phi</math>, Вб (вебер);</li> <li>- потокозчеплення <math>\Psi</math>, Вб;</li> <li>- промислова частота <math>f</math>, Гц (герц);</li> <li>- кутова частота <math>\omega</math>, рад/с</li> </ul> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Таблиця 2

## Умовні позначення на електричних схемах

| Елемент                            | Умовне позначення                                                                   | Елемент                         | Умовне позначення                                                                     |
|------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Лінія електричного зв'язку         |  | Транзистор                      |   |
| Контакти рознімного з'єднання штир |  | Фотоелемент                     |  |
| гніздо                             |  | Джерело живлення                |  |
| Вимикач                            |  | Вимірювальний прилад: амперметр |  |
| Запобіжник плавкий                 |  | вольтметр                       |  |
| Лампа розжарювання                 |  | Електричний дзвінок             |  |
| Резистор постійний                 |  | Гучномовець                     |  |
| змінний                            |  | Котушка індуктивності           |  |
| Конденсатор постійної ємності      |  | Трансформатор                   |  |
| змінної ємності                    |  | Електромагніт                   |  |
| Діод                               |  | Логічний елемент                |  |

# Лабораторна робота № 1

## ЕЛЕКТРИЧНІ ВИМІРЮВАННЯ. ЕЛЕКТРОВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИБАДИ, ПЕРЕВІРКА АМПЕРМЕТРІВ І ВОЛЬТМЕТРІВ

**Мета роботи:** освоїти методику електричних вимірювань та перевірку роботи амперметрів і вольтметрів. Навчитися визначати похибки та відповідність електровимірювальних приладів вимогам стандартів.

**Прилади та обладнання:** взірцеві електровимірювальні прилади та електровимірювальні прилади, які перевіряються, реостати.

### 1.1. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

**Електровимірюванням** називають процес порівняння електрофізичної величини з прийнятим за її одиницю значенням. Рівнянням вимірювання є співвідношення:

$$x = K \cdot H$$

де  $x$  – значення вимірюваної електрофізичної величини;

$K$  – безрозмірне число, яке визначають за допомогою електровимірювального приладу;

$H$  – відтворювана міра фізичної величини, яка відповідає значенню цієї величини, прийнятому за одиницю. Наприклад, рівняння вимірювання величини напруги має вигляд [7]:

$$U = 220 \text{ В.}$$

До засобів електровимірювання відносять:

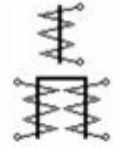
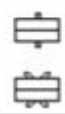
- **міри**, тобто еталонні технічні засоби для точного відтворення одиниць електрофізичних величин, – Ампер, Вольт, Ват, Ом тощо;

- **електровимірювальні прилади** – амперметри, вольтметри, ватметри, омметри тощо.

Електровимірювальні прилади класифікують за такими ознаками: за видом вимірюваної величини (амперметри, вольтметри, омметри тощо), за фізичним принципом дії вимірювального механізму приладу (магнітоелектричної, електромагнітної, електродинамічної), за родом вимірюваного струму (постійного, змінного, або того й іншого), за класом точності.

Основні характеристики електровимірювальних приладів приведено в табл. 1.1.

Умовні позначення систем приладів

| Система приладу                                                                                                                                | Умовне позначення                                                                   |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Магнітоелектрична:</b><br>- з рухомою рамою і механічною протидіючою силою;<br>- з рухомою рамою без механічної протидіючої сили (логометр) |  |
| <b>Електромагнітна:</b><br>- з механічною протидіючою силою;<br>- без механічної протидіючої сили (логометр)                                   |  |
| <b>Електродинамічна:</b><br>- з механічною протидіючою силою;<br>- без механічної протидіючої сили                                             |  |

Засоби електровимірювань поділяють на **робочі** та **еталонні**. Робочі засоби використовують для повсякденних вимірювань, а еталонні – для перевірки робочих приладів на відповідність їх ДСТУ (державним стандартам України).

Перевіркою приладів називають метрологічну операцію, якою порівнюють покази приладів, які перевіряються, з показами еталонних приладів.

Вимірювальні прилади можуть задовільно працювати лише при умові збереження точності своїх показів. Використання несправних приладів дає невірні результати вимірювань, що може призвести до неправильних наукових висновків, псування технологічного обладнання, аварій тощо.

Усі вимірювання електрофізичних величин, залежно від способу отримання результатів, прийнято поділяти на прямі та непрямі (опосередковані). У випадку прямого вимірювання значення електрофізичної величини отримують безпосередньо з виміру (вимірювання напруги вольтметром, струму амперметром тощо). При опосередкованому (непрямому) вимірюванні невідому електрофізичну величину вираховують на основі даних прямих вимірів інших величин, з якими вона зв'язана певною залежністю [8]

$$U = R \cdot I, P = R \cdot I^2.$$

Залежно від способу використання приладів та мір розрізняють два методи вимірювання: пряме перетворення та порівняння з мірою. У методі

прямого перетворення вимірювану величину визначають безпосереднім відліком показів електровимірювального приладу, які пропорційні вимірюваній величині (вимірювання напруги вольтметром, струму – амперметром, активної потужності – ватметром тощо).

Метод порівняння з мірою поділяють на *диференційний* та *нульовий* [8].

*Диференційний метод* – це метод порівняння, при якому створюють та оцінюють вимірюваний сигнал як різницю вимірюваних сигналів від досліджуваного об'єкта та міри. Це дозволяє значно підвищити точність виміру за умови, що точність застосованої міри є високою.

*Нульовий метод* – це метод порівняння, при якому порівнюють вимірювані сигнали від досліджуваного об'єкта та міри так, що різниця між ними стає рівною нулю. Нульовий метод є граничним випадком диференційного. Прикладом нульового методу є вимірювання опору за допомогою чотириплечового моста.

До перевірки приладів відносять також зовнішній огляд. Метою зовнішнього огляду приладу є визначення його загального стану та виявлення можливих видимих дефектів, які б могли завадити його ефективній експлуатації, незалежно від правильності показів даного приладу. До таких дефектів відносять:

а) наявність деталей, які роз'єдналися в середині приладу, що виявляється шляхом його обертання;

б) пошкодження окремих деталей (коректора, скла, затискачів), які безпосередньо роблять неможливою експлуатацію приладу та можуть призвести до швидкого його пошкодження;

в) відсутність надписів на приладі, які б вказували на його призначення або межі вимірювання, а також відсутність фабричного номера.

Похибки приладів поділяють на основну та додаткову.

**Основна похибка приладу** – це та, яку прилад має при нормальних умовах роботи.

**Додаткова похибка приладу** – зумовлена впливом на покази приладу різноманітних зовнішніх факторів.

Нормальними умовами роботи вважають ті, які передбачені відповідними стандартами, а саме: температура навколишнього середовища  $(20 \pm 3)^\circ\text{C}$ , відносна вологість повітря  $(65 \pm 10)\%$ , атмосферний тиск  $(101325 \pm 300)$  Па, частота живлення мережі 50 Гц.

Прилад повинен бути встановлений у робочому положенні, яке вказується умовним позначенням на шкалі. Якщо робоче положення не вказано, то переносні прилади перевіряють у горизонтальному положенні шкали, а щитові – у вертикальному.

Стрілка приладу повинна бути попередньо встановлена коректором на початкову відмітку шкали.

Обмотки приладів класу 1,0; 1,5; 2,5; 4,0, а щитових – усіх класів, повинні бути прогріті впродовж 15 хв струмом величиною, що відповідає верхній межі вимірювання приладу.

Поблизу приладу, який перевіряють, не повинно бути феромагнітних мас і на нього не повинні діяти зовнішні магнітні поля, окрім земного.

На практиці доволі часто трапляється, що результат виміру дещо відрізняється від дійсного значення вимірюваної величини. Ця розбіжність може бути зумовлена недосконалістю вимірювального механізму приладу, його властивостями, впливом зовнішніх факторів (зовнішні електричні та магнітні поля, зміна температури навколишнього середовища тощо), а також недосконалістю органів сприйняття людини чи іншими випадковими факторами.

**Абсолютною похибкою приладу** називають різницю між показами приладу, який перевіряють  $x_n$  і дійсним значенням вимірюваної величини  $x$

$$\Delta x = x_n - x.$$

Абсолютна похибка, взята з протилежним знаком, називається **поправкою А**:

$$A = -\Delta x = x - x_n.$$

Поправка  $A$  – це величина, яку необхідно додати до показів приладу, щоб одержати дійсне значення вимірюваної величини.

Для характеристики якості вимірювання приладу, який перевіряється, вводиться поняття відносної похибки приладу  $\delta$ .

**Відотною похибкою приладу** називається відношення абсолютної похибки приладу до дійсного (максимального) значення вимірюваної величини  $x$  у відсотках

$$\delta = \frac{\Delta x}{x} \cdot 100\%.$$

У більшості електровимірювальних приладів абсолютна похибка є практично незмінною при всіх можливих для даного приладу значеннях

вимірюваної величини. Тому із зменшенням вимірюваної величини відносна похибка швидко зростає. Щоб зменшити відносну похибку границі вимірювань приладу обирати так, щоб його покази перебували на останній третині шкали для обраного діапазону вимірювання [8].

Точність електровимірювальних приладів оцінюють зведеними похибками. Відношення максимального значення абсолютної похибки до верхньої межі вимірювання приладу  $x$  (номінального значення), виражене у відсотках, називають **зведеною похибкою  $\gamma$**

$$\gamma = \frac{\Delta x}{x_n} \cdot 100\%.$$

Зведену похибку при нормальних умовах роботи, яка залежить від самого приладу, **називають основною похибкою приладу**.

Залежно від величини зведеної похибки прилади поділяють на **8 класів точності**: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 1,5; 2,5; 4.

Цифра, що позначає клас точності, вказує на найбільше допустиме значення основної похибки приладу [8].

При виборі еталонного приладу за класом точності необхідно, щоб його зведена похибка була принаймні в 3 рази менша від зведеної похибки приладу, що перевіряється.

Варіація показів приладу визначається одночасно з визначенням основної похибки при плавному збільшенні, а потім – зменшенні вимірюваної величини. **Варіація** – це найбільша різниця показів еталонного приладу при одному і тому ж значенні вимірюваної величини. Вона визначається при плавному підведенні стрілки приладу, що перевіряється, до конкретної цифрової відмітки шкали один раз при русі від початкового  $x_{\text{поч}}$ , а другий раз від кінцевого  $x_{\text{кін}}$  значення відмітки шкали.

Абсолютне значення варіації:

$$\beta_{\text{абс}} = x_{\text{поч}} - x_{\text{кін}}.$$

Зведене значення варіації:

$$\beta = \frac{\beta_{\text{абс}}}{x_n} \cdot 100\%.$$

Варіація показу приладу наближено дорівнює подвоєній похибці від тертя, бо причиною відхилення стрілки в основному є тертя в опорах рухомої частини приладу.

## 1.2. ХІД РОБОТИ

1. Ознайомитися з приладами, які є на робочому столі. Провести зовнішній огляд приладів.
2. Підібрати необхідний еталонний прилад. Записати всі необхідні для роботи дані.
3. Розібрати електровимірювальний прилад (за **вказівкою викладача**), вивчити його будову та принцип роботи. Зібрати прилад.
4. Зібрати у вказаній керівником послідовності схему перевірки приладів (рис. 1.1, рис. 1.2) та після перевірки правильності всіх з'єднань подати до схеми напругу.

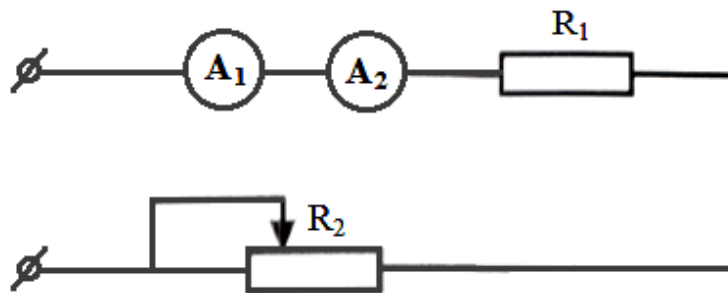


Рис. 1.1. Електрична схема для перевірки амперметрів

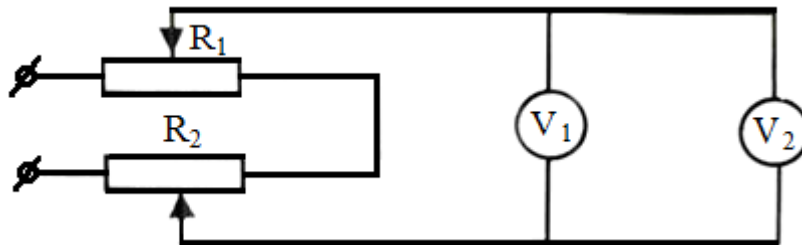


Рис. 1.2. Електрична схема для перевірки вольтметрів

5. Якщо схема не працює, знайти в ній пошкодження, усунути їх за допомогою електропаяльника, електромонтажного інструменту чи заміни окремих елементів.
6. Плавню змінюючи величину опору регулюючих реостатів, провести перевірку приладів за мітками шкал еталонного приладу та приладу, який перевіряється. Якщо стрілка пройшла потрібну відмітку, то її слід повернути назад і повторити вимірювання.
7. Записати в табл. 1.2 цифрові значення показів еталонного приладу та приладу, який перевіряється.
8. Обробити результати експериментів, провівши необхідні обчислення.

9. За результатами вимірювань і обчислень побудувати графіки поправок  $A = f(x)$  при русі стрілки «вперед» і «назад».

10. Проаналізувавши дані вимірювань, записати максимальне значення зведеної похибки приладу, який перевіряється. Зробити висновки про придатність даного приладу до експлуатації.

Таблиця 1.2.

Результати лабораторних вимірювань та обчислень

| №<br>п/п | Цифрові<br>відмітки<br>дослід-<br>жуваного<br>приладу | Покази<br>взірцевого<br>приладу x |              | Поправка<br>досліджував-<br>ного приладу<br>A |              | Абсо-<br>лютна<br>похиб-<br>ка<br>$\Delta$ | Віднос-<br>на<br>похиб-<br>ка<br>$\delta$ | Зведена<br>похибка<br>$\gamma$ | Варіація<br>показів |              |
|----------|-------------------------------------------------------|-----------------------------------|--------------|-----------------------------------------------|--------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------|---------------------|--------------|
|          | $x_n$                                                 | «впе-<br>ред»                     | «на-<br>зад» | «впе-<br>ред»                                 | «на-<br>зад» |                                            |                                           |                                | абсо-<br>лютна      | зве-<br>дена |
|          | A(B)                                                  | A(B)                              | A(B)         | A(B)                                          | A(B)         | %                                          | %                                         | %                              | A(B)                | %            |
| 1        |                                                       |                                   |              |                                               |              |                                            |                                           |                                |                     |              |
| 2        |                                                       |                                   |              |                                               |              |                                            |                                           |                                |                     |              |
| 3        |                                                       |                                   |              |                                               |              |                                            |                                           |                                |                     |              |
| 4        |                                                       |                                   |              |                                               |              |                                            |                                           |                                |                     |              |
| 5        |                                                       |                                   |              |                                               |              |                                            |                                           |                                |                     |              |
| 6        |                                                       |                                   |              |                                               |              |                                            |                                           |                                |                     |              |
| 7        |                                                       |                                   |              |                                               |              |                                            |                                           |                                |                     |              |
| 8        |                                                       |                                   |              |                                               |              |                                            |                                           |                                |                     |              |
|          |                                                       |                                   |              |                                               |              |                                            |                                           |                                |                     |              |
| 1        |                                                       |                                   |              |                                               |              |                                            |                                           |                                |                     |              |
| 2        |                                                       |                                   |              |                                               |              |                                            |                                           |                                |                     |              |
| 3        |                                                       |                                   |              |                                               |              |                                            |                                           |                                |                     |              |
| 4        |                                                       |                                   |              |                                               |              |                                            |                                           |                                |                     |              |
| 5        |                                                       |                                   |              |                                               |              |                                            |                                           |                                |                     |              |
| 6        |                                                       |                                   |              |                                               |              |                                            |                                           |                                |                     |              |
| 7        |                                                       |                                   |              |                                               |              |                                            |                                           |                                |                     |              |
| 8        |                                                       |                                   |              |                                               |              |                                            |                                           |                                |                     |              |
|          |                                                       |                                   |              |                                               |              |                                            |                                           |                                |                     |              |

### 1.3. ПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

1. Які ви знаєте електровимірювальні прилади?
2. Яким приладом вимірюють напругу?
3. Яким приладом вимірюють силу струму?
4. Які є прилади для вимірювання електричних опорів?

5. Яким приладом вимірюють електричну потужність?
6. Що таке фазометр?
7. Як вмикають амперметр в електричне коло?
8. Як вмикають вольтметр в електричне коло?
9. Що ми розуміємо під процесом електровимірювання?
10. Для чого використовують еталонні засоби електровимірювання?
11. Які є методи вимірювання електричних величин? В чому їх суть?
12. Що таке основна похибка приладу?
13. Що таке додаткова похибка приладу?
14. Що розуміють під абсолютною похибкою приладу?
15. Що таке поправка приладу?
16. Що називається відносною похибкою приладу?
17. для чого вводиться поняття відносної похибки приладу?
18. Що розуміють під зведеною похибкою приладу?
19. На скільки та на які класи поділяють прилади залежно від величини зведеної похибки?
20. Що таке варіація показу приладу?

#### **1.4. РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА**

1. Вартабедян В.А. Загальна електротехніка. К.: Вища школа, 1986. 359 с. С. 61-92.
2. Будіщев М.С. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка. Львів: «Афіша», 2001. 424 с. С. 145-169.
3. Матвійчук А.Я., Стінянський В.Л. Електротехніка: навчально-методичний посібник. Вінницький державний педагогічний університет ім. М. Коцюбинського. Вінниця, 2017. 270 с. С. 75-89.
4. Нестерчук Д.М., Квітка С.О., Галько С.В. Методи і засоби вимірювань електричних та неелектричних величин: навчальний посібник. Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2017. 206 с. С. 8-28.

## Лабораторна робота № 2

### ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ОПОРІВ

**Мета роботи:** вивчити схеми вимірювання опорів методами амперметра-вольтметра, мостовим методом та методом безпосереднього вимірювання, ознайомитися з роботою та будовою омметра, мегомметра.

**Прилади та обладнання:** демонстраційний гальванометр, вольтметри, амперметри, магазин резисторів, універсальний міст, омметр, мегомметр, ватметр, реостат, котушка індуктивності, конденсатор.

#### 2.1. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Як відомо, опір залежить від довжини, поперечного перерізу та матеріалу провідника

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

Але у колі змінного струму опір провідника буде більшим, ніж у колі постійного струму, внаслідок поверхневого ефекту (скін-ефекту) та ефекту близькості. Тому вважають, що провідник у колі постійного струму має омичний, а в колі змінного струму – активний опір. Відношення активного опору до омичного називають *коефіцієнтом поверхневого ефекту*, який залежить від діаметра провідника, його провідності, магнітної проникності та частоти струму [9].

Електричні опори вимірюють за допомогою приладів безпосередньої оцінки (омметрів, мегомметрів), методом порівнянь та непрямими методами. Метод безпосередньої оцінки найзручніший, але він дає результати найменшої точності. Цей метод використовується для наближеного вимірювання омичних опорів.

Суть методу безпосередньої оцінки полягає у вимірюванні струму, що протікає через невідомий опір від джерела зі сталою електрорушійною силою. Вимірювальний прилад, найчастіше магнітоелектричної системи, градуують безпосередньо в омах, кілоомах, тощо. Найпоширенішими приладами безпосередньої оцінки є омметри та мегомметри. Принципові схеми електромеханічних омметрів, для вимірювання великих та малих опорів (порівняно з внутрішнім опором приладу) зображені на рис. 2.1. Реостати у цих схемах служать для встановлення стрілки омметра на «0», чи на «∞», або для

компенсації та заміни внутрішнього опору гальванічних елементів. Іноді стрілка встановлюється на «0» або «∞» магнітним шунтом.

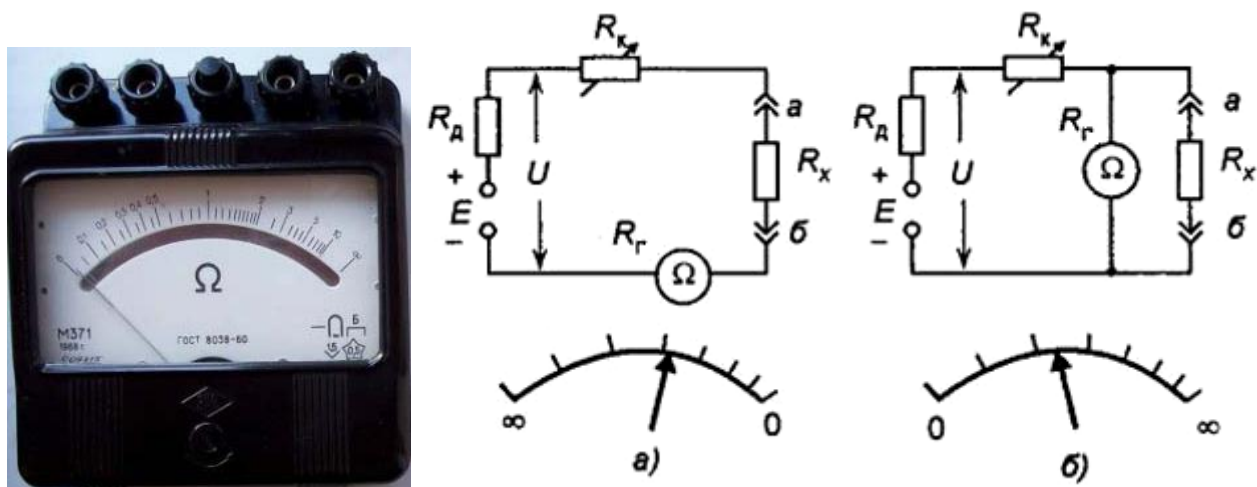


Рис. 2.1. Електромеханічний омметр та його схеми

Омметри з послідовним включенням  $R_x$  мають зворотну нерівномірну шкалу (нуль праворуч) і застосовуються для вимірювання середніх і великих опорів. А омметри з паралельним включенням  $R_x$  мають пряму нерівномірну шкалу (нуль ліворуч) і застосовуються для вимірювання малих опорів [8].

Струм, що проходить через гальванометр, можна визначити за формулою:

$$I = \frac{E}{R_x + R_r + R}, \quad I = \frac{E(R_x + R)}{RR_x + R_r R_x + R_r R}.$$

Шкала гальванометра суттєво нерівномірна, розтягнута на початку та стиснута в кінці. Опори, до десятків МОм, вимірюють спеціальними приладами, які називаються мегомметрами. Їх покази точніші, оскільки вони не залежать від величини ЕРС. Джерелом ЕРС служить, вмонтований у прилад, малопотужний магнітоелектричний генератор постійного струму з ручним приводом. Обертаючи ручкою якір генератора, можна отримати ЕРС від 100 до 2500 В. ЕРС генератора залежить від частоти обертання якоря, яка при ручному приводі не може бути сталою, внаслідок чого ЕРС може мінятися. Тому у вимірювальному механізмі мегомметрів використовують магнітоелектричний логометр. При зміні ЕРС генератора обертальні моменти, що створюються обмотками мегомметра, спрямовані у протилежні сторони, та змінюються зі зміною ЕРС однаково, отже значення ЕРС не впливає на положення рухомої частини приладу. Її положення залежить від співвідношення опорів кіл двох котушок приладу, тому шкалу такого приладу можна проградувати в

одиницях вимірювання опору – мегомах або кілоомах [8].

На сьогоднішній день поширеними є цифрові омметри (рис. 2.2). Вони мають високу точність вимірювання, просту шкалу відліку, широкі межі вимірювання, можливість накопичення вимірюваної інформації.

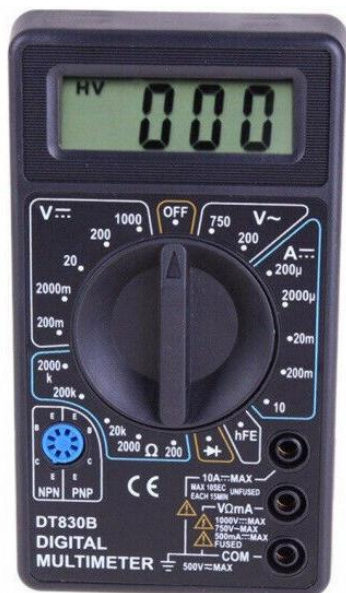


Рис. 2.2. Цифровий омметр

Основним недоліком цифрових омметрів є їх висока вартість, складність конструкції та непридатність до ремонту.

Серед непрямих методів вимірювання опорів найбільш поширеним та найпростішим є метод вольтамперметра (рис. 2.3), який базується на застосуванні закону Ома для ділянки кола.

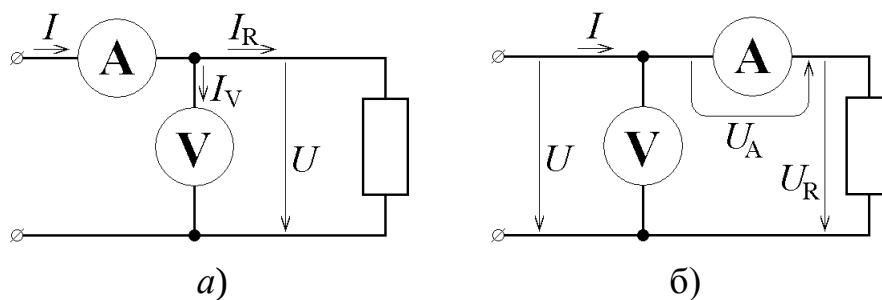


Рис. 2.3. Схема з'єднання для вимірювання малих опорів амперметром та вольтметром

У цьому методі необхідно одночасно виміряти спад напруги на резисторі та силу струму, яка протікає через нього. Тоді, застосувавши закон Ома, обчислити опір.

Можливі два способи реалізації методу вольтамперметра. У випадку рис. 2.3, а вольтметр є включеним паралельно до досліджуваного резистора, тому його покази відповідають спаду напруги на резисторі, а струм через амперметр є сумою струмів, які протікають через резистор і через вольтметр:  $I = I_R + I_V = IR + U/R_V$ , де  $R_V$  – опір вольтметра.

Тоді оцінку вимірюваного опору знаходять як відношення цих двох вимірюваних величин.

Дійсний опір

$$R_x = \frac{U}{I} = \frac{U}{I - I_V} = \frac{U}{I - \frac{U}{R_V}},$$

а отриманий опір

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

Отже, цей метод має відносну похибку

$$\gamma = \frac{R'_x}{R_V}.$$

Як бачимо, відносна похибка тим менша, чим меншим є вимірюваний опір порівняно з опором вольтметра. Тому, ця схема використовується для вимірювання малих опорів.

При використанні схеми рис. 2.3, б, послідовно з вимірюваним опором включають амперметр, отже струм через вимірюваний резистор рівний струму через амперметр. Спад напруги на вольтметрі, у цьому випадку, дорівнює сумі спадів напруги на досліджуваному резисторі та на амперметрі:

$$U = U_R + U_A = U_R + I \cdot R_A,$$

де  $R_A$  – опір амперметра.

Звідси

$$R_x = \frac{U}{I} = \frac{U - U_A}{I} = \frac{U}{I} - R_A.$$

Отже, чим менший опір амперметра, тим точніший вимір. Тому, ця схема використовується для вимірювання великих опорів.

Якщо в омметрі джерело постійної ЕРС замінити змінною ЕРС, а вимірювальний прилад постійного струму аналогічним приладом змінного струму, то омметр вимірюватиме повний опір.

Метод порівняння дає найбільш точні результати, але вимірювання цим методом вимагає більше часу і більшої кваліфікації. У більшості випадків опори вимірювальних резисторів порівнюють із відомими опорами, вмонтованими в мостах. Точність вимірювання мостовим методом залежить від чутливості гальванометра та точності магазину резисторів.

Омічний опір обчислюється як частка від ділення значень постійних напруги на струм. Повний –  $Z$ , активний –  $R$ , реактивний –  $X$  опори обчислюються за формулами:

$$Z = \frac{U}{I}, R = \frac{P}{I^2}, X_{L(C)} = \sqrt{Z^2 - R^2}.$$

За допомогою непрямого методу можна також визначити ємність конденсатора:

$$C = \frac{1}{X_C \omega} \text{ (Ф)}$$

та індуктивність котушки

$$L = \frac{X_L}{\omega} \text{ (Г)},$$

де  $\omega = 2\pi f$ ,  $\pi = 3,14$ .

## 2.2. ХІД РОБОТИ

1. Розглянути принцип роботи схеми рис. 2.4 та рис. 2.5.

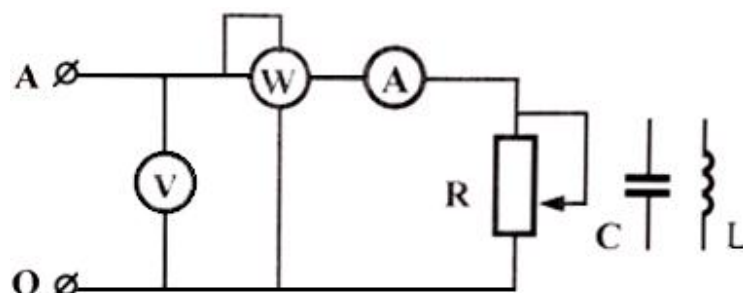


Рис. 2.4. Схема вимірювальної установки

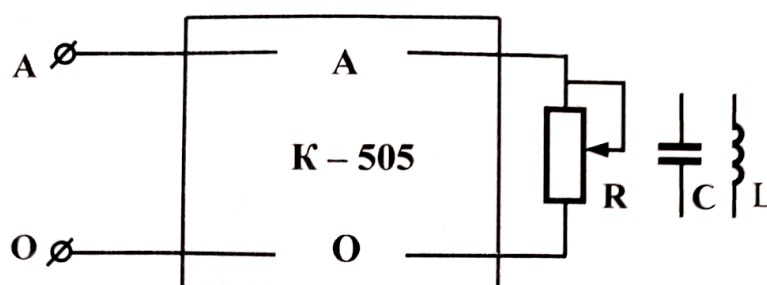


Рис. 2.5. Схема вимірювальної установки з використанням блоку К-505

2. Виміряти омметром опори котушки, конденсатора та реостата. Результати записати в таблицю 1 (графа  $R$ ). Дослід повторити для 5-ти значень невідомого опору ( $R, L, C$ ).

3. Вивчити будову та роботу мегомметра, виміряти ним опори кількох резисторів. Виміряти опір свого тіла (рука – рука).

4. За допомогою непрямого методу (рис. 1, рис. 2) виміряти споживану потужність, струм та спад напруги на 5-ти резисторах, котушках та конденсаторах. Результати записати в табл. 2.1. Обчислити вказані в табл. 2.1 значення активних, реактивних та повних опорів. Визначити ємність конденсаторів та індуктивність котушок, які використовувалися в роботі.

Таблиця 2.1.

Результати лабораторних вимірювань та обчислень

| Назва       | Виміряні величини |          |          |           | Обчислені величини |           |           |          |          |
|-------------|-------------------|----------|----------|-----------|--------------------|-----------|-----------|----------|----------|
|             | $R$<br>Ом         | $U$<br>В | $I$<br>А | $P$<br>Вт | $R_a$<br>Ом        | $Z$<br>Ом | $X$<br>Ом | $L$<br>Г | $C$<br>Ф |
| Реостат     | 1.<br>...<br>3.   |          |          |           |                    |           |           |          |          |
| Котушка     | 1.<br>...<br>3.   |          |          |           |                    |           |           |          |          |
| Конденсатор | 1.<br>...<br>3.   |          |          |           |                    |           |           |          |          |

### 2.3. ПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

1. Які є методи вимірювання опорів?
2. Яка різниця між омичним та активним опором?
3. Будова та принцип дії приладів магнітоелектричної системи.
4. Розширення меж вимірювання приладів.
5. Будова та принцип дії логометра магнітоелектричної системи. Рівняння шкали логометра.
6. Нарисувати та пояснити принципові схеми приладів безпосередньої оцінки (омметрів).
7. Нарисувати принципову схему та пояснити роботу мегомметра.
8. Мостовий метод вимірювання опорів.
9. Непрямий метод вимірювання омичних та активних опорів.

10. Визначення ємності конденсатора та його активного опору за допомогою непрямого методу.
11. Визначення індуктивності котушки та її активного опору за допомогою непрямого методу.
12. Будова та принцип дії приладів електромагнітної системи.
13. Будова та принцип дії приладів електродинамічної системи.
14. Будова та принцип дії приладів електростатичної системи.
15. Будова та принцип дії приладів індукційної системи.

#### **2.4. РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА**

1. Вартабедян В.А. Загальна електротехніка. К.: Вища школа, 1986. 359 с. С. 82-92.
2. Будіщев М.С. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка. Львів: «Афіша», 2001. 424 с. С. 145-169.
3. Матвійчук А.Я., Стінянський В.Л. Електротехніка: навчально-методичний посібник. Вінницький державний педагогічний університет ім. М. Коцюбинського. Вінниця, 2017. 270 с. С. 198-200.
4. Нестерчук Д.М., Квітка С.О., Галько С.В. Методи і засоби вимірювань електричних та неелектричних величин: навчальний посібник. Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2017. 206 с. С. 83-97.

### Лабораторна робота № 3

## ПЕРЕДАЧА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ДВОПРОВІДНОЮ ЛІНІЄЮ

**Мета роботи:** дослідити передачу електричної енергії на моделі двопровідної лінії в режимі холостого ходу, короткого замикання та змінного навантаження при незмінній входній напрузі.

**Прилади та обладнання:** вольтметри, амперметри, реостати, провідники.

### 3.1. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Найпростіше електричне коло має у своєму складі джерело живлення, лінію електропередачі та споживач електричної енергії, який виконує роль навантаження для джерела живлення.

Схема дослідження передачі електроенергії на моделі двопровідної лінії, зображена на рис. 3.1.

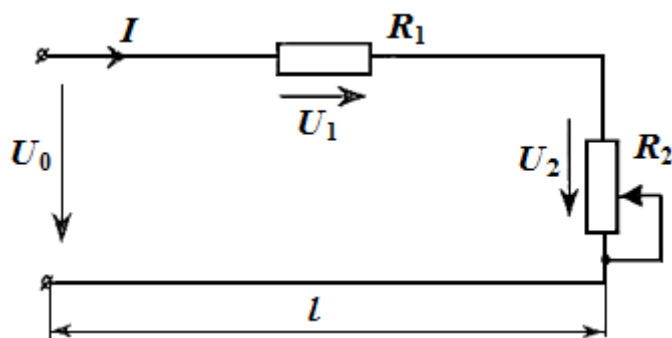


Рис. 3.1. Схема дослідження передачі електричної енергії на моделі двопровідної лінії

Всі приймачі електроенергії пристосовані для роботи при певній напрузі. Для кожного типу приймачів існують відповідні границі допустимого пониження напруги на затискачах, при переході до якого нормальна робота приймачів порушується.

Якщо напруга на генераторних затискачах лінії  $U_0 = \text{const}$ , опір лінії  $R_1$  приймача  $R_2$  струм лінії,  $I$  а  $\Delta U$  спад напруги в лінії (втрати енергії в джерелі живлення знехтуємо), то

$$\Delta U = R_1 \cdot I,$$

$$U_2 = U_0 - \Delta U = U_0 - R_1 \cdot I;$$

Тобто  $\Delta U$  і  $U_2$  при  $U_0 = \text{const}$  пов'язані зі струмом  $I$  лінійними залежностями.

При закороченій лінії, коли

$$R_2 = 0, \text{ тоді } I = \frac{U_0}{R_1}, \Delta U = U_0, U_2 = 0.$$

Важливим є поняття про *коефіцієнт корисної дії (ККД,  $\eta$ ) лінії передачі*, тобто відношення потужності, спожитої навантаженням, до потужності, виробленої джерелом електричної енергії

$$\eta = \frac{P_2}{P_0},$$

де  $P_2$  – потужність передана споживачу,  $P_0$  – потужність підведена до вхідних затискачів лінії.

З потужності

$$P_0 = U_0 \cdot I,$$

що надходить в електричне коло, частина доходить до кінця лінії, тобто до споживача, а частина

$$P_1 = I^2 \cdot R_1,$$

де  $R_1 = \rho \frac{2l}{S}$  – опір провідників, витрачається у лінії передачі, тобто

$$P_0 = I^2 R_2 + I^2 R_1.$$

Струм залежить від опору  $R_2$ , ввімкненого на кінці лінії.

$$I = \frac{U_2}{R_2} = \frac{U_0}{R_1 + R_2}.$$

Із зменшенням опору струм збільшується. Найбільший струм буде тоді, коли  $R_2$  дорівнюватиме нулю, що відповідає **короткому замиканню**:

$$I = \frac{U_0}{R_1}.$$

Корисна потужність:

$$P_2 = U_2 \cdot I = I^2 R_2 = \frac{U_0^2}{(R_1 + R_2)^2},$$

для знаходження умови при якій корисна потужність буде мати найбільше значення, необхідно взяти похідну від  $P_2$  по  $R_2$  і прирівняти її до нуля:

$$\frac{dP_2}{dR_2} = \frac{U_0^2 \left( (R_1 + R_2)^2 - 2R_2(R_1 + R_2) \right)}{(R_1 + R_2)^4} = 0,$$

звідки  $R_1 = R_2$ .

Тобто найбільша потужність на кінці лінії буде тоді, коли опір навантаження дорівнює опору лінії. Цей режим називається **режимом узгодження**. В цьому випадку напруга на кінці лінії

$$U_2 = I \cdot R_2 = \frac{U_0 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{U_0}{2}$$

дорівнюватиме половині напруги на початку лінії.

Коефіцієнт корисної дії буде дорівнювати також 0,5.

$$\eta = \frac{P_2}{P_0} = \frac{R_2 I^2}{(R_1 + R_2) I^2} = \frac{U_2 I}{U_0 I} = 0,5.$$

При передачі електричної енергії таке низьке значення ККД ( $\eta$ ) недопустиме, тому узгоджений режим використовується тільки в пристроях невеликої потужності, де потрібно при малих габаритах устаткування отримати найбільшу потужність у навантаженні.

Коефіцієнт корисної дії для будь-якого навантаження

$$\eta = \frac{P_2}{P_0} = \frac{I^2 R_2}{I^2 (R_1 + R_2)} = \frac{1}{1 + R_1 / R_2}.$$

Якщо  $R_2$  прямує до  $\infty$ , що відповідає **холостому ходу**, то коефіцієнт корисної дії,  $\eta$ , прямує до 1, тобто до максимального можливого значення. Це означає, що у всіх енергетичних установках, де ККД передачі має суттєве значення, опір навантаження має бути набагато більшим за опір лінії та джерела. При холостому ході струм  $I$  в колі дорівнює нулю, поняття ККД немає сенсу. Із зменшенням  $R_2$ , ККД понижується і при  $R_2 = 0$ , що відповідає короткому замиканню, він дорівнюватиме нулю.

На рис. 3.2 показано зміну  $U_0$ ,  $U_2$ ,  $\Delta U$ ,  $R_1$ ,  $\eta$ ,  $R_2$ ,  $P_0$ ,  $P_2$  в залежності від струму  $I$ .

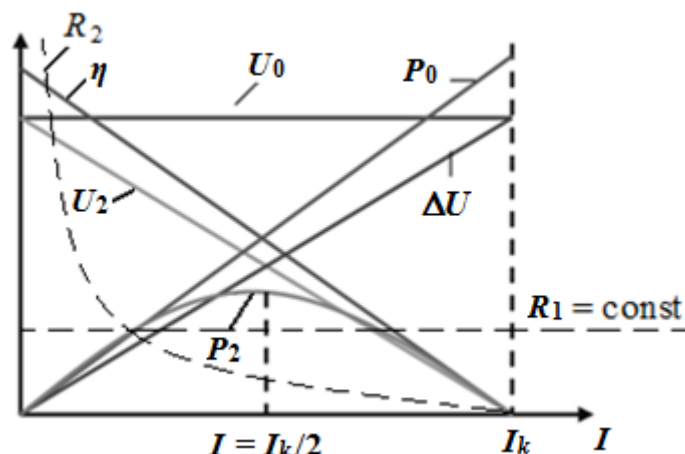


Рис. 3.2. Залежність параметрів електричного кола від величини струму

### 3.2. ХІД РОБОТИ

1. Зібрати схему згідно рис. 3.3.
2. Дослідити режим холостого ходу (затискачі *a* і *b* розімкнені).
3. Дослідити режим короткого замикання (затискачі *a* і *b* закорочені).
4. Дослідити режим змінного навантаження (до затискачів *a* і *b* вмикається навантаження).
5. Результати записати у табл. 3.1.

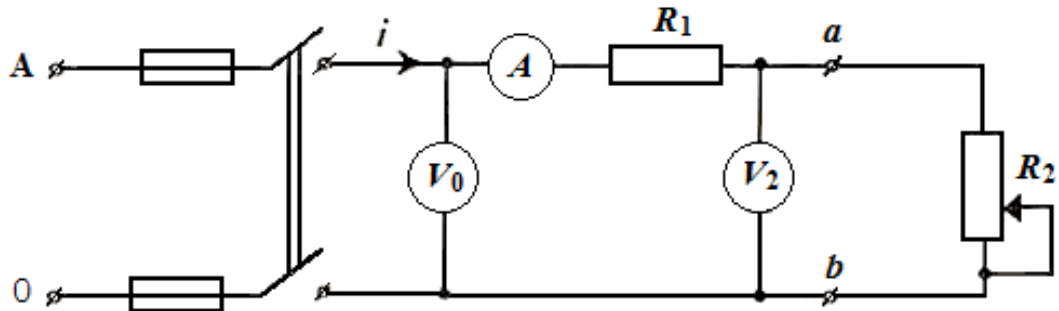


Рис. 3.3. Схема експериментальної установки

Таблиця 3.1.

Результати лабораторних вимірювань та обчислень

| Режим                            | Виміряні величини |       |     | Обчислені величини |       |       |            |        |       |
|----------------------------------|-------------------|-------|-----|--------------------|-------|-------|------------|--------|-------|
|                                  | $U_0$             | $U_2$ | $I$ | $\Delta U$         | $P_0$ | $P_2$ | $\Delta P$ | $\eta$ | $R_2$ |
|                                  | В                 | В     | А   | В                  | Вт    | Вт    | Вт         | %      | Ом    |
| 1. Холостий хід                  |                   |       |     |                    |       |       |            |        |       |
| 2. Коротке замикання             |                   |       |     |                    |       |       |            |        |       |
| 3. Змінне навантаження:<br>(3-5) |                   |       |     |                    |       |       |            |        |       |
| (6). Режим узгодження            |                   |       |     |                    |       |       |            |        |       |
| (7-9). Змінне навантаження       |                   |       |     |                    |       |       |            |        |       |

Опір лінії передачі, визначений за даними досліду короткого замикання, дорівнює

$$R_1 = \frac{U_0}{I}.$$

Користуючись виміряними і обчисленими величинами побудувати

графіки залежностей:  $U_0$ ,  $U_2$ ,  $\Delta U$ ,  $R_1$ ,  $\eta$ ,  $R_2$ ,  $P_0$ ,  $P_2$  від струму  $I$  (рис 3.2).

### 3.3. ПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

1. Енергетичні співвідношення в електричних колах.
2. Режим холостого ходу, його параметри та співвідношення.
3. Режим короткого замикання, його параметри та співвідношення.
4. Режим узгодження, його параметри та співвідношення.
5. При якому режимі доцільна, з огляду на максимальний коефіцієнт корисної дії, передача електричної енергії та чому?
6. При яких умовах здійснюється передача максимальної потужності та чому?
7. Визначення потужності за даними параметрами двопровідної лінії.
8. Пояснити залежність напруг  $U_0$ ,  $U_2$ ,  $\Delta U$  від струму в колі.
9. Пояснити залежність потужностей  $P_0$ ,  $P_2$  від струму в колі.
10. Пояснити залежність  $R_1$ ,  $\eta$ ,  $R_2$  від струму в колі.
11. Баланс потужностей для двопровідної лінії.
12. Коефіцієнт корисної дії та способи його знаходження.

### 3.4. РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Будіщев М.С. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка. Львів: «Афіша», 2001. 424 с. С. 15-21.
2. Евдокимова Ф.Е. Общая электротехника: учебн. для учащихся неэлектротехнических специальностях техникумов. 3-е изд., испр. М.: Высшая школа. 2004. 367 с. С. 43-47.
3. Иванов И. И., Соловьев Г. И., Фролов В. Я. Электротехника и основы электроники: Учебник. 7-е изд., перераб. и доп. СПб.: Издательство «Лань», 2012. 736 с. С. 19-23.
4. Старіков С. М. Теоретичні основи електротехніки. Кривий Ріг: Український політехнічний технікум. 2014. 274 с. С. 22-26.

## Лабораторна робота № 4

### ДОСЛІДЖЕННЯ ФАЗОМЕТРА

**Мета роботи:** вивчити будову, принцип дії та ввімкнення в електричне коло фазометра. Дослідити зміну коефіцієнта потужності від характеру навантаження та методи його підвищення.

**Прилади та обладнання:** фазометр, ватметр, амперметр, вольтметр, трансформатор струму, автотрансформатор, реостат, котушка, конденсатор.

#### 4.1. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Електродинамічні та феродинамічні логометри можна використовувати для побудови фазометрів (як аналогових (рис. 4.1), так і цифрових (рис. 4.2)), які призначені для вимірювання фазового зсуву між напругою та струмом у навантаженні.



Рис. 4.1. Електродинамічний фазометр



Рис. 4.2. Цифровий фазометр

Електричну схему електродинамічного фазометра і відповідну їй векторну діаграму приведено на рис 4.3. Рухома частина механізму, що є двома жорстко скріпленими під кутом  $60^\circ$  рамками, кріпиться на осях і опорах. Механічного протидіючого моменту в механізмі немає. Взаємодія струму  $I_1$  ( $I_1 = I_n$ ), який протікає по нерухомій котушці приладу 1, із струмом  $I_2$ , який тече по обмотці рамки 2, кут між площиною якої та площиною нерухомої котушки дорівнює  $150^\circ$  при  $\alpha = 0$ , створює обертовий момент [8]

$$M_1 = C_1 I_1 I_2 \cos(I_1, I_3) \sin(150^\circ - \alpha).$$

Взаємодія струму  $I_1$  із струмом  $I_3$  створює обертовий момент  $M_2$ , який діє

назустріч  $M_1$ :

$$M_2 = C_2 I_1 I_2 \cos(I_1, I_3) \sin(150^\circ - 60^\circ - \alpha).$$

З векторної діаграми випливає, що кут між векторами  $I_1$  та  $I_2$  дорівнює  $\varphi$ .

Зсув фаз між  $U$  (або  $I_2$ ) і струмом  $I_3$  виконується таким, що  $\varphi = 60^\circ$ , внаслідок вмикання в коло обмотки рамки 3 котушки індуктивності  $L_3$  і резистора  $R_3$ . Отже,  $\cos(I_1, I_3) = \cos(60^\circ - \varphi)$ . У встановленому режимі рухома частина приладу займе положення, при якому [8]

$$M_1 = M_2;$$

тому

$$C_1 I_1 I_2 \cos \varphi \cos(60^\circ - \alpha) = C_2 I_1 I_3 \cos(60^\circ - \varphi) \cos \alpha.$$

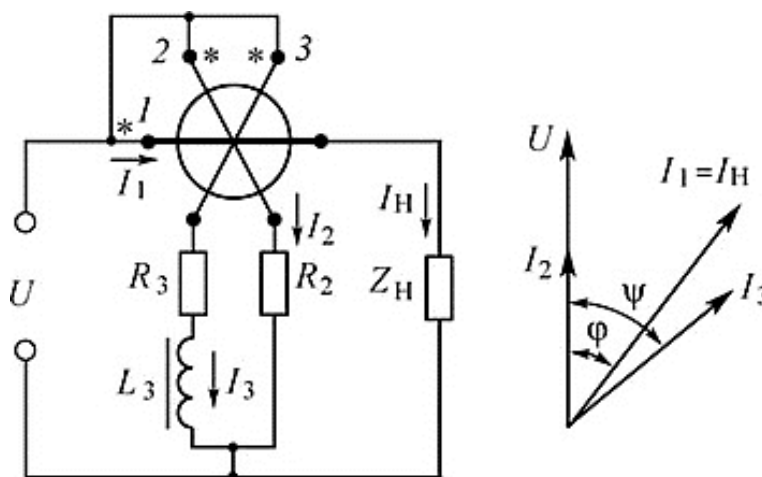


Рис. 4.3. Схема електродинамічного фазометра і відповідна векторна діаграма

При умові  $C_1 I_1 = C_2 I_3$  останнє рівняння буде виконуватися при  $\alpha = \varphi$ . Таким чином, кут повороту рухомої частини рамки пропорційний куту зсуву фаз між напругою і струмом у навантаженні. Прилад має лінійну шкалу. Його покази практично не залежать від нестабільності напруги на навантаженні (в межах 10-20%). Недоліками таких фазометрів є порівняно велика споживана потужність від джерела живлення (5-10 ВА), і залежність показів від частоти. Шкалу фазометра можна проградувати і у значеннях коефіцієнта потужності ( $\cos \varphi$ ) [8].

Зведена похибка лабораторних фазометрів не перевищує  $\pm 0,5\%$ . Характеристики, зазначені вище, має електродинамічний фазометр типу Д 578 (рис. 4.1).

## 4.2. ХІД РОБОТИ

1. Вивчити будову фазометра та ознайомитися з усіма приладами, що використовуються в роботі.
2. З'єднати прилади за схемою, яка зображена на рис. 4.4.

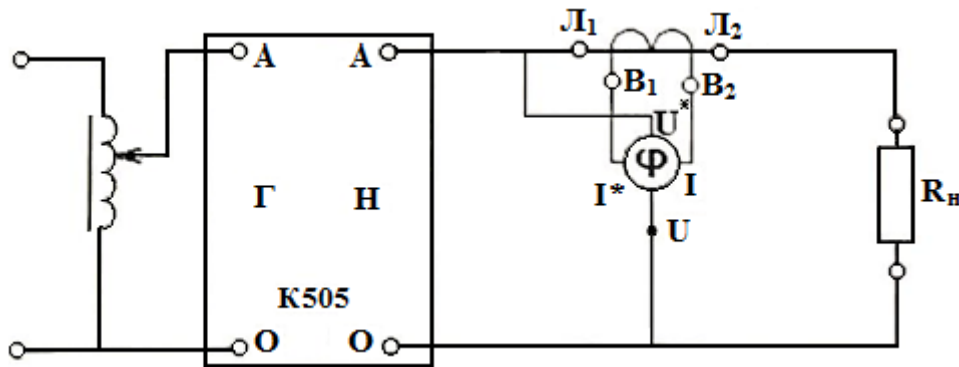


Рис. 4.4. Електрична схема лабораторної роботи

3. Зняти покази приладів для різних навантажень та занести у табл. 4.1.
4. Перевірити покази фазометра на поділках 1; 0,9; 0,8; 0,7; 0,6 для ємнісного та індуктивного навантажень за формулою:

$$\cos \varphi = \frac{P}{UI}.$$

Дані внести в табл. 3.1.

5. Вмиканням паралельно до активно-індуктивного споживача батареї конденсаторів підвищити коефіцієнт потужності  $\cos \varphi$ . Розрахувати ємність конденсатора за формулою

$$C = \frac{P}{2\pi f U^2} (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2).$$

## 4.3. ПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

1. Що таке миттєве, амплітудне, діюче та середнє значення синусоїдної величини?
2. Що називається початковим фазовим кутом і кутом зсуву фаз?
3. Поясніть наявність в електричному колі реактивно-індуктивної складової потужності?
4. Від чого залежить коефіцієнт потужності? Яке значення має цей коефіцієнт?

5. Які є способи підвищення коефіцієнта потужності?
6. Будова фазометра. Рівняння шкали фазометра.
7. Прилади електромагнітної системи. Рівняння шкали. Переваги та недоліки приладів цієї системи.
8. Використання приладів електромагнітної системи.

Таблиця 4.1.

Результати лабораторних вимірювань та обчислень

| №<br>з/п      | Навантаження       | $U$<br>В | $I$<br>А | $P$<br>Вт | $\varphi$ | Обчислити<br>$\cos\varphi$ |
|---------------|--------------------|----------|----------|-----------|-----------|----------------------------|
| 1<br>...<br>3 | Активне            |          |          |           |           |                            |
| 1<br>...<br>3 | Активно-індуктивне |          |          |           |           |                            |
| 1<br>...<br>3 | Активно-ємнісне    |          |          |           |           |                            |

#### 4.4. РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Вартабедян В.А. Загальна електротехніка. К.: Вища школа, 1986. 359 с. С. 11-19, 41-44, 71-73, 90-92.
2. Іванов А.А. Довідник з електротехніки. К.: Вища школа. 1995. 865 с. С. 23-25, 86-88.
3. Будіщев М.С. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка. Львів: «Афіша», 2001. 424 с. С. 145-169.

## Лабораторна робота № 5

### ПОСЛІДОВНЕ З'ЄДНАННЯ ОПОРІВ У КОЛІ ЗМІННОГО СТРУМУ. РЕЗОНАНС НАПРУГ

**Мета:** дослідити коло з послідовно з'єднаними споживачами. Вивчити вплив зміни індуктивності та ємності на величину струму, опору, потужності, напруги на його ділянках. Дослідити явище резонансу напруг.

**Прилади та обладнання:** вольтметри з додатковими опорами, амперметр, реостати, котушка, конденсатор, ватметр, вимірювальний комплект К-505.

#### 5.1. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

При послідовному з'єднанні активних опорів  $R_1$  і  $R_2$  (рис. 5.1) напруги  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U$  збігаються за фазою зі струмом  $I$ , тому зсуви фаз рівні нулю, а коефіцієнти потужностей дорівнюють одиниці:

$$\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi = 0, \cos \varphi_1 = \cos \varphi_2 = \cos \varphi = 1.$$

$$P_1 = U_1 I, P_2 = U_2 I, P = P_1 + P_2 = UI.$$

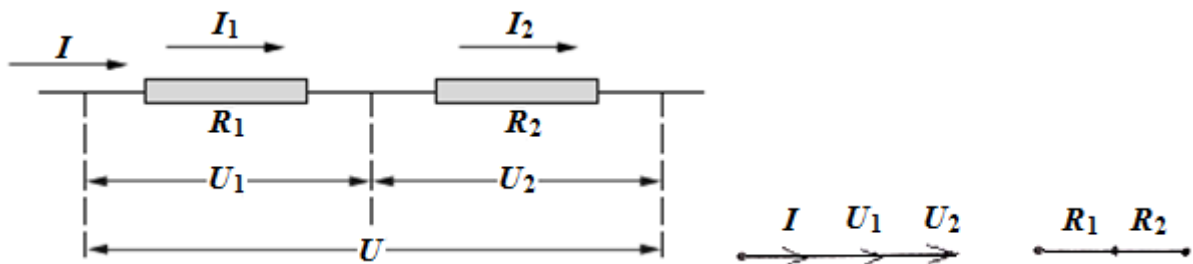


Рис. 5.1. Послідовне з'єднання активних опорів  $R_1$  і  $R_2$

При послідовному з'єднанні активного та активно-індуктивного опорів (рис. 5.2), напруга на активному опорі співпадає за фазою зі струмом ( $\varphi_1 = 0$ ), а на активно-індуктивному опорі випереджає струм на кут  $\varphi_2$ . Загальна напруга  $U$  випереджає струм на кут  $\varphi$ , отже:

$$\cos \varphi_1 = 1; \cos \varphi_2 = \frac{R_2}{Z_2}; \cos \varphi = \frac{R_1 + R_2}{Z}; \underline{U} = \underline{U}_1 + \underline{U}_2,$$

де:  $R_1$  – активний опір;  $R_2$  – активний опір котушки;  $Z_2$  – повний опір котушки;  $Z$  – повний опір схеми.

При послідовному з'єднанні активного та активно-ємнісного опорів (рис. 5.3), напруга на активному опорі збігається за фазою зі струмом  $\varphi_1 = 0$ , а

на конденсаторі відстає від нього на кут  $\varphi_2$ , тому:

$$\cos \varphi_1 = 1; \underline{U} = \underline{U}_1 + \underline{U}_2; \cos \varphi_2 = \frac{R_2}{Z_2}; \cos \varphi = \frac{R_1 + R_2}{Z}.$$

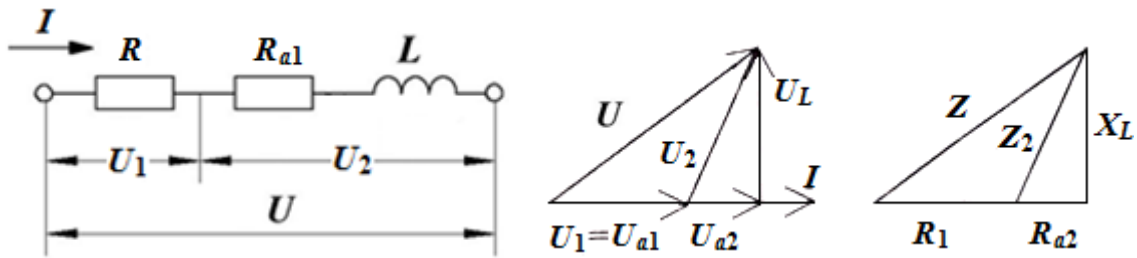


Рис. 5.2. Послідовне з'єднання активного та активно-індуктивного опорів

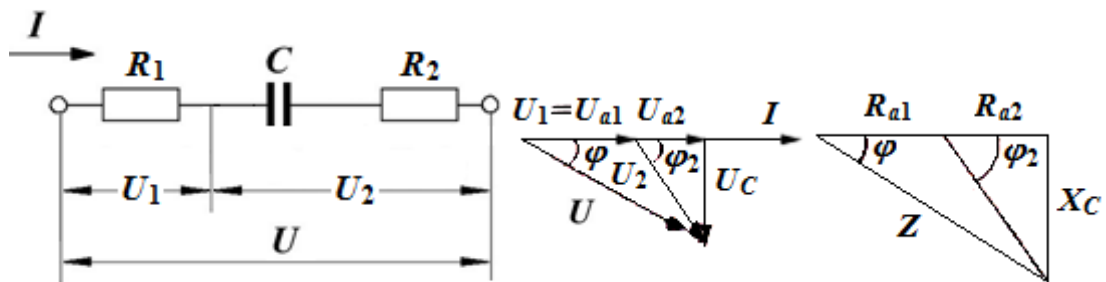


Рис. 5.3. Послідовне з'єднання активного та активно-ємнісного опорів

При послідовному з'єднанні активного, індуктивного та ємнісного опорів, напруга на активному опорі співпадає за фазою зі струмом, на індуктивному опорі напруга випереджає струм на кут  $90^\circ$ , а на ємнісному опорі напруга відстає від струму по фазі на кут  $90^\circ$ . Загальна напруга  $\underline{U}$  випереджає струм  $\underline{I}$  на кут  $\varphi$ , при умові, що індуктивний опір  $X_L$  більший від ємнісного  $X_C$ , як зображено на векторній діаграмі рис. 5.4 [4].

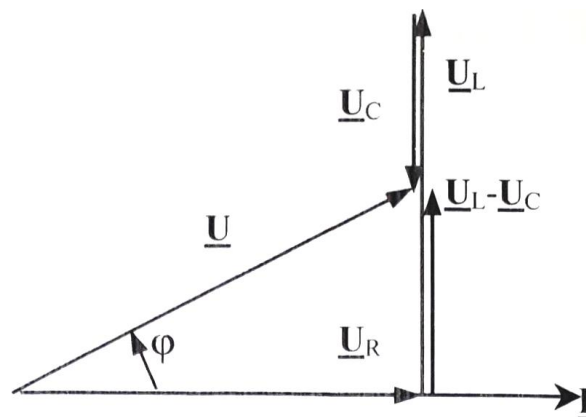


Рис. 5.4. Векторна діаграма

При послідовному з'єднанні активного, індуктивного та ємнісного опорів загальна напруга  $\underline{U}$  відстає від струму  $\underline{I}$  по фазі на кут  $\varphi$ , при умові, що

індуктивний опір  $X_L$  менший від ємнісного опору  $X_C$ , як це зображено на векторній діаграмі рис. 5.5.

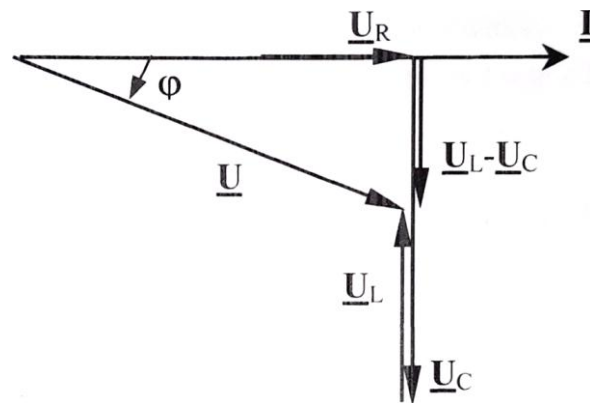


Рис. 5.5. Векторна діаграма

При послідовному з'єднанні активного, активно-індуктивного та активно-ємнісного опорів (рис. 5.6) струм лише на активному опорі збігається за фазою з напругою. У котушці струм відстає від напруги, а на конденсаторі випереджає її по фазі.

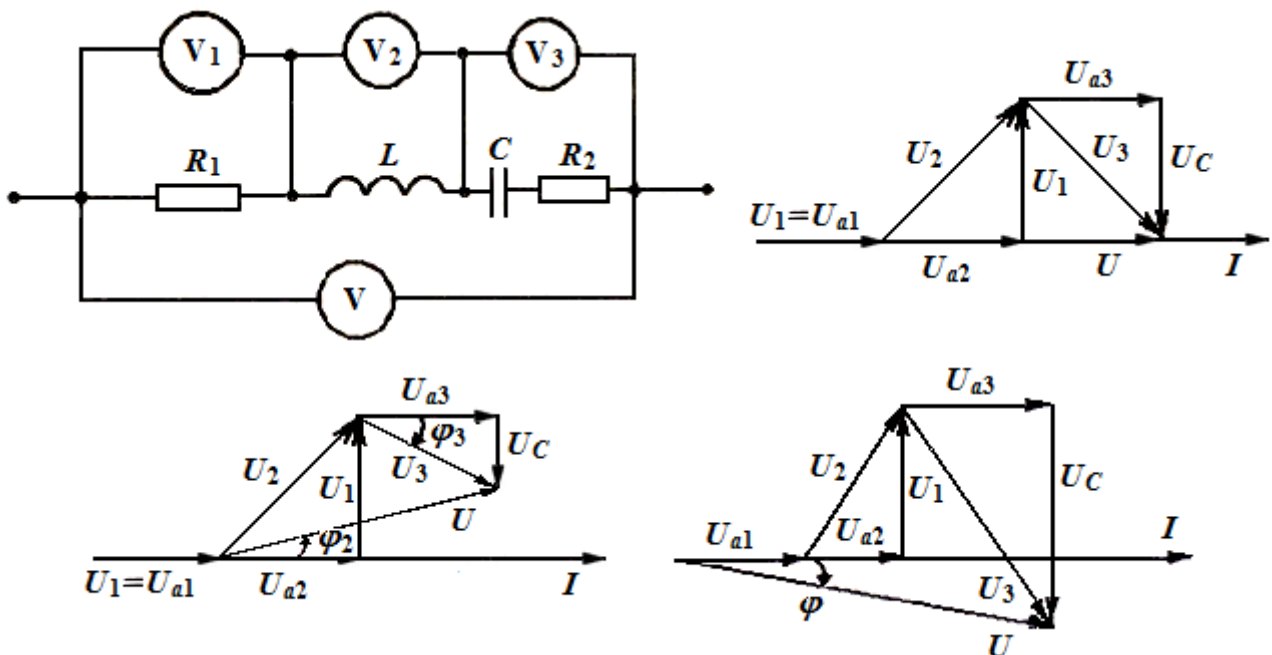


Рис. 5.6. Послідовне з'єднання активного, активно-індуктивного та активно-ємнісного опорів

З векторної діаграми видно, що загальна напруга менша арифметичної суми трьох напруг:

$$U = \sqrt{U_a^2 + (U_L - U_C)^2},$$

тоді загальний опір

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}.$$

Залежно від співвідношення опорів  $X_L$  і  $X_C$ , де

$$X_L = \omega L = \frac{U_L}{I}; \quad X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{U_C}{I},$$

струм у колі, коли  $X_L > X_C$ , відстає від вхідної напруги (рис. 5.6), і випереджає її (рис. 5.6), коли  $X_L < X_C$ , та збігається за фазою з напругою (рис. 5.6, коли  $X_L = X_C$ . В останньому випадку має місце резонанс напруг (рівність реактивних напруг за абсолютною величиною).

$$U_L = X_L I, \quad U_C = X_C I, \quad U_a = RI.$$

Струм при резонансі напруг має максимальне значення. Загальна напруга рівна сумі активних напруг на кожному опорі. Потужність

$$P = UI, \quad \cos \varphi = 1.$$

При резонансі напруг індуктивний опір однієї частини кола компенсується ємнісним опором другої її частини, послідовно з'єднаної з першою. В результаті реактивний опір і реактивна потужність на затискачах кола рівні нулю.

Частоти, при яких спостерігається явище резонансу, називаються **резонансними частотами**.

Дослідження резонансних режимів в електричних колах полягає в знаходженні резонансних частот, залежностей різних величин від частоти (частотні характеристики) або параметрів  $L$  чи  $C$ , а також у розгляді енергетичних співвідношень при резонансі.

Коли в колі змінного струму з послідовним з'єднанням  $R$ ,  $X_L$  і  $X_C$ ,  $X_L = X_C$ , при цьому

$$U_L = U_C,$$

то таке явище називають **резонансом напруг**. При резонансі напруг у колі буде найбільший струм, бо загальний опір його зменшиться та дорівнюватиме активному опору, оскільки  $X_L - X_C = 0$ .

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = R, \quad \text{а} \quad I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{R}.$$

При відхиленнях від резонансних умов струм у колі зменшується, тому що до активного опору додається опір реактивний.

Резонанс напруг можна одержати, змінюючи одну з таких трьох величин:

індуктивність  $L$ , ємність  $C$  або частоту  $f$ .

Частоту, при якій настає резонанс при певних  $L$  і  $C$ , знаходять з умови  $X_L = X_C$ :

$$X_L = \omega L = 2\pi f L, \quad X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C},$$

$$\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C}, \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad \text{або} \quad f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = f_0.$$

Частоту  $f_0$  називають **резонансною**, або власною частотою електричного кола.

Резонанс напруг настає, коли власна частота кола  $f_0$  дорівнює частоті мережі (вимушені коливання). При резонансній частоті в колі буде найбільший струм. Частоту кола змінюють зміною  $L$  або  $C$ .

Якщо в схемі змінювати індуктивність  $L$  при сталій ємності  $C$ , частоті мережі  $f$  і напрузі мережі  $U$ , то одержимо резонансні криві – це залежності струму в колі  $I$ , напруги на котушці  $U_L$ , напруги на конденсаторі  $U_C$ , повного опору  $Z$ , а також активної потужності кола  $P$ , коефіцієнта потужності  $\cos\varphi$  і власної частоти  $f_0$  від індуктивності кола  $L$ . На рис. 5.7 зображені хвильова і векторна діаграми напруг при резонансі.

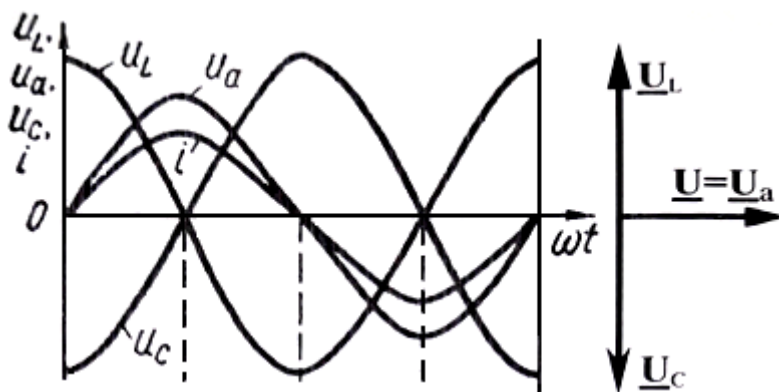


Рис. 5.7 Хвильова та векторна діаграми

Зауважимо, що при резонансі напруг на реактивних опорах  $X_L$  і  $X_C$  можуть виникати напруги, які перевищують напругу мережі. Це можливе, коли опори  $X_L = X_C \gg R$ .

У цьому випадку напруги  $U_L = U_C$  можуть мати значення набагато більші від напруги живлення  $U$  і створювати небезпеку для ізоляції індуктивних та ємнісних елементів, а також для людей, які можуть мати контакт із таким резонансним контуром.

Важливим є поняття зміни кута зсуву фаз. Для послідовного з'єднання  $R$ ,  $L$  і  $C$  зсув фаз  $\varphi_u - \varphi_i = \varphi$ ; можна визначити із трикутника опорів:

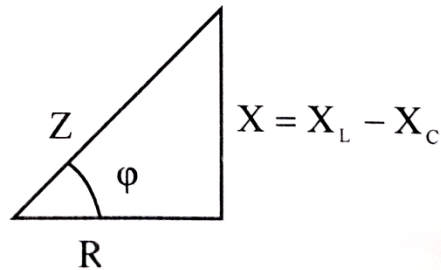


Рис. 5.8. Трикутник опорів

$$\varphi = \arctan \frac{X_L - X_C}{R} = \arctan \frac{2\pi f L - \frac{1}{2\pi f C}}{R}.$$

Графік зміни кута зсуву фаз  $\varphi$  від частоти  $f$  має вигляд (рис 5.9):

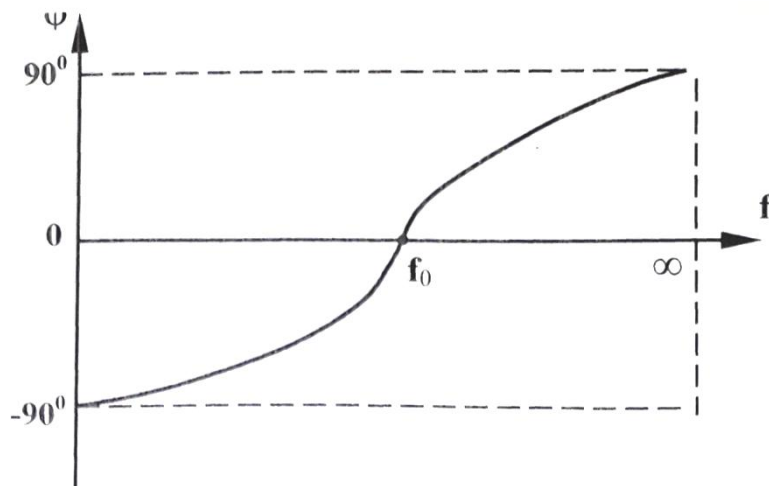


Рис. 5.9. Графік зміни кута зсуву фаз від частоти

При  $f = 0$ ,  $\varphi = -90^\circ$ ; при  $f = f_0$ ,  $\varphi = 0$ ; при  $f \rightarrow \infty$   $\varphi \rightarrow 90^\circ$ .

## 5.2. ХІД РОБОТИ

1. З'єднати прилади згідно схеми рис. 5.10.
2. Провести вимірювання струму, напруг і активної потужності для таких випадків послідовного з'єднання опорів:

- а) двох активних;
- б) активного і активно-індуктивного;
- в) активного та активно-ємнісного;

- г) активно-індуктивного та активно-ємнісного;
- д) резонансу напруг.

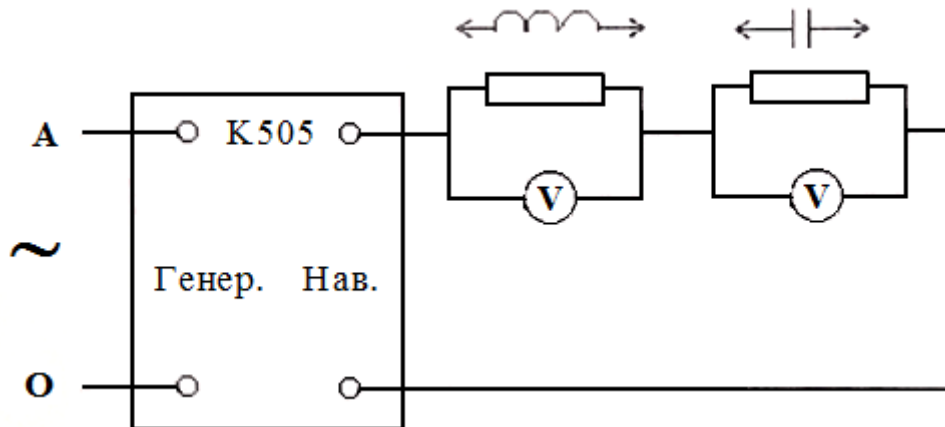


Рис. 5.10. Схема експериментальної установки

3. Вимірювання провести для кожної ділянки схеми та всього кола. Як індуктивний опір, можна використати котушку шкільного універсального трансформатора. Досліди провести з усіма видами навантаження, які вказані в таблиці. Індуктивний опір котушки змінюється переміщенням осердя трансформатора.

4. Результати вимірювань і обчислень записати в табл. 5.1. Для всіх випадків побудувати векторні діаграми напруг, дотримуючись масштабів. Порівняти результати вимірювань загальної напруги з результатами, одержаними з векторних діаграм.

### ПРИМІТКА

При наближенні до резонансу, загальну напругу треба зменшити до 50-60 В, оскільки напруга на котушці трансформатора може досягти небезпечної для неї величини.

Основною ознакою резонансу напруг необхідно вважати не рівність показів вольтметрів на конденсаторі та котушці (чисто реактивних опорів, практично, не буває), а максимальні значення струму та  $\cos\varphi$ .

Невиконання вимог правил техніки безпеки та охорони праці при проведенні лабораторної роботи № 5 може призвести до ураження електричним струмом та виходу з ладу приладів.

### 5.3. ПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

1. Переваги змінного струму над постійним.
2. Чому, як криву струму, вибрано синусоїду?
3. Обґрунтувати вибір частоти 50 Гц, як промислової.
4. Фаза, період, частота змінного струму.
5. Яким чином можна додати дві синусоїдні величини?
6. Середнє та діюче значення синусоїдного струму.
7. Зображення, синусоїдних величин, за допомогою векторів.
8. Струм у безреактивному колі. Хвильова та векторна діаграми.
9. Індуктивний опір у колі змінного струму.
10. Послідовне з'єднання кількох реальних котушок індуктивностей.
11. Конденсатор у колі змінного струму.
12. Коло, де наявний конденсатор та активний опір.
13. Хвильова та векторна діаграми. Ємнісний та повний опори. Закон Ома для змінного струму.
14. Послідовне з'єднання конденсаторів та опорів. Векторна діаграма.
15. Послідовне з'єднання котушки індуктивності, конденсатора та активного опору.
16. Повний опір. Трикутник опорів.
17. Явище резонансу. Резонансна частота.
18. Резонанс напруг. Векторна та хвильова діаграми при резонансі.

### 5.4. РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Вартабедян В.А. Загальна електротехніка. К.: Вища школа, 1986. 359 с. С. 26-37.
2. Іванов А. А. Довідник з електротехніки. К.: Вища школа. 1995. 865 с. С. 23-25, 86-88.
3. Будіщев М.С. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка. Львів: Афіша, 2001. 424 с. С. 36-62.
4. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка: електричні кола: навчальний посібник для студентів не електротехнічних спеціальностей усіх форм навчання / О. В. Колот [та ін.]. Краматорськ: ДДМА 2012. 124 с. С. 50-63.

*Таблиця 5.1.*

## Результати лабораторних вимірювань та обчислень

[illegible]

## Лабораторна робота № 6

### ПАРАЛЕЛЬНЕ З'ЄДНАННЯ ОПОРІВ У КОЛІ ЗМІННОГО СТРУМУ. РЕЗОНАНС СТРУМІВ

**Мета:** дослідити коло з паралельно з'єднаними споживачами. Вивчити вплив зміни індуктивності та ємності на величину струмів, опорів, потужностей, провідностей, коефіцієнта потужності. Дослідити умови резонансу струмів у паралельному колі. Освоїти методику розрахунку розгалуженого кола.

**Прилади та обладнання:** амперметри, ватметр, фазометр, вольтметр, вимірний комплект К-505, трансформатор струму, реостати, котушка, конденсатор.

#### 6.1. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

При паралельному з'єднанні активних опорів струм у кожному опорі збігається за фазою з напругою (рис. 6.1), тому  $I = I_1 + I_2$  тобто струм, що підходить до точки розгалуження дорівнює сумі струмів, що витікають з неї. Провідність кола рівна сумі провідностей віток:

$$g = g_1 + g_2, \text{ де } g_1 = 1/R_1, g_2 = 1/R_2.$$

При паралельному з'єднанні активного та активно-індуктивного опорів

$$I_1 = \frac{U}{R_1}, \quad I_2 = \frac{U}{\sqrt{R_2^2 + (\omega L)^2}}.$$

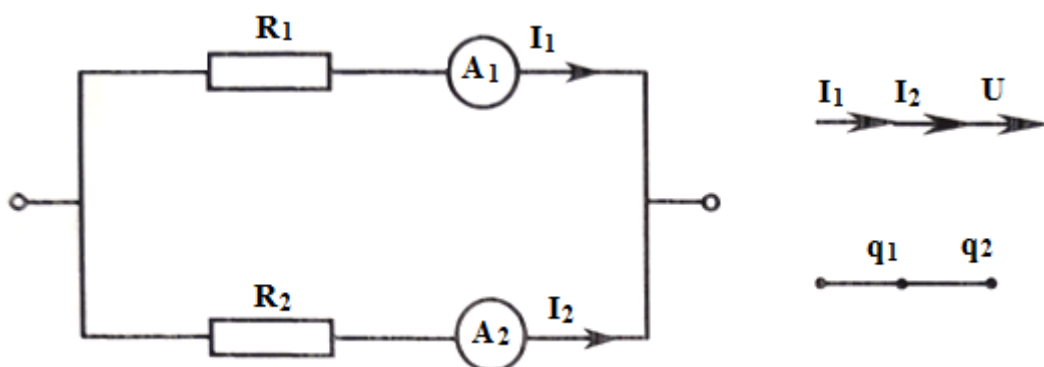


Рис. 6.1. Паралельне з'єднання активних опорів

Для кола змінного струму з реактивним навантаженням загальний струм до розгалуження буде дорівнювати геометричній сумі струмів у розгалуженнях, тобто  $\underline{I} = \underline{I}_1 + \underline{I}_2$  (рис. 6.2), а провідність кола:

$$y = \sqrt{(g_1 + g_2)^2 + b_2^2}, \text{ де } g = \frac{R}{Z^2}, b = \frac{x}{Z^2}.$$

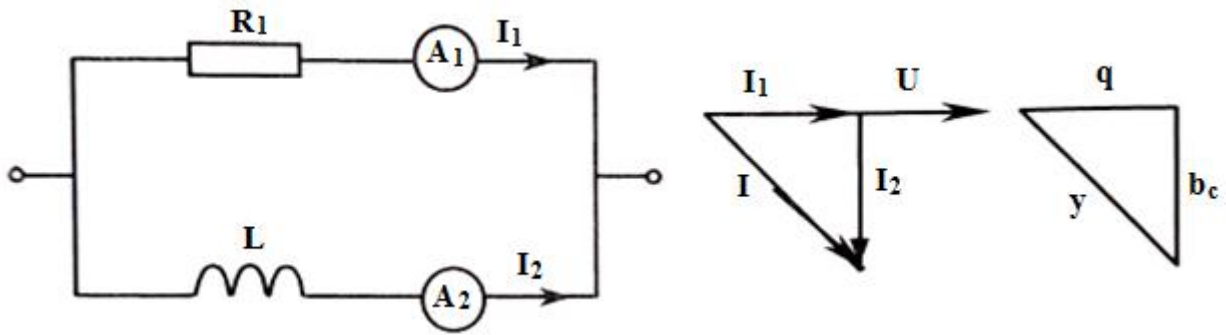


Рис. 6.2. Коло змінного струму з реактивним навантаженням

У нерозгалуженій частині кола струм відстає від напруги за фазою на кут  $\varphi$ , що визначається формулою:

$$\cos \varphi = \frac{g_1 + g_2}{y}.$$

При паралельному з'єднанні активного та ємнісного опорів загальний струм буде випереджати по фазі напругу (рис. 6.3):

$$I_1 = \frac{U}{R_1}, I_2 = \frac{U}{\sqrt{R_2^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}}, I = I_1 + I_2.$$

При паралельному з'єднанні активно-індуктивного і активно-ємнісного опорів

$$\cos \varphi = \frac{g_1 + g_2}{\sqrt{(g_1 + g_2)^2 + (b_1 + b_2)^2}}.$$

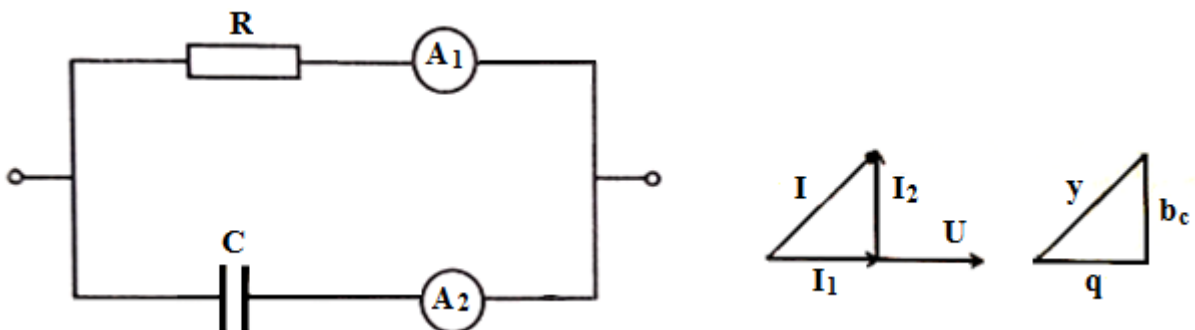


Рис. 6.3. Паралельне з'єднання активного та ємнісного опорів

Коли реактивно-індуктивний струм споживача буде більший від реактивно-ємнісного струму, то загальний струм буде відставати від напруги

(рис. 6.4).

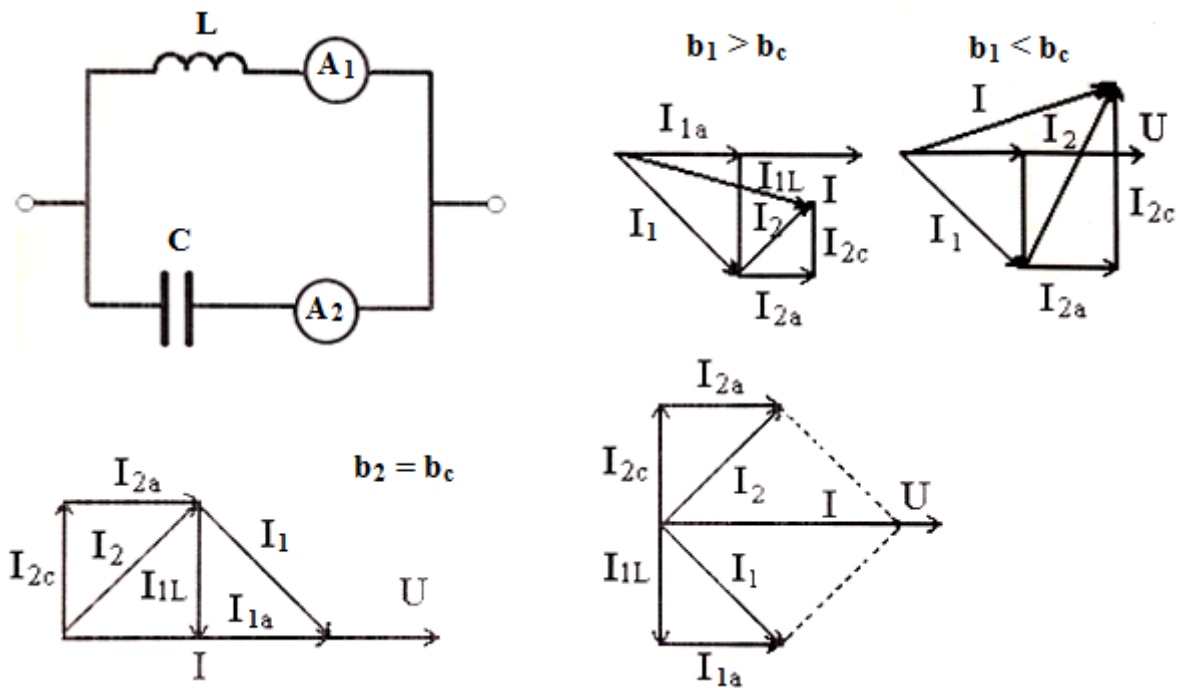


Рис. 6.4. Паралельне з'єднання реактивних опорів

Коли ж реактивно-ємнісний струм буде більший від реактивно-індуктивного струму, то загальний струм буде випереджати по фазі напругу (рис. 6.4).

Якщо реактивні струми, індуктивний та ємнісний рівні між собою, то настає резонанс струмів (рис. 6.4). Струми в окремих вітках будуть більші від загального. Загальний струм збігається за фазою з напругою. Різниця фаз між струмами у вітках при резонансі дорівнює  $180^\circ$ .

**Резонансними** або коливальними колами називають електричні кола, в яких можуть виникати явища резонансу напруг або струмів.

Частоти, при яких спостерігаються явища резонансу, називаються **резонансними частотами**.

При паралельному з'єднанні активного, індуктивного та ємнісного опорів у колі змінного струму, рис. 6.5, практичний інтерес становить випадок, коли в ньому однакові реактивні провідності:  $b_L = b_C$ . Тоді будуть однаковими, по модулю, й відповідні реактивні струми у вітках:  $I_L = I_C$ .

Такий режим у паралельному колі змінного струму, коли струми у вітках із реактивними опорами однакові, називають **резонансом струмів**. Враховуючи, що при резонансі  $b_L = b_C$ , повна провідність

$$y = \sqrt{g^2 + (b_L - b_C)^2} = g,$$

тоді результуючий струм у колі  $I = Uy = Ug$  буде найменшим, тому що  $b_L = b_C = 0$ . Отже, результуючий струм при резонансі визначається тільки активною провідністю. Але це не означає, що у вітках з індуктивним і ємнісним опорами немає струму. У кожній з них проходить струм, пропорційний до провідностей віток:

$$I_C = Ub_C, I_L = Ub_L, I_a = Ug; \text{ де } b_C = \frac{1}{X_C}, b_L = \frac{1}{X_L}, g = \frac{1}{R}.$$

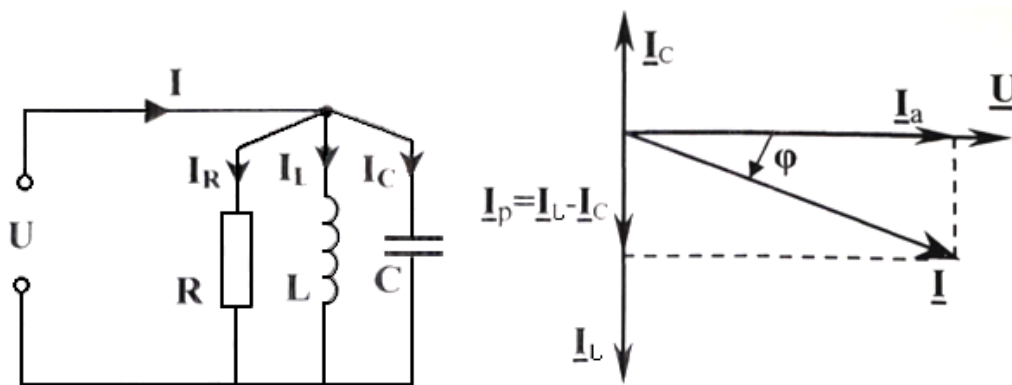


Рис. 6.5. Паралельне ввімкнення опорів  $R, L, C$  та векторна діаграма при  $b_L > b_C$

Але ці струми взаємно компенсуються, як протилежні за фазою. Якщо в колі немає активного опору, тобто  $R = \infty, g = 0$ , то результуючий струм дорівнюватиме нулю  $I = Ub = 0$ .

Практично резонанс струмів отримують, змінюючи індуктивність або ємність при постійній частоті джерела струму. Важливим, при вивченні резонансу, є поняття зміни кута зсуву фаз. Для паралельного з'єднання  $L$  і  $C$  зсув фаз визначається із трикутника провідностей рис. 6.1б:

$$\varphi = \arctg \frac{b_L - b_C}{g} = \arctg \frac{\frac{1}{2\pi f L} - 2\pi f C}{g}.$$

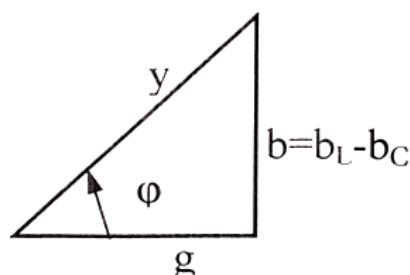


Рис. 6.6. Трикутник провідностей

Графік зміни кута зсуву фаз  $\varphi$  від частоти  $f$  має вигляд рис. 6.7:

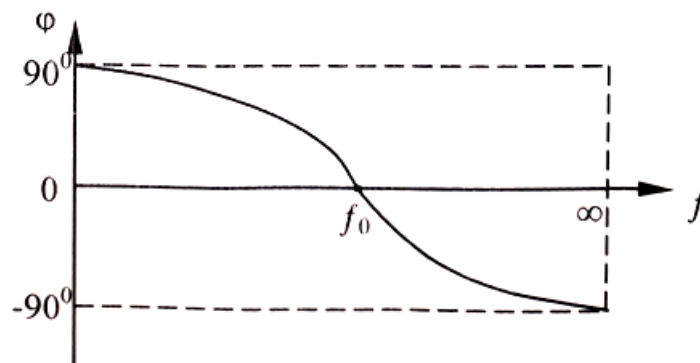


Рис. 6.7. Графік зміни кута зсуву фаз

При  $f = 0$  зсув фази  $\varphi = 90^\circ$ , при  $f = f_0$ ,  $\varphi = 0$ , при  $f \rightarrow \infty$ ,  $\varphi \rightarrow -90^\circ$ . Для резонансних контурів, послідовного чи паралельного з'єднання  $L$  і  $C$ , існує поняття **добротності** контуру  $Q$ , характеристичного (хвильового) опору  $\rho$ , **затухання**  $d$ , які можна обчислити за формулами:

$$Q = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 C R} = \frac{\sqrt{\frac{L}{C}}}{R} = \frac{\rho}{R},$$

де  $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$  називається **характеристичним** або **хвильовим** опором резонансного контуру,  $d = \frac{1}{Q}$ .

Явище резонансу широко використовують у різноманітних телерадіотехнічних системах, а також для компенсації реактивних складових струмів чи напруг, тобто для підвищення коефіцієнта потужності.

## 6.2. ХІД РОБОТИ

1. З'єднати прилади згідно схеми зображеної на рис. 6.8.

2. За допомогою електровимірювальних приладів, при зовнішньому огляді електричного кола та його елементів, знайти пошкодження, введені в електричну схему, усунути їх за допомогою електропаяльника, електромонтажного інструмента чи заміни окремих елементів.

3. Провести вимірювання напруги, струму, потужності для таких випадків паралельного з'єднання опорів:

а) двох активних;

- б) активного та індуктивного;  
 в) активного та ємнісного;  
 г) індуктивного та ємнісного  $b_L > b_C$   
 д) індуктивного та ємнісного  $b_L < b_C$   
 е) резонансу струмів  $b_L = b_C$

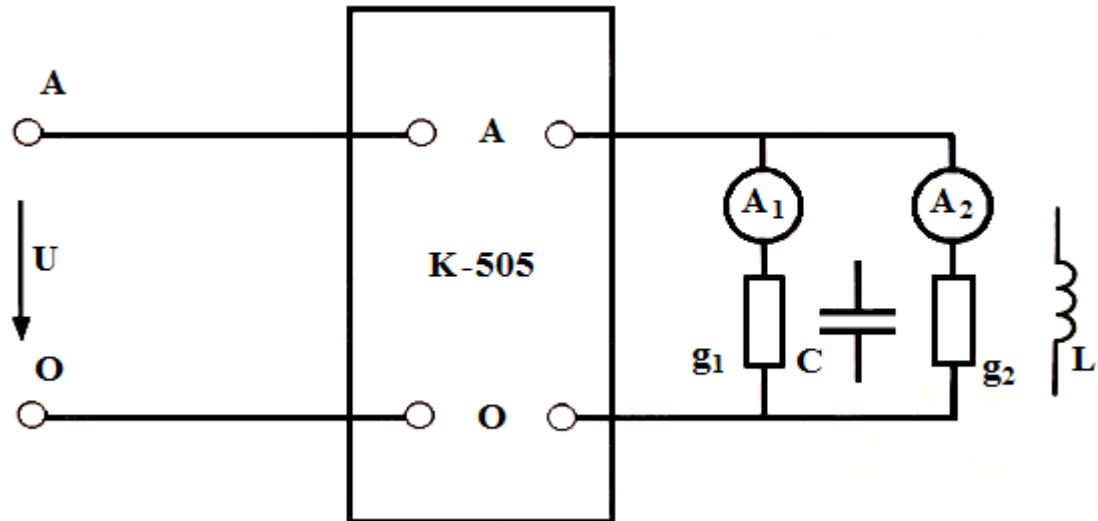


Рис. 6.8. Схема експериментальної установки

Досліди провести з усіма видами навантаження, що вказані в табл. 6.1.

За вимірними величин обчислити такі параметри:

$$R = \frac{P}{I^2}, Z = \frac{U}{I}, g = \frac{R}{Z^2}, b = \frac{x}{Z^2},$$

$$y = \sqrt{g^2 + b^2}, I_a = Ug, I_p = Ub.$$

4. Результати вимірювань та обчислень записати в табл. 6.1, Для всіх випадків побудувати векторні діаграми, дотримуючись масштабів.

### ПРИМІТКА

1. Дані першого досліду використати для перевірки показів вимірювальних приладів.

2. Резонанс досягається зміною індуктивності котушки. Момент резонансу струму настає тоді, коли загальний струм буде мати найменшу величину, а покази фазометра досягнуть значення близького до нуля (в ідеальному випадку 0).

### **6.3. ПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ**

1. Активна, реактивна та повна провідності.
2. Перехід від опорів вітки до провідностей і навпаки для випадку активно-ємнісного та активно-індуктивного навантаження.
3. Паралельне з'єднання активно-індуктивних опорів. Повна провідність і опір. Векторна діаграма.
4. Паралельне з'єднання активно-ємнісних опорів. Повна провідність та опір. Векторна діаграма.
5. Паралельне з'єднання активного та індуктивного опорів. Повна провідність та опір. Векторна діаграма.
6. Резонанс струмів. Резонансні криві.
7. Векторна діаграма для випадку резонансу при паралельному з'єднанні активного, ємнісного та індуктивного опорів. Умова резонансу та його практичні ознаки.
8. Векторна діаграма для випадку резонансу при паралельному з'єднанні активно-індуктивного та активно-ємнісного опорів.
9. Змішане з'єднання опорів різного характеру.
10. Повна провідність та повний опір при паралельному з'єднанні опорів різного характеру.

### **6.4. РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА**

1. Будіщев М.С. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка. Львів: Афіша, 2001. 424 с. С. 36-62.
2. Вартабедян В.А. Загальна електротехніка. К.: Вища школа, 1986. 359 с. С. 32-40.
3. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка: електричні кола: навчальний посібник для студентів не електротехнічних спеціальностей усіх форм навчання / О. В. Колот [та ін.]. Краматорськ: ДДМА 2012. 124 с. С. 37-74.
4. Касаткін А.С. Электротехника. М.: Энергия, 1969. 592 с. С. 145-151.
5. Матвійчук А.Я., Стінянський В.Л. Електротехніка: навчально-методичний посібник. Вінницький державний педагогічний університет ім. М. Коцюбинського. Вінниця. 2017. 270 с. С. 52-66.

## Результати лабораторних вимірювань та обчислень

[illegible]

## Лабораторна робота № 7

### ТРИФАЗНЕ КОЛО ЗМІННОГО СТРУМУ ПРИ З'ЄДНАННІ СПОЖИВАЧІВ ЗІРКОЮ

**Мета:** дослідити з'єднання споживачів зіркою при різних режимах навантаження. Перевірити співвідношення між лінійними та фазними величинами струмів і напруг при з'єднанні споживачів зіркою для рівномірного та нерівномірного навантажень. Дослідити перерозподіл напруг і струмів при обриві лінійного, фазного та нульового проводів.

**Прилади та обладнання:** реостати, амперметри, вольтметри, трифазний трансформатор, вимірювальний комплект К-505.

#### 7.1. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Багатофазним колом змінного струму називають сукупність кількох однофазних кіл у яких діють електрорушійні сили однакової частоти та зсунуті за фазою одна відносно одної.

Таке об'єднання в одне коло подібних за структурою електричних кіл синусоїдного струму з незалежними джерелами енергії однакової частоти широко застосовують в електротехніці. Об'єднувані кола синусоїдного струму називають фазами, а цілу об'єднану систему – багатофазною системою. Таким чином, в електротехніці слово «фаза» використовується у двох різних поняттях. Фазою є параметр періодичного синусоїдного коливального процесу, а друге поняття – це назва складової частини багатофазної системи кіл синусоїдного струму, або електричних машин чи трансформаторів (однофазний трансформатор, трифазний асинхронний двигун тощо).

Якщо кількість фаз обмоток багатофазної системи є три, тоді її називають *трифазною*.

Трифазну систему електрорушійних сил (ЕРС) (або струмів) називають *симетричною*, якщо всі ЕРС (або струми) однакові за величиною і кожна ЕРС (або струм) відстає, (або випереджає) за фазою від попередньої ЕРС (або струму) на однаковий кут (рис. 7.1). Коли не задовольняються ці умови, то така система ЕРС (або струмів) є *несиметричною* [2].

Трифазне електричне коло називається незв'язаним, якщо однофазні кола, які утворюють цю систему, не з'єднані електрично між собою. Якщо ж однофазні кола електрично з'єднані, то трифазне коло називають зв'язаним.

Трифазні кола, в яких загальні опори (опори споживачів) усіх фаз однакові, називають **симетричними**, якщо вони неоднакові, то трифазні кола **несиметричні** [2].

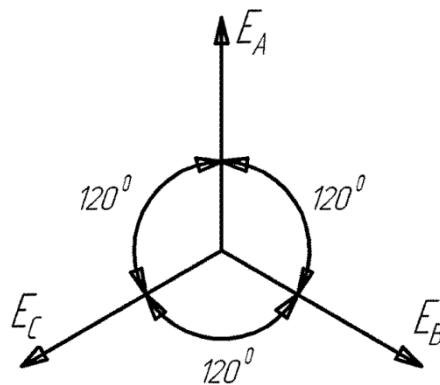


Рис. 7.1. Векторна діаграма симетричних ЕРС

Кожна фаза трифазного кола має два виводи, один із них – початок, а другий – кінець.

При з'єднанні споживачів електричної енергії **зіркою** всі кінці фаз з'єднують в одну точку, яку називають нульовою, а до початків приєднують лінійні проводи. Струми окремих фаз можуть бути різні, залежно від навантаження. При активному навантаженні фазні напруги та струми збігаються за фазою [10].

Фазні напруги окремих фаз зсунуті між собою на кут  $120^\circ$ . Лінійні напруги випереджують фазні на кут  $30^\circ$  і рівні їхній векторній різниці.

Розглянемо з'єднання генератора, зібраного за схемою зірка, з навантаженням, включеним зіркою (рис. 7.2).

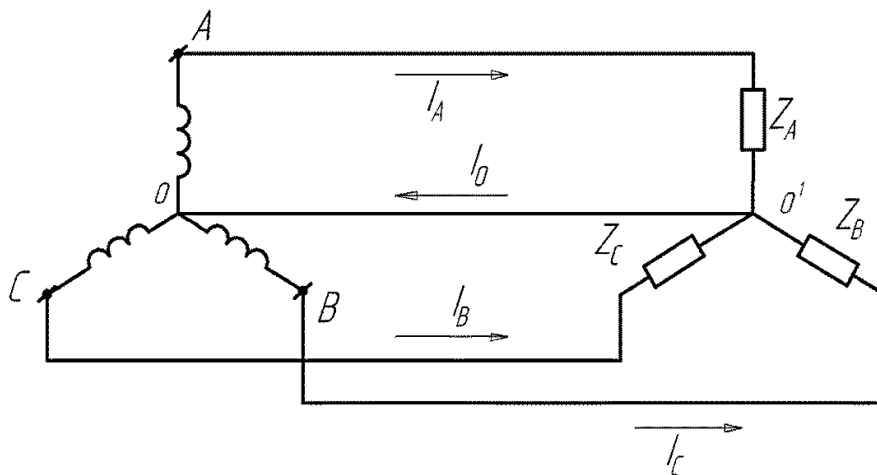


Рис. 7.2. Схема трифазного електричного кола з нульовим проводом

Провід  $OO_1$  називається нульовим або нейтральним. Відповідно до першого закону Кірхгофа вектор струму в нульовому проводі:

$$\bar{I}_0 = \bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C.$$

При симетричному навантаженні, коли повні опори  $Z_A = Z_B = Z_C$  рівні між собою і мають однаковий характер, вектори струмів  $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$ , рівні за абсолютним значенням та утворюють трипроменеву зірку, в якій кути між променями дорівнюють  $120^\circ$ . З геометричної побудови, показаної на рис. 7.3 випливає, що в цьому випадку векторна сума струмів дорівнює нулю:

$$\bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C = 0.$$

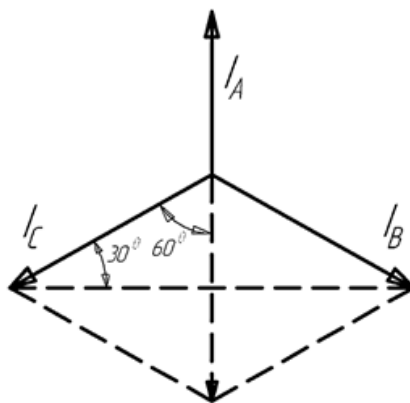


Рис. 7.3. Векторна діаграма струмів у трифазному колі при симетричному навантаженні

Таким чином, при симетричному навантаженні нейтральний провід не потрібен. Отримуємо схему трифазного кола, яка зображена на рис. 7.4.

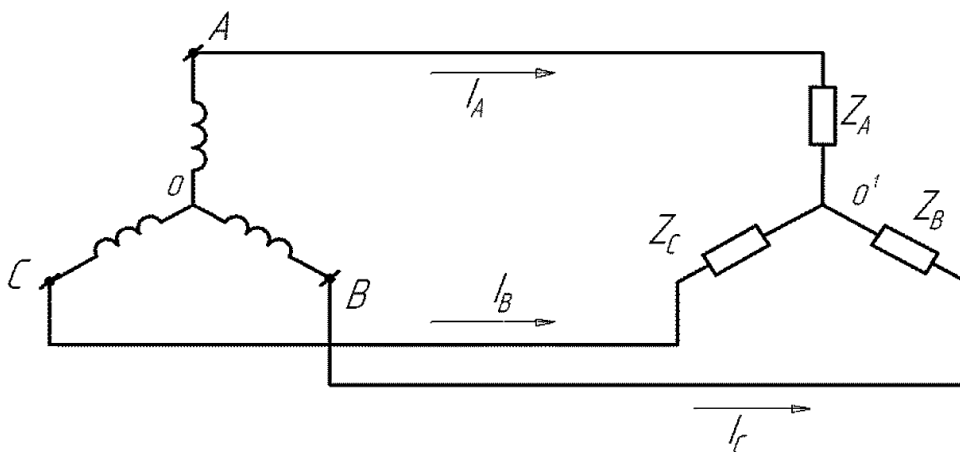


Рис. 7.4. Схема трифазного трипроводного кола

Система ЕРС обмоток трифазного генератора, який працює в енергосистемі, завжди симетрична: ЕРС підтримуються сталими по амплітуді і

зсунутими по фазі на  $120^\circ$  [11].

Розглянемо схему симетричного навантаження (рис. 7.5) для котрої:

$$Z_A = Z_B = Z_C, \quad \varphi_A = \varphi_B = \varphi_C.$$

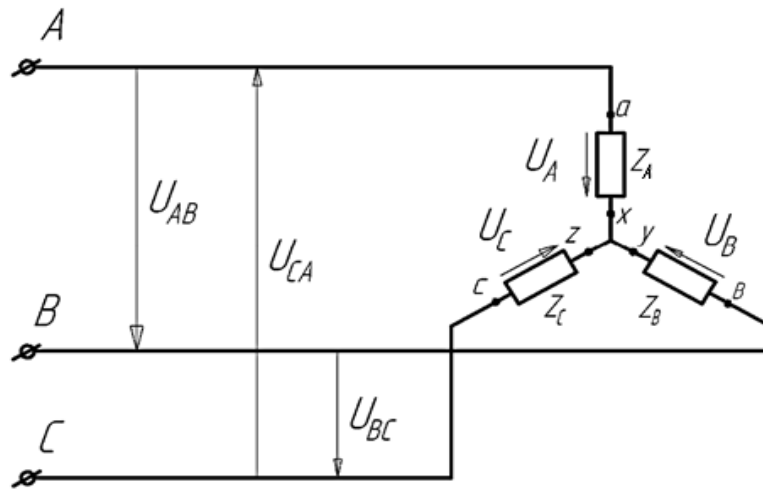


Рис. 7.5. З'єднання симетричного навантаження зіркою

До затискачів  $A$ ,  $B$ ,  $C$  підходять дроти лінії електропередачі – лінійні дроти. Введемо позначення:  $I_l$  – лінійний струм у проводах електропередач;  $I_\phi$  – фазний струм, струм в опорах (фазах) навантаження;  $U_l$  – лінійна напруга між лінійними проводами;  $U_\phi$  – фазна напруга на фазах навантаження. У розглянутій схемі лінійні та фазні струми збігаються:  $I_l = I_\phi$ . Напруги  $U_{AB}$ ,  $U_{BC}$ ,  $U_{CA}$  є лінійними, а напруги  $U_A$ ,  $U_B$ ,  $U_C$  – фазними.

Встановимо співвідношення між лінійними та фазними напругами при з'єднанні зіркою. Оскільки кінець першої фази  $X$  з'єднаний не з початком другої фази, а з її кінцем  $Y$ , то значення лінійної напруги  $U_{AB}$  між проводами  $A$  і  $B$  відповідно до другого закону Кірхгофа дорівнюватиме різниці відповідних фазних напруг, тобто [11]:

$$\bar{U}_{AB} = \bar{U}_A + \bar{U}_B.$$

Аналогічно значення інших ліній:

$$\bar{U}_{BC} = \bar{U}_B + \bar{U}_C,$$

$$\bar{U}_{CA} = \bar{U}_C + \bar{U}_A.$$

Векторну діаграму, що відповідає цим рівнянням (рис. 7.6), починаємо будувати із зображення зірки фазних напруг  $U_A$ ,  $U_B$ ,  $U_C$ . Потім будуємо вектор  $U_{AB}$  – як геометричну суму векторів  $U_A$  та  $-U_B$ , вектор  $U_{BC}$  – як геометричну суму  $U_B$  та  $-U_C$ , вектор  $U_{CA}$  – як геометричну суму векторів  $U_C$  та  $-U_A$ .

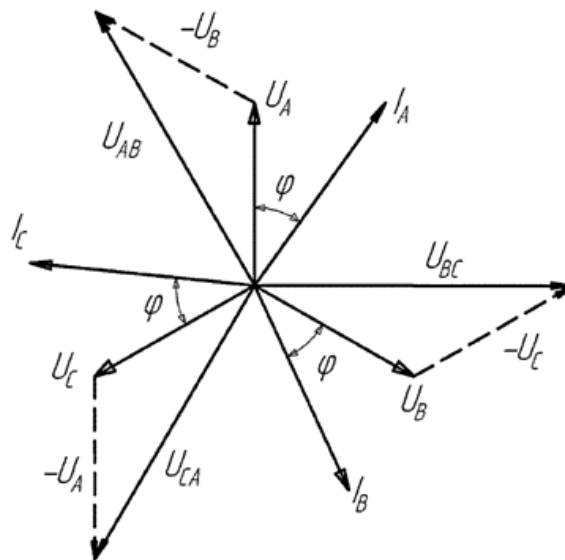


Рис. 7.6. Полярна векторна діаграма напруг

Щоб картина була максимально повною, на векторній діаграмі зображено вектори струмів, які відстають на кут  $\varphi$  від векторів відповідних фазних напруг (навантаження вважаємо індуктивним).

На побудованій векторній діаграмі початки всіх векторів суміщені в одній точці (полюсі), тому її називають полярною. Рівняння, яке пов'язує вектори лінійних і фазних напруг, задовольнятиме також векторна діаграма приведена на рис. 7.7, яку називають топографічною [12].

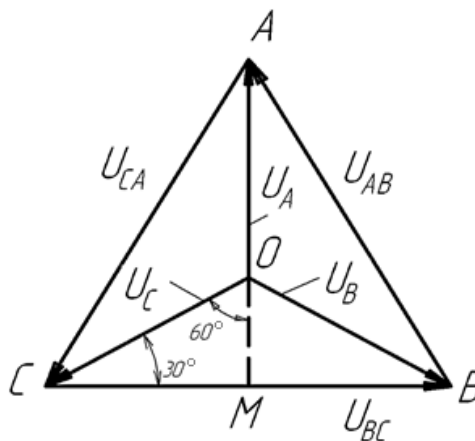


Рис. 7.7. Топографічна векторна діаграма фазних і лінійних напруг при симетричному навантаженні

Якщо навантаження симетричне, то модулі векторів фазних напруг рівні між собою:  $U_A = U_B = U_C = U_\phi$ , модулі лінійних напруг є рівними між собою:  $U_{AB} = U_{BC} = U_{CA}$ .

У трикутнику  $COB$  проведемо перпендикуляр  $OM$  до сторони  $CB$ . Тоді, з прямокутного трикутника  $CMO$  знаходимо катет  $CM$ :

$$\frac{1}{2}U_{\text{л}} = U_{\phi} \cos 30^{\circ} = U_{\phi} \frac{\sqrt{3}}{2},$$

звідки

$$U_{\text{л}} = \sqrt{3}U_{\phi}.$$

У симетричній зірці фазні та лінійні напруги пов'язані співвідношеннями:

$$I_{\text{л}} = I_{\phi},$$

$$U_{\text{л}} = \sqrt{3}U_{\phi}.$$

Струм у нульовому проводі дорівнює нулю при строго симетричному навантаженні. Якщо навантаження несиметрична, тобто  $Z_A \neq Z_B \neq Z_C$ , то нерівними будуть і струми  $I_A \neq I_B \neq I_C$ . Тоді на основі побудови, аналогічної до наведеної на рис. 7.6, неважко переконатися, що при симетрії фазних напруг струм у нульовому проводі не дорівнює нулю  $I_0 \neq 0$ . Уявімо собі, що нульовий провід обірвався:  $I_0 = 0$ . При цьому струми  $I_A, I_B, I_C$  повинні змінитися так, щоб їх векторна сума дорівнювала нулю [12]:

$$I_A + I_B + I_C = 0.$$

Але при заданих опорах навантаження  $Z_A, Z_B, Z_C$  струми можуть змінитися тільки за рахунок зміни фазних напруг. Отже, обрив нульового проводу призводить до зміни фазних напруг, симетричні фазні напруги стають несиметричними [13].

Розглянемо топографічну векторну діаграму, представлену на рис. 7.8.

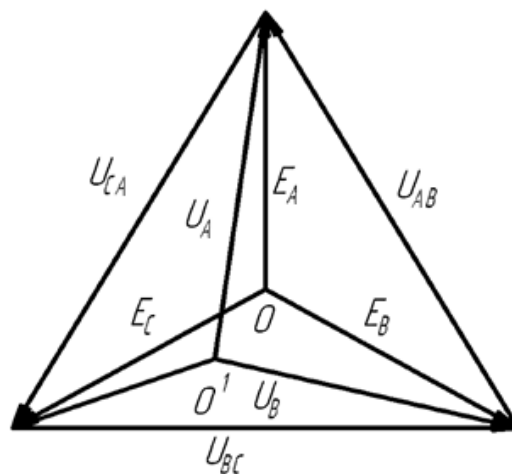


Рис. 7.8. Топографічна векторна діаграма ЕРС і напруг трифазного кола при відсутності нульового проводу

Для спрощення знехтуємо спадом напруги всередині обмоток генератора та проводах лінії і будемо вважати, що напруги на навантаженні рівні ЕРС генератора.

При несиметричному навантаженні і відсутності нульового проводу фазні напруги  $U_A$ ,  $U_B$ ,  $U_C$  будуть різними і точка  $O_1$  займе на векторній діаграмі положення, відмінне від точки  $O$ .

Введемо нульовий провід, як показано на рис. 7.2. При тому потенціали точок  $O$  та  $O_1$  виявляться однаковими. Це означає, що точки  $O$  і  $O_1$  на топографічній діаграмі рис. 7.8 повинні співпадати.

Точка  $O$  на топографічній діаграмі не може змінювати свого положення, оскільки симетрія ЕРС  $E_A$ ,  $E_B$ ,  $E_C$  забезпечується конструкцією генератора. Отже точка  $O_1$  перейде в точку  $O$ , тобто фазні напруги на навантаженні стануть симетричними.

Таким чином, нульовий провід в колі призначений для забезпечення симетрії фазних напруг при несиметричному навантаженні [13].

Несиметрія фазних напруг неприпустима, оскільки призводить до порушення нормальної роботи споживачів, розрахованих на певну робочу напругу.

## 7.2. ХІД РОБОТИ

1. З'єднати прилади згідно схеми, що зображена на рис. 7.9.

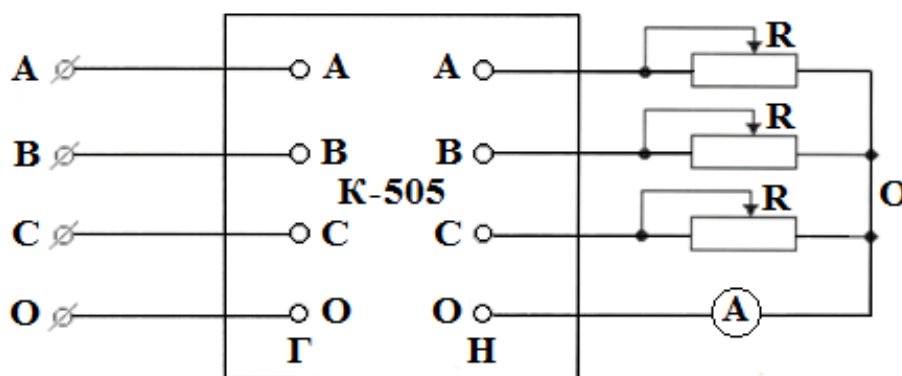


Рис. 7.9. Схема лабораторної установки

2. Виміряти відповідні значення електричних величин згідно табл. 7.1, при наявності та відсутності нульового проводу у таких випадках:

- а) симетричне навантаження;

- б) несиметричне навантаження;
  - в) обрив однієї фази;
  - г) обрив двох фаз;
3. Дані дослідів записати у табл. 7.1.
4. Побудувати векторні діаграми.

### 7.3. ПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

1. Поняття про багатофазні системи.
2. Отримання трифазної системи ЕРС.
3. Зв'язані та незв'язані, симетричні та несиметричні трифазні системи.
4. Які переваги трифазного змінного струму в порівнянні з однофазним?
5. Які напруги вважаються фазними, а які лінійними? Як їх виміряти?
5. Записати співвідношення між фазними та лінійними напругами і струмами при з'єднанні фаз зіркою?
6. Нарисувати векторну та хвильову діаграми напруг і струмів при з'єднанні фаз зіркою у випадку симетричного навантаження з нульовим (без нульового) проводу.
7. Нарисувати векторну та хвильову діаграми напруг і струмів при з'єднанні фаз зіркою у випадку несиметричного навантаження з нульовим (без нульового) проводом.
8. Як впливає обрив фази на перерозподіл напруг і струмів при з'єднанні споживачів зіркою при симетричному навантаженні?
9. Як впливає обрив фази на перерозподіл напруг і струмів при з'єднанні споживачів зіркою при несиметричному навантаженні?
10. Якою є сума лінійних струмів в кожний момент часу при рівномірному та нерівномірному навантаженні фаз, з'єднаних зіркою з нульовим проводом і як її знайти?
11. Яка система називається чотирипровідною та в яких випадках вона використовується? Яка роль нульового проводу?
12. Чому не ставлять запобіжники в нульовий провід?
13. Знайти графічну та аналітичну величину струму в нульовому проводі у випадку обриву одного лінійного проводу, якщо до цього навантаження було симетричним.

#### **7.4. РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА**

1. Вартабедян В.А. Загальна електротехніка. К.: Вища школа. 1986. 359 с. С. 48-58.
2. Будіщев М.С. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка. Львів: «Афіша», 2001. 424 с. С. 65-88.
3. Касаткин А.С. Электротехника. М.: Энергия. 1969. 592 с. С. 170-173.
4. Павловський Ю.В. Електротехніка та електроніка: розрахунок електричних кіл змінного струму [навчально-методичний посібник для самостійної роботи студентів]. Дрогобич: РВВ ДДПУ ім. І. Франка, 2020. 130 с. С. 35-44.

Таблиця 7.1

## Результати лабораторних вимірювань та обчислень

[illegible]

## Лабораторна робота № 8

### ТРИФАЗНЕ КОЛО ЗМІННОГО СТРУМУ ПРИ З'ЄДНАННІ СПОЖИВАЧІВ ТРИКУТНИКОМ

**Мета:** дослідити трифазне коло змінного струму при з'єднанні споживачів трикутником для різних видів навантаження. Визначити вплив обриву лінійного та фазного проводів на перерозподіл напруг і струмів у споживачі.

**Прилади та обладнання:** вимірювальний комплект К-505, реостати, амперметри, вольтметри.

#### 8.1. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

На практиці, щоб забезпечити незалежність режиму роботи окремих фаз, крім чотирипровідного електричного кола, застосовується трипровідне коло, з'єднання споживачів *трикутником*, в якому нейтральний провід відсутній (рис. 8.1).

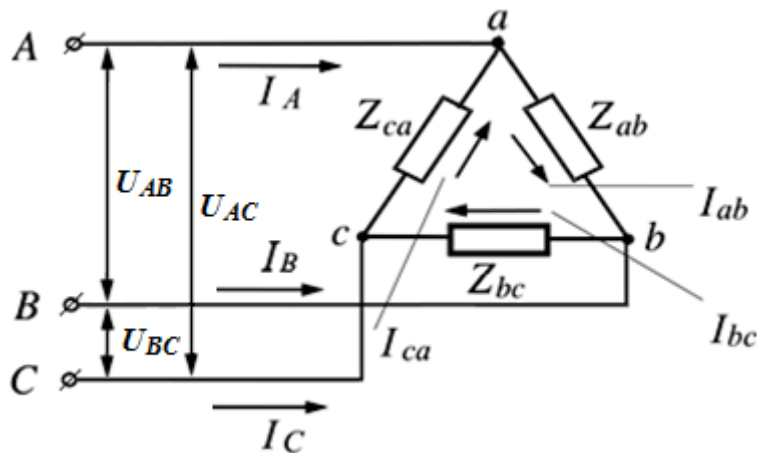


Рис. 8.1. Схема з'єднання споживачів трикутником

При цьому з'єднанні лінійні напруги дорівнюють фазним напругам ( $U_{\text{л}} = U_{\text{ф}}$ ) для симетричного та несиметричного режиму.

Для визначення лінійних струмів треба скласти рівняння за  $I$  законом Кірхгофа для вузлів  $a, b, c$  (рис. 8.1).

$$I_A = I_{ab} - I_{ca}; \quad I_B = I_{bc} - I_{ab}; \quad I_C = I_{ca} - I_{bc}.$$

Додавши праві та ліві частини наведених вище рівнянь, отримаємо:

$$I_A + I_B + I_C = 0,$$

тобто при побудові векторної діаграми лінійні струми утворюють замкнутий трикутник.

При симетричному навантаженні

$$Z_{ab} = Z_{bc} = Z_{ca};$$

$$\varphi_{ab} = \varphi_{bc} = \varphi_{ca}.$$

Отже

$$I_{ab} = I_{bc} = I_{ca}; I_A = I_B = I_C.$$

На основі всіх цих рівнянь будемо векторну діаграму струмів та напруги для симетричного навантаження фаз (рис. 8.2).

Діаграма побудована для суто активного навантаження у фазах, коли струм і напруга збігаються за напрямком, тобто кут зсуву фаз між ними дорівнює нулю ( $\varphi = 0$ ).

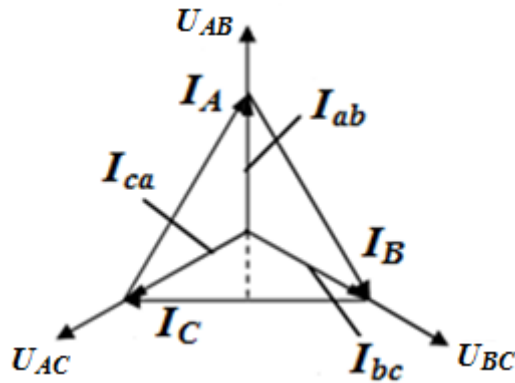


Рис. 8.2. Діаграму струмів і напруг

Розглянемо окремо трикутник струмів (рис. 8.3).

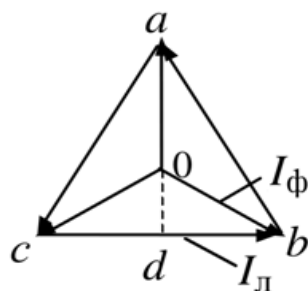


Рис. 8.3. Трикутник струмів

З трикутника  $odb$  можна записати

$$\frac{I_L}{2} = I_\phi \cos 30^\circ = I_\phi \frac{\sqrt{3}}{2}.$$

Таким чином, для симетричного навантаження

$$I_{\text{л}} = \sqrt{3}I_{\phi}; U_{\text{л}} = U_{\phi}.$$

При *несиметричному* навантаженні

$$Z_{ab} \neq Z_{bc} \neq Z_{ca}; \varphi_{ab} \neq \varphi_{bc} \neq \varphi_{ca}.$$

Для прикладу, на рис. 8.4 приведено побудову векторної діаграми сил струмів та напруг для випадку симетричного активно-індуктивного навантаження ( $\cos\varphi < 1$ ) [14].

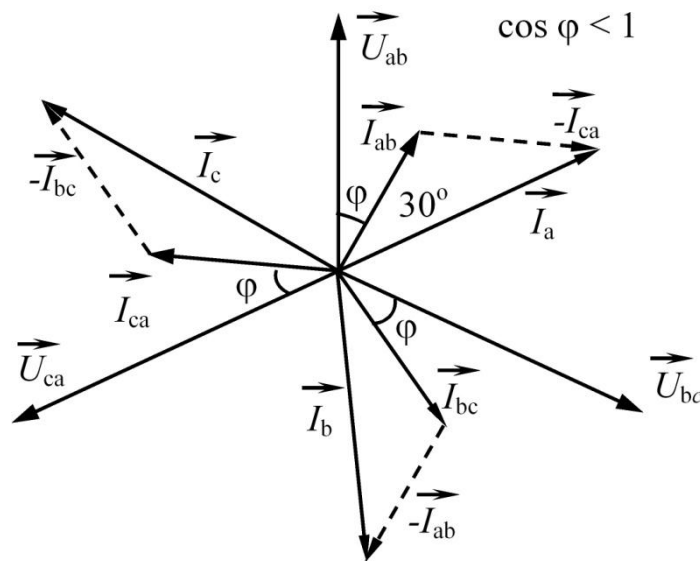


Рис. 8.4. Приклад векторної діаграма сил струмів та напруг для трифазного симетричного активно-індуктивного навантаження при з'єднанні споживачів трифазного струму «трикутником»

## 8.2. ХІД РОБОТИ

1. З'єднати прилади за схемою рис. 8.5.
2. Виміряти відповідні електричні величини згідно таблиці 1 при таких режимах роботи навантаження.
  - а) симетричне навантаження;
  - б) несиметричне навантаження;
  - в) обрив фази при рівномірному навантаженні;
  - г) обрив фази при нерівномірному навантаженні;
  - д) обрив двох фаз;
3. Дані дослідів записати в табл. 8.1.
4. Побудувати в масштабі векторні діаграми для кожного режиму навантаження.

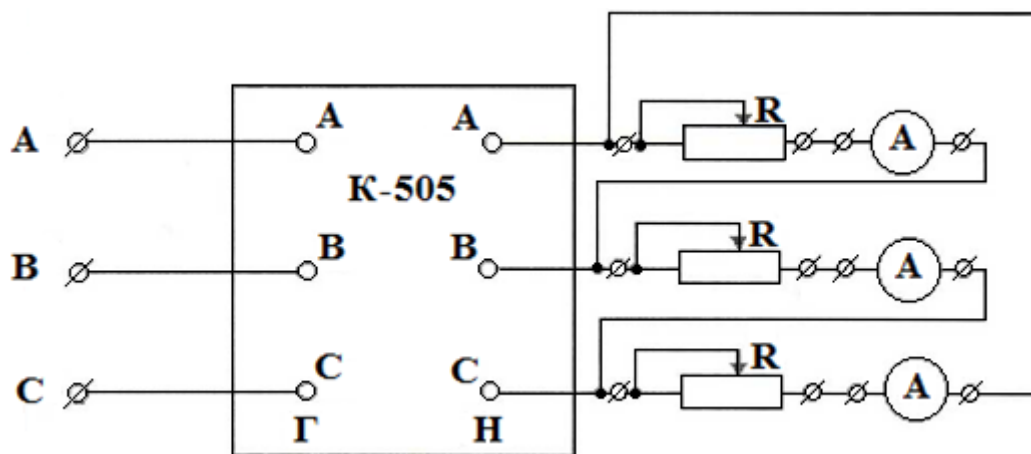


Рис. 8.5. Схема дослідної установки

### 8.3. ПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

1. Які струми називаються фазними, а які лінійними? Як вони вимірюються (показати на схемі)?
2. Які співвідношення між фазними та лінійними напругами, струмами при з'єднанні фаз трикутником?
3. Чому неправильне з'єднання обмоток генератора трикутником приводить до появи небезпечних струмів у ньому?
4. З'єднання трикутником при симетричному навантаженні.
5. З'єднання трикутником при несиметричному навантаженні.
6. Обрив фази при з'єднанні трикутником.
7. Нарисувати векторну та хвильову діаграми напруг і струмів при з'єднанні трикутником?
8. Трифазна трипровідна мережа, що має лінійну напругу, навантажена симетрично опорами, які з'єднані за схемою зірки. Як зміняться лінійні струми та споживана потужність від цієї мережі, коли згадані опори перемкнуті за схемою трикутника?
9. Як побудувати векторну діаграму для будь-якого навантаження з'єданого трикутником?
10. Захисні заземлення та занулення у трифазних колах.

### 8.4. РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Вартабедян В.А. Загальна електротехніка. К.: Вища школа. 1986. 359 с. С. 48-58.
2. Будіщев М.С. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка.

Львів: «Афіша», 2001. 424 с. С. 65-88.

3. Касаткин А.С. Электротехника. М.: Энергия. 1969. 592 с. С. 170-173.

4. Павловський Ю.В. Електротехніка та електроніка: розрахунок електричних кіл змінного струму [навчально-методичний посібник для самостійної роботи студентів]. Дрогобич: РВВ ДДПУ ім. І. Франка, 2020. 130 с. С. 35-41.

Таблиця 8.1

## Результати лабораторних вимірювань та обчислень

[illegible]

## Лабораторна робота № 9

### ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

**Мета роботи:** експериментальне дослідження робочих властивостей однофазного трансформатора та вимірювання його основних параметрів: коефіцієнта трансформації та коефіцієнта корисної дії залежно від навантаження.

**Прилади та обладнання:** однофазний трансформатор, джерело змінного струму, вимірювальні прилади, реостат, ключ.

#### 9.1. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

##### Принцип роботи трансформатора

**Трансформатором** називають статичний електромагнітний пристрій, який призначений для перетворення електричної енергії змінного струму з одними параметрами в електричну енергію з іншими параметрами. Трансформатори дозволяють передавати потужність від джерела до приймача при різних напругах і струмах [4].

Трансформатор складається із замкнутого осердя, на якому розташовані обмотки первинної та вторинної напруги. Трансформатор зазвичай має одну первинну та одну або кілька вторинних обмоток. Розглянемо трансформатор з однією вторинною обмоткою (рис. 9.1).

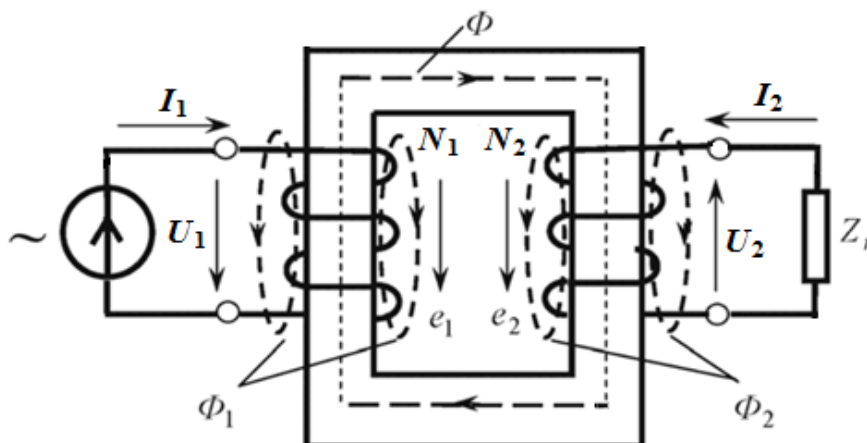


Рис. 9.1. Схема трансформатора з однією вторинною обмоткою  
( $N_1$ ,  $N_2$  – кількість витків первинної та вторинної обмоток)

На первинну обмотку прикладається змінна напруга  $U_1$ , під дією якої в первинній обмотці тече струм  $I_1$ . Добуток  $I_1 N_1$  є намагнічуючою силою первинної обмотки, яка визначає величину магнітного потоку  $\Phi_1$ . Цей потік, зчеплений з двома обмотками трансформатора, індукує в них ЕРС, миттєві значення якої будуть [15]:

$$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi_1}{dt}, \quad e_2 = -N_2 \frac{d\Phi_1}{dt}.$$

ЕРС  $e_1$  частково компенсує прикладену напругу  $U_1$ ,  $e_2$  створює напругу  $U_2$  на контактах вторинної обмотки. При замиканні вторинної обмотки на навантаження з опором  $Z_n$ , по ній протікає струм  $I_2$ . Намагнічуюча сила  $I_2 N_2$  збуджує змінний магнітний потік  $\Phi_2$ , який напрямлений назустріч магнітному потоку  $\Phi_1$  (розмагнічує його). Таким чином, під навантаженням у магнітопроводі протікає результуючий магнітний потік

$$\overline{\Phi} = \overline{\Phi_1} + \overline{\Phi_2}.$$

Оскільки магнітний потік  $\Phi_2$  напрямлений назустріч, то загальний магнітний потік  $\Phi$  зменшується. Це викликає зменшення ЕРС  $e_1$  та збільшення струму  $I_1$  за рахунок різниці сили струму живлення та ЕРС  $e_1$ . Збільшення струму призводить до компенсації зміни загального магнітного потоку та, відповідно, підтримки струму  $i_1$ . Таким чином, встановлюється новий робочий режим.

У трансформаторі, який працює під навантаженням, ЕРС первинної та вторинної обмотки індукуються сумарним магнітним потоком [16]:

$$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt}; \quad e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt},$$

а їх діючі значення рівні

$$E_1 = 4,44 f N_1 \Phi_m; \quad E_2 = 4,44 f N_2 \Phi_m,$$

де  $\Phi_m$  – амплітудне значення магнітного потоку.

Напругу на вході трансформатора можна знайти застосувавши до обмоток трансформатора закон Ома для ділянки з ЕРС:

$$U_1 = R_1 I_1 - E_1 = R_1 I_1 + \frac{d\Phi}{dt} N_1,$$

а напругу на виході трансформатора:

$$U_2 = R_2 I_2 - E_2 = R_2 I_2 + \frac{d\Phi}{dt} N_2,$$

де  $R_1$  та  $R_2$  – опори первинної та вторинної обмоток трансформатора відповідно.

Величина

$$k_{12} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{E_1}{E_2},$$

називається **коефіцієнтом трансформації** і визначається відношенням електрорушійної сили первинної і вторинної обмоток.

При номінальному навантаженні потужного трансформатора його ККД дуже великий, приблизно 99%. Він суттєво зменшується лише при малих навантаженнях, або в малопотужних трансформаторах. Це дає можливість у першому наближенні вважати однаковими первинну та вторинну повні потужності навантаженого трансформатора [16]:

$$S_1 = U_1 I_1 \approx S_2 = U_2 I_2,$$

тому відношення струмів навантаженого трансформатора можна вважати оберненим відношенням напруг та, відповідно, і числу витків відповідних обмоток:

$$\frac{I_2}{I_1} \approx \frac{U_1}{U_2} \approx \frac{N_1}{N_2} = k_{12}. \quad (9.1)$$

### Режими роботи трансформатора

Всі трансформатори досліджують у **режимі холостого ходу** (XX) (рис. 9.2).

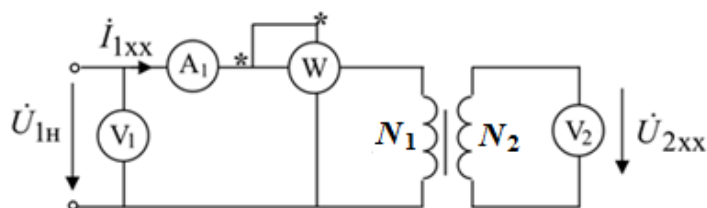


Рис. 9.2. Схема режиму холостого ходу трансформатора

При такому режимі первинна обмотка включається на напругу мережі  $U_{1н}$ , а вторинна обмотка розмикається. Вимірювальні прилади реєструють, що в первинній обмотці є невеликий струм холостого ходу  $I_{1xx} = (3 \div 10)\%$  від  $I_{1н}$ , і трансформатор споживає від мережі електроенергію, потужність якої (відносно невелика) **називають втратами XX**  $P_{xx}$ . Ця потужність вимірюється ватметром і визначається основною втратами в магнітопроводі  $P_{ст}$  трансформатора. Потужність втрат у магнітопроводі пропорційна  $\Phi^2$ , а

оскільки діюче значення ЕРС  $E_{1xx}$  пропорційне  $\Phi$ , то  $P_{xx}$  пропорційна  $U_{1н}^2$ . Втрати в обмотках трансформатора (електричні  $P_{ел}$ ) в досліді ХХ незначні через мале значення струму  $I_{1xx}$ . З досліді ХХ можна знайти повний опір трансформатора та коефіцієнт потужності [17]

$$Z_0 = \frac{U_{1н}}{I_{1xx}}; \cos\varphi_{xx} = \frac{P_{xx}}{U_{1н} I_{1xx}}, \quad (9.2)$$

де  $\varphi_{xx}$  – зсув фаз між  $U_{1н}$  та  $I_{1xx}$ .

Вимірявши вольтметром первинну  $U_{1н}$  та вторинну  $U_{2xx}$  напруги коефіцієнт трансформації можна визначити з великою точністю [17]

$$k_{12} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \approx \frac{U_{1н}}{U_{2xx}}. \quad (9.3)$$

Цей коефіцієнт вказують на щитках трансформаторів у вигляді відношення номінальних напруг трансформатора в режимі ХХ, наприклад «6000/230» (як відношення вищої напруги до нижчої).

Треба розрізняти **режим короткого замикання** (КЗ) в експлуатаційних умовах і дослід короткого замикання. Перший – це аварійний режим трансформатора, коли КЗ відбувається при номінальній первинній напрузі. При цьому струми в обмотках можуть в десятки разів перевищити свої номінальні значення, що приведе до механічного та теплового руйнування активних частин трансформатора.

У досліді КЗ вторинну обмотку замикають на коротко (рис. 9.3), а до первинної обмотки підводиться така понижена напруга  $U_{1к}$ , при якій струми в обмотках дорівнюють номінальним  $I_{1н}$  та  $I_{2н}$  [18].

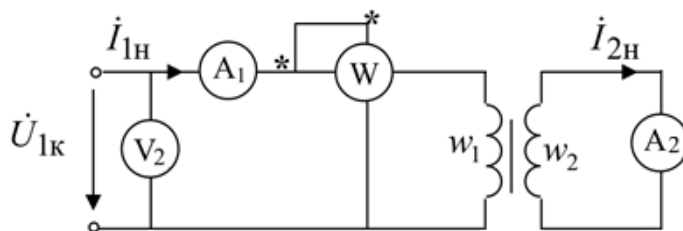


Рис. 9.3. Схема досліді короткого замикання трансформатора

Відносне значення цієї напруги, яке називають напругою КЗ, становить

$$u_k = \frac{U_{1к}}{U_{1н}} \cdot 100\% = (5 \div 10)\% U_{1н}.$$

Ця напруга є одним з паспортних параметрів трансформатора та

використовується для визначення ряду експлуатаційних характеристик. У досліді КЗ активна потужність  $P_k$ , виміряна ватметром є потужністю електричних втрат  $P_{ел}$  в обмотках. У цьому досліді втрати в магнітопроводі  $P_{ст}$  незначні і становлять  $(0,05 \div 0,1)$  від втрат при номінальному режимі через понижено напругу  $U_{1к}$  і, відповідно, нехтуючи малого основного магнітного потоку  $\Phi$ . Потужність втрат при КЗ і номінальних струмах

$$P_k = R_1 I_{1н}^2 + R_2 I_{2н}^2.$$

Коли до кінців вторинної обмотки підключити навантаження, то у вторинному колі виникає змінний струм. Якщо знехтувати втратами, то потужність струму у вторинному і первинному колах буде однаковою. Тому збільшення напруги на виході підвищувального трансформатора в  $k$  разів супроводжується зменшенням сили струму у вторинній обмотці в  $k$  разів [18].

Потужність  $P$ , яка передається трансформатором (без урахування втрат) можна представити у вигляді

$$P = U_2 I_2 = \frac{U_2^2}{R_2} = \frac{\left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 U_1^2}{R_2}.$$

Коефіцієнт потужності для первинної обмотки

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{I_1 U_1}, \quad (9.4)$$

для вторинної

$$\cos \varphi_2 = \frac{P_2}{I_2 U_2}. \quad (9.5)$$

Коефіцієнт корисної дії трансформатора без врахування втрат

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\% = \frac{I_2 U_2}{I_1 U_1} \cdot 100\%, \quad (9.6)$$

де  $P_1$  і  $P_2$  – відповідно потужності первинної та вторинної обмоток трансформатора.

### Втрати енергії та ККД трансформатора

Перетворення напруг і струмів трансформатором супроводжується втратами енергії: магнітними (втратами в сталі магнітопроводу на гістерезис та вихрові струми)  $P_{ст}$  і електричними  $P_{ел}$  (втрати на нагрів в обмотках) [19].

Магнітні втрати визначаються величиною та частотою магнітного потоку та не залежать від величини і характеру навантаження:  $P_{ст} = \text{const} \approx P_{xx}$ .

Електричні втрати в обмотках  $P_{ел}$  пропорційні квадрату струму, і їх можна виразити через потужність втрат КЗ  $P_{\kappa} = R_{\kappa} I_{1H}^2$ :

$$P_{ел} = R_{\kappa} I_1^2 = R_{\kappa} \frac{I_{1H}^2}{I_{1H}^2} I_1^2 = \beta^2 P_{\kappa}.$$

Хоч робота трансформатора полягає в передачі повної потужності, його ККД визначають за величиною активної потужності, яка передається та втратами енергії [19]:

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P_2}{P_2 + P_{ел} + P_{ст}} = \frac{U_2 I_2 \cos \varphi_2}{U_2 I_2 \cos \varphi_2 + P_{ел} + P_{ст}} = \\ &= \frac{U_2 \left( \frac{I_2}{I_{H2}} \right) I_{H2} \cos \varphi_2}{U_2 \left( \frac{I_2}{I_{H2}} \right) I_{H2} \cos \varphi_2 + \beta^2 P_{\kappa} + P_{ст}} = \frac{\beta S_H \cos \varphi_2}{\beta S_H \cos \varphi_2 + \beta^2 P_{\kappa} + P_{xx}}, \end{aligned}$$

де  $S_H = U_2 I_{H2}$  – номінальна повна потужність. Знайдемо екстремум даної функції від аргументу – коефіцієнта навантаження  $\beta$ . Для цього прирівняємо до нуля похідну  $\frac{d\eta}{d\beta}$ :

$$\frac{d\eta}{d\beta} = \frac{S_H \cos \varphi_2 (\beta S_H \cos \varphi_2 + \beta^2 P_{\kappa} + P_{xx}) - \beta S_H \cos \varphi_2 (S_H \cos \varphi_2 + 2\beta P_{\kappa})}{(\beta S_H \cos \varphi_2 + \beta^2 P_{\kappa} + P_{xx})^2} = 0.$$

Цей вираз дорівнює нулю, якщо чисельник дорівнює нулю:

$$\beta S_H^2 \cos^2 \varphi_2 + S_H \cos \varphi_2 \beta^2 P_{\kappa} + S_H \cos \varphi_2 P_{xx} - \beta S_H^2 \cos^2 \varphi_2 - 2\beta^2 P_{\kappa} S_H \cos \varphi_2 = 0.$$

$$S_H \cos \varphi_2 P_{xx} - \beta^2 P_{\kappa} S_H \cos \varphi_2 = 0; S_H \cos \varphi_2 (P_{xx} - \beta^2 P_{\kappa}) = 0.$$

В кінцевому випадку  $P_{xx} = \beta^2 P_{\kappa}$ , звідки  $\beta = \sqrt{\frac{P_{xx}}{P_{\kappa}}}$ . Це означає, що

максимальний ККД буде при рівності змінних електричних втрат сталим магнітним втратам. При навантаженнях більших від номінальних непропорційно зростають змінні втрати, що призводить до зменшення коефіцієнта корисної дії.

Залежність магнітних і електричних втрат від коефіцієнта навантаження та залежність  $\eta(\beta)$  приведено на рис. 9.4. Зазвичай для трансформатора

$\frac{P_{xx}}{P_k} = 0,25 \div 0,5$  і  $\beta = 0,5 \div 0,7$ . Відповідно, найбільше значення ККД

трансформатора буде при струмі навантаження 50-70% від номінального. Максимальний ККД силових трансформаторів досягає 99,5%. Для виключення похибок (клас точності приладів) ККД визначають непрямым методом за дослідami XX та КЗ [19].

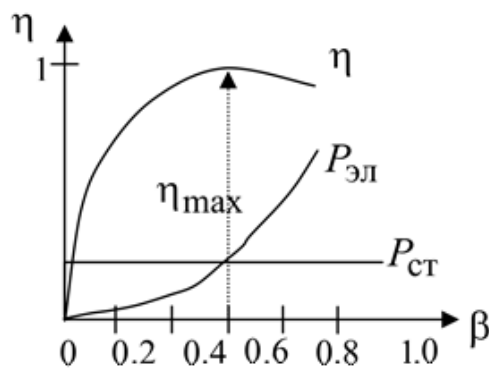


Рис. 9.4. Залежність магнітних і електричних втрат від коефіцієнта навантаження та залежність  $\eta(\beta)$

## 9.2. ХІД РОБОТИ

1. Вивчити будову та принцип дії трансформатора.
2. Зібрати дослідну схему для вивчення однофазного трансформатора відповідно до рис. 9.5.

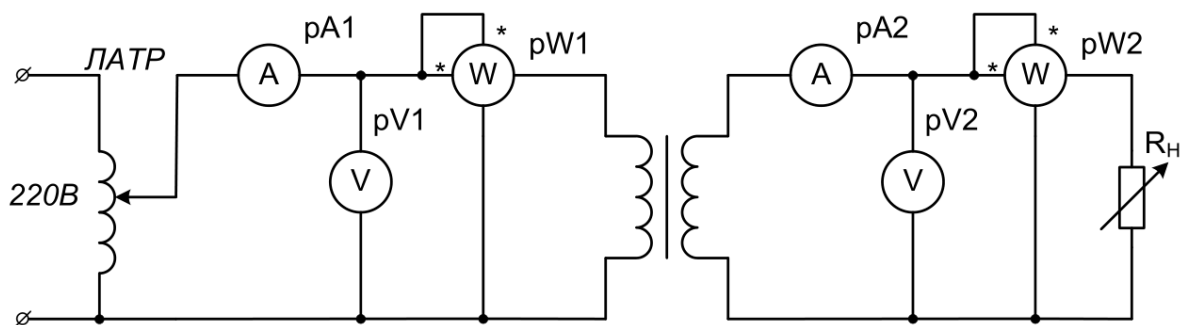


Рис. 9.5. Схема дослідної установки

3. Провести дослідження роботи трансформатора та визначити його параметри в режимі холостого ходу. Для цього, при розімкненій вторинній обмотці, за допомогою лабораторного автотрансформатора (ЛАТР) плавно збільшувати напругу первинної обмотки. Здійснити 3 виміри і записати покази приладів у табл. 9.1.

4. За формулами (9.3) і (9.2) розрахувати коефіцієнт трансформації та коефіцієнт потужності.

Таблиця 9.1

Результати вимірювань та обчислень

| Результати вимірювань |           |           | Результати обчислень |          |                    |
|-----------------------|-----------|-----------|----------------------|----------|--------------------|
| $U_{1xx}$             | $I_{1xx}$ | $U_{2xx}$ | $k_{12}$             | $P_{xx}$ | $\cos\varphi_{xx}$ |
|                       |           |           |                      |          |                    |
|                       |           |           |                      |          |                    |
|                       |           |           |                      |          |                    |

5. Дослідити роботу однофазного трансформатора при навантаженні. Для цього за допомогою реостата встановити в колі силу струму  $I_2 = 0,1 \text{ А}; 0,2 \text{ А}; 0,3 \text{ А}$ . Покази приладів записати в табл. 9.2.

6. Для кожного випадку виконати розрахунок потужності, яка споживаються первинною і вторинною обмотками, розрахувати ККД трансформатора та коефіцієнти потужності за формулами (9.4-9.6).

Таблиця 9.2

Результати вимірювань та обчислень

| Результати вимірювань |             |             |             | Результати обчислень |              |              |                 |                 |
|-----------------------|-------------|-------------|-------------|----------------------|--------------|--------------|-----------------|-----------------|
| $U_1,$<br>В           | $I_1,$<br>А | $U_2,$<br>В | $I_2,$<br>А | $P_1,$<br>Вт         | $P_2,$<br>Вт | $\eta,$<br>% | $\cos\varphi_1$ | $\cos\varphi_2$ |
|                       |             |             |             |                      |              |              |                 |                 |
|                       |             |             |             |                      |              |              |                 |                 |
|                       |             |             |             |                      |              |              |                 |                 |

### 9.3. ПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

1. Накреслити схему однофазного трансформатора.
2. Пояснити будову та принцип дії однофазного трансформатора.
3. Що називають коефіцієнт трансформації трансформатор?
4. Пояснити втрати потужності?
5. Як можна пояснити зростання струму в первинній обмотці трансформатора, при збільшенні струму навантаження?
6. Як визначити ККД трансформатора?

7. Як визначити коефіцієнт потужності трансформатора?

8. Пояснити залежність ККД та коефіцієнта потужності трансформатора від навантаження.

#### **9.4. РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА**

1. Матвійчук А.Я., Стінянський В.Л. Електротехніка: навчально-методичний посібник. Вінницький державний педагогічний університет ім. М. Коцюбинського. Вінниця, 2017. 270 с. С. 98-114.

2. Вартабедян В.А. Загальна електротехніка. 4-е вид. перероб. і доп. К.: Вища школа. 1986. 359 с. С. 94-105.

3. Павловський Ю.В. Електротехніка та електроніка: розрахунок електричних кіл змінного струму [навчально-методичний посібник для самостійної роботи студентів]. Дрогобич: РВВ ДДПУ ім. І. Франка, 2020. 130 с. С. 48-60.

4. Лабораторний практикум з електротехніки: [навчально-методичний посібник] / [автори-укладачі О. О. Лаврентьева, А. С. Солоха]. Кривий Ріг: КДПУ, 2017. 112 с. С. 39-42.

**Лабораторна робота № 10**  
**ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК**  
**ТРИФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА**

**Мета:** ознайомлення з конструкцією трифазного трансформатора та його характеристиками. Ввімкнення трьох однофазних трансформаторів у трифазну мережу. Визначення параметрів та коефіцієнта трансформації.

**Прилади та обладнання:** трифазний трансформатор, три однофазних трансформатори, тестер, вольтметри, вимірювальний комплект К-505.

### **10.1. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ**

Одним з основних пристроїв трифазної лінії передачі електричної енергії є трифазний трансформатор. Перетворення електричної енергії трифазного струму можна виконати *двома способами*:

- 1) за допомогою трьох однотипних однофазних трансформаторів;
- 2) за допомогою одного трифазного трансформатора.

Використання трифазних трансформаторів має цілий ряд переваг перед застосуванням трьох однофазних трансформаторів, наприклад, менша вартість, вищий ККД, менша вага на одиницю перетвореної енергії тощо.

Принцип дії трифазного трансформатора, як і однофазного ґрунтується на явищі електромагнітної індукції (Майкл Фарадей, 1831 р.), коли індуковані в вторинних обмотках синусоїдні ЕРС, так само, як і підведена напруга, будуть зсунуті одна відносно одної на  $1/3$  періоду або  $120^\circ$ .

Трифазні тристержневі трансформатори виготовляють середньої та малої потужності, а групу з трьох однофазних трансформаторів використовують при великих потужностях.

Обмотки трифазного трансформатора (первинні, вторинні) можуть бути з'єднані зіркою або трикутником і мати такі чотири групи з'єднань:

- 1) зірка – зірка ( $Y / Y$ ),
- 2) зірка – трикутник ( $Y / \Delta$ ),
- 3) трикутник – зірка ( $\Delta / Y$ ),
- 4) трикутник – трикутник ( $\Delta / \Delta$ ).

Застосовують, в основному, три схеми з'єднань:  $Y/Y_0$ ,  $Y/\Delta$  і  $Y_0/\Delta$ , де чисельник означає схему з'єднання обмоток високої напруги, а знаменник – схему з'єднання обмоток низької напруги. Для трансформаторів невеликої

потужності напругою 10/0,4 кВ і 6/0,4 кВ застосовують групи з'єднання обмоток  $Y/Y_0$ , тому що на стороні низької напруги треба мати виведену нульову точку [20].

З'єднувати обмотки зіркою необхідно при високих напругах, бо фазна напруга в  $\sqrt{3}$  рази менша за лінійну, що дає можливість зменшити вимоги до ізоляції обмоток.

При низьких напругах і великих струмах обмотки трансформатора з'єднують трикутником, що дає можливість зменшити переріз проводів обмоток, бо в цьому випадку фазний струм у провідниках обмоток менший за лінійний у  $\sqrt{3}$  рази.

Для повної класифікації схем увімкнення існує поняття **групи з'єднань обмоток трифазного трансформатора**.

В основу класифікації по групах, покладений годинниковий метод, яким визначається величина фазового зсуву між векторами високої (наприклад  $\underline{U}_{AB}$ ) і низької лінійної напруги ( $\underline{U}_{ab}$ ) однойменних фаз. Кут зсуву фаз між напругами позначають, користуючись годинниковим способом позначення кута. Для цього вектор  $\underline{U}_{AB}$  первинної лінійної напруги вважають за велику стрілку годинника і встановлюють проти цифри 12 годинникового циферблата, а вектор  $\underline{U}_{ab}$  вторинної лінійної напруги вважають за малу стрілку годинника і встановлюють на циферблаті відповідно до схеми з'єднання. За одиницю кутового зміщення взято кут  $30^\circ$ , що відповідає куту між двома сусідніми цифрами годинникового циферблата [20].

Групи з'єднань обмоток мають важливе практичне значення, оскільки при експлуатації можна увімкнути на паралельну роботу тільки трансформатори, які належать до однієї групи з'єднань.

На щитках трансформаторів зазначають не тільки спосіб з'єднання обмоток рис. 10.1, а й умовні позначення групи з'єднання обмоток трансформаторів, наприклад  $Y/Y_0 - 6$ ,  $Y/\Delta - 11$ ,  $Y_0/\Delta - 0$  тощо.

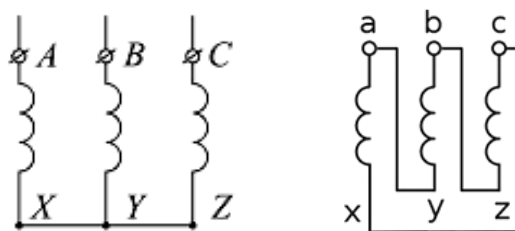


Рис. 10.1. Схеми з'єднання обмоток трифазного трансформатора

Для визначення групи з'єднань обмоток трансформатора за схемою  $Y/\Delta$  – 11 необхідно побудувати векторні діаграми напруг для обмоток високої та низької сторін рис. 10.2. Вектори фазних напруг обмоток високої та низької сторін паралельні між собою й при узгодженому вмиканні напрямлені в один бік, тому вектор фазної напруги обмотки низької сторони  $ax$  проводимо паралельно вектору фазної напруги обмотки вищої сторони  $AX$  [20].

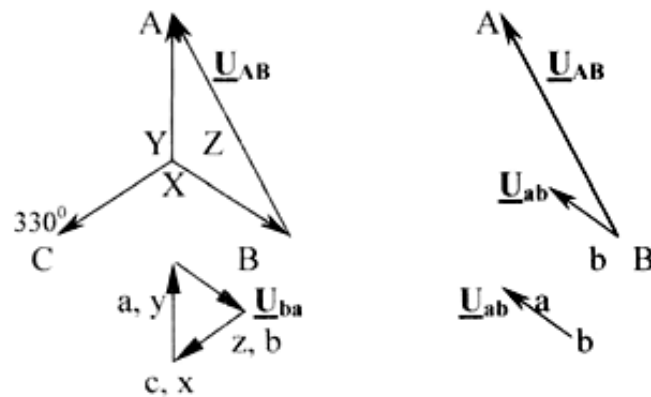


Рис. 10.2. Векторні діаграми напруг

Оскільки на схемі (рис. 10.1) виводи обмоток  $a$  та  $y$  з'єднані, то вони повинні з'єднуватись і на векторній діаграмі (рис. 10.2). Вектор  $by$ , з точки  $y$ , проводимо паралельно до вектора  $BY$ . Вектор  $cz$  проводимо паралельно до вектора  $CZ$ . Отримуємо трикутник фазних і лінійних напруг обмотки низької сторони. Для знаходження групи з'єднань обмоток, вектор  $ab$  перенесемо до вектора  $AB$ , з'єднуючи точки  $b$  і  $B$ . Відрахувавши за стрілкою годинника кут між векторами  $AB$  і  $ab$ , знаходимо, що кут між ними дорівнює  $330^\circ$ , тобто  $11 \cdot 30^\circ = 330^\circ$ . Це означає, що ми маємо 11 групу з'єднання обмоток трифазного трансформатора.

Отже група з'єднання обмоток трифазних трансформаторів показує зсув фаз між високою і низькою лінійними напругами [20].

У трифазних трансформаторів існує не тільки поняття коефіцієнта трансформації, який знаходять через відношення фазних напруг

$$k = \frac{U_{AX}}{U_{ax}} = \frac{U_{BY}}{U_{by}} = \frac{U_{CZ}}{U_{cz}},$$

але й поняття коефіцієнта трансформації групи з'єднань.

Коефіцієнтом трансформації групи з'єднань трифазного трансформатора називається відношення відповідних лінійних напруг первинних і вторинних

кіл, тобто

$$k_{\text{гр}} = \frac{U_{AB}}{U_{ab}} = \frac{U_{BC}}{U_{bc}} = \frac{U_{CA}}{U_{ca}}.$$

При різних групах з'єднань обмоток співвідношення між коефіцієнтом трансформації групи  $k_{\text{зр}}$  (лінійний коефіцієнт трансформації) і коефіцієнтом трансформації  $k$  (фазним коефіцієнтом трансформації) буде різним.

Номинальна повна потужність трифазного трансформатора

$$S_{\text{ном}} = 3U_{\text{ном}}I_{\text{ном}},$$

де  $U_{\text{ном}}$ ,  $I_{\text{ном}}$  – номінальна фазна напруга (В) і номінальний фазний струм (А).

Активна потужність

$$P_2 = 3U_2I_2 \cos \varphi_2,$$

де  $U_2$ ,  $I_2$  – фазні напруга та струм;  $\cos \varphi_2$  – коефіцієнт потужності приймача.

Коефіцієнт корисної дії трифазного трансформатора

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \sum p} = \frac{\sqrt{3}U_{\text{л}2}I_{\text{л}2} \cos \varphi_2}{\sqrt{3}U_{\text{л}2}I_{\text{л}2} \cos \varphi_2 + p_{\text{м}} + p_{\text{ел}}},$$

де  $\sum p$  – втрати потужності трансформатора:  $p_{\text{м}}$  – магнітні втрати;  $p_{\text{ел}}$  – електричні втрати.

## 10.2. ХІД РОБОТИ

1. Ознайомитися з будовою трифазних трансформаторів.
2. За допомогою тестера знайти виводи обмоток високої та низької напруг.
3. Зібрати згідно рис. 10.3 та рис. 10.4 схеми трансформаторів із вмиканням обмоток  $Y/Y_0 - 12$ ,  $Y/Y_0 - 6$ ,  $Y/\Delta - 11$ ,  $Y/\Delta - 5$  в режимі холостого ходу та записати дані фазних і лінійних напруг з боку високої та низької сторін в табл. 10.1.

Таблиця 10.1.

Результати вимірювань та обчислень

| Схема<br>з'єднання | $U_{\text{Лв}},$<br>В | $U_{\text{Лн}},$<br>В | $U_{\text{Фв}},$<br>В | $U_{\text{Фн}},$<br>В |
|--------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| $Y/Y_0 - 12$       |                       |                       |                       |                       |
| $Y/Y_0 - 6$        |                       |                       |                       |                       |
| $Y/\Delta - 11$    |                       |                       |                       |                       |
| $Y/\Delta - 5$     |                       |                       |                       |                       |

4. За даними вимірювань, величини коефіцієнтів трансформації, обчислити за формулами:

$$k = \frac{U_{\phi\epsilon}}{U_{\phi n}}; k = \frac{U_{Л\epsilon}}{U_{Л n}}$$

де  $U_{\phi\epsilon}$  – фазна напруга високої сторони;  $U_{\phi n}$  – фазна напруга низької сторони;  $U_{Л\epsilon}$  – лінійна напруга високої сторони;  $U_{Л n}$  – лінійна напруга низької сторони.

### **10.3. ОСОБЛИВОСТІ ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ ПРИ ВИКОНАННІ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ**

1. Визначити прилади первинного та вторинного кіл і розмістити їх на робочому столі згідно схеми.

2. Перемкнути ватметр на напругу 300 В при досліді холостого ходу та навантаженого режиму. При дослідженні режиму короткого замикання перемкнути ватметр на напругу 30 В.

3. Увімкнути вольтметр вторинного кола на напругу більшу, ніж вказана на досліджуваному трансформаторі.

4. Зібрати монтажну схему та доповісти про це викладачу.

5. Напругу до лабораторного стола вмикає викладач після перевірки монтажної схеми. Про ввімкнення напруги до стола свідчить загорання контрольної лампи на щитку УЛС.

6. Перед кожним дослідом вимикати напругу, що подається до схеми, червоною кнопкою вимикача на щитку УЛС, виводити регулятор ЛАТРа у нульове положення, до крайнього положення проти годинникової стрілки.

7. Якщо зашкалюють прилади, схему негайно вимкнути від електромережі червоною кнопкою вимикача на щитку УЛС, повторне ввімкнення схеми можливе тільки після усунення несправностей і виконується з дозволу викладача.

8. При проведенні дослідів холостого ходу та навантаженого режиму, напругу первинного кола трансформатора підтримувати номінальною, за допомогою автотрансформатора, згідно паспортних даних досліджуваного трансформатора. При проведенні дослідів короткого замикання, напругу первинного кола плавно збільшувати регулятором ЛАТРа від нуля до такого значення, при якому у вторинній обмотці трансформатора буде протікати номінальний струм.

#### **10.4. ПИТАННЯ ДО САМОКОНТРОЛЮ**

1. Будова та принцип дії трифазного трансформатора.
2. Електрорушійні сили, які наводяться в обмотках трансформатора, поняття про схеми та групи з'єднань обмоток трифазного трансформатора.
3. Векторні діаграми для різних схем з'єднань обмоток трифазного трансформатора.
4. Режим холостого ходу трансформатора та його векторна діаграма. Як визначити потужність втрат у режимі холостого ходу?
5. Особливості роботи трансформатора при активному навантаженні та векторна діаграма цього режиму.
6. Режим короткого замикання та його особливості. Як визначити потужність втрат у режимі короткого замикання?
7. Визначення ККД трифазного трансформатора за дослідями холостого ходу та короткого замикання.
8. Зовнішня характеристика трифазного трансформатора та її дослідне визначення.
9. Векторна діаграма трансформатора при індуктивному навантаженні.
10. Векторна діаграма трансформатора при ємнісному навантаженні.
11. Автотрансформатори, будова та принцип дії.
12. Вимірювальні трансформатори, будова та принцип дії.
13. Спеціальні типи трансформаторів.
14. Заступна схема трансформатора.
15. Схеми та групи з'єднань трифазних трансформаторів.

#### **10.5. РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА**

1. Вартабедян В.А. Загальна електротехніка. 4-е вид. перероб. і доп. К.: Вища школа. 1986. 359 с. С. 108-122.
3. Данилов И.А., Иванов П.М. Общая электротехника с основами электроники. Учебн. пособие для неэлектротехнических специальностей. М.: Высшая школа, 2005. 752 с. С. 191-198.
4. Немцов М.В., Светлакова И.И. Электротехника: учебное пособие. Изд. 2-е. Р/Д: Феникс, 2007. 571. С. 167-178.

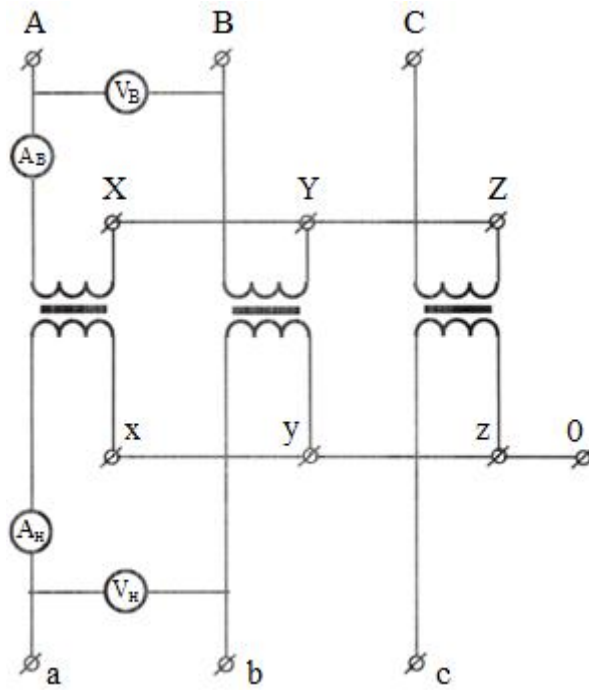


Рис. 10.3. З'єднання обмоток трифазного трансформатора за схемою зірка – зірка-нуль ( $Y/Y_0$ )

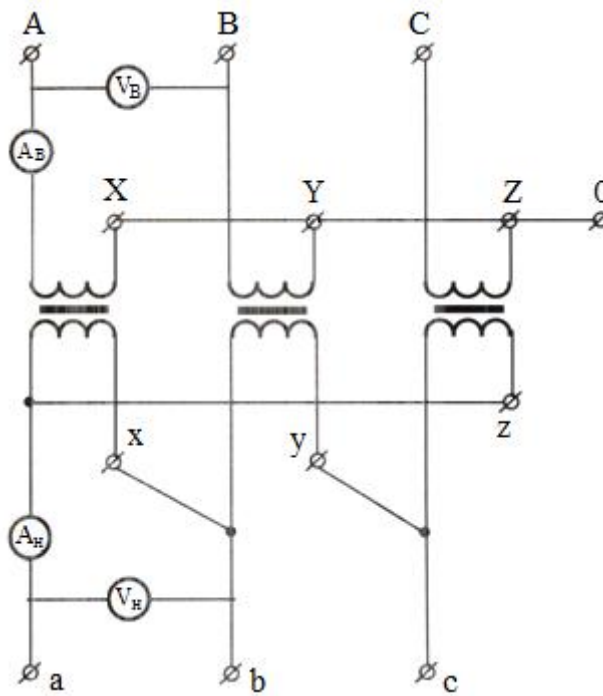


Рис. 10.4. З'єднання обмоток трифазного трансформатора за схемою Зірка-нуль – трикутник ( $Y/Y_0$ )

## Лабораторна робота № 11

### ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ЕЛЕКТРИЧНИХ ФІЛЬТРІВ

**Мета:** ознайомлення з принципом роботи електричних фільтрів та дослідження їх амплітудно-частотних характеристик.

**Прилади та обладнання:** опори, конденсатори, фільтри низької та високої частоти, осцилограф, звуковий генератор.

#### 11.1. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

**Електричним фільтром** називається пристрій, який здійснює частотну фільтрацію, тобто виділяє необхідну смугу частот із повного спектру складного електричного коливання, підведеного до входу фільтра. Поза діапазоном частот, що виділяється фільтром, послаблення сигналу велике. Основними характеристиками фільтрів є [21]:

- смуга пропускання;
- смуга запирання;
- частота зрізу.

**Смуга пропускання** – діапазон частот, де фільтр пропускає коливання, а діапазон частот, у якому спостерігається значне послаблення коливань, називається **смугою запирання**.

Границя між смугою пропускання та смугою запирання називається **частотою зрізу**. Залежно від смуги або смуг частот, які пропускаються розрізняють фільтри нижніх частот (ФНЧ), фільтри верхніх частот (ФВЧ), смугові фільтри та запираючі, або режекторні фільтри.

Активні фільтри будуються в поєднанні активних елементів (підсилювачів) із пасивними RC-ланками, які вмикають у коло зворотнього зв'язку. Проста RC-ланка може бути використана як ФНЧ (рис. 11.1, а), або як ФВЧ (рис. 11.1, б).

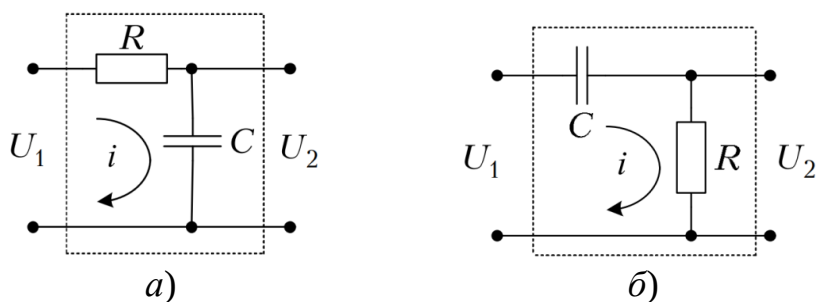


Рис. 11.1. Схема активних фільтрів

Розглянемо схему RC-ланки зображену на рис. 11.1, а.

Коефіцієнт передачі напруги для схеми

$$K_u = \frac{U_{вих.}}{U_{вх.}},$$

$$U_{вх.} = i(R + X_C) = i\left(R + \frac{1}{j\omega C}\right),$$

$$U_{вих.} = iX_C = \frac{i}{j\omega C}.$$

Тоді

$$K_u = \frac{\frac{i}{j\omega C}}{i\left(R + \frac{1}{j\omega C}\right)} = \frac{1}{1 + j\omega CR}.$$

Звідси модуль коефіцієнта передачі

$$K = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 C^2 R^2}}.$$

Графічне зображення АЧХ ФНЧ показано на рис. 11.2.

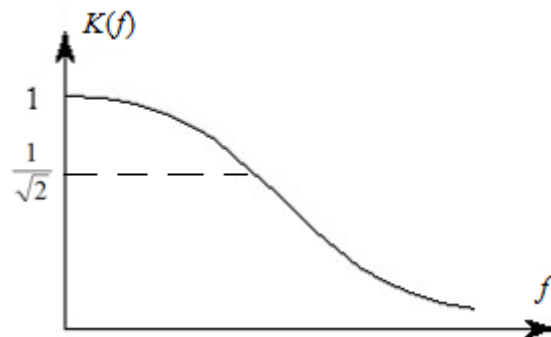


Рис. 11.2. Амплітудно-частотна характеристика ФНЧ

Як видно з рисунка, у випадку ФНЧ із зростанням частоти коефіцієнт передачі напруги зменшується.

Частота зрізу, на якій модуль коефіцієнта передачі зменшується в 2 рази, визначається за формулою

$$f_{зр} = \frac{1}{2\pi RC}.$$

Амплітудно-частотна характеристика схеми ФВЧ (рис. 11.1, б) описується виразом

$$K = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{\omega^2 R^2 C^2}}},$$

а її графічне зображення показано на рис. 3 звідки видно, що у випадку ФВЧ зі зростанням частоти коефіцієнт передачі напруги зростає й прямує до одиниці.

Частота зрізу, на якій коефіцієнт передачі напруги досягає значення рівного

$$\frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707; \quad f_{zp} = \frac{1}{2\pi RC}.$$

співпадає з відповідним виразом для ФНЧ.

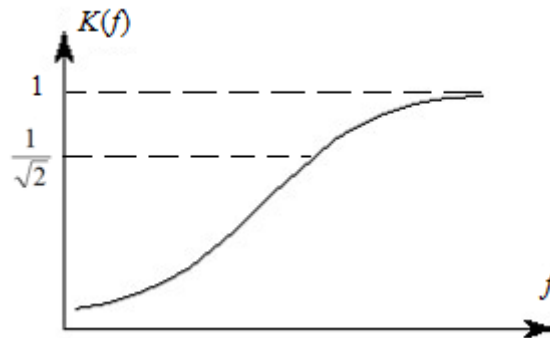


Рис. 11.3. Амплітудно-частотна характеристика ФВЧ

**Пасивні фільтри** мають такі недоліки [21]:

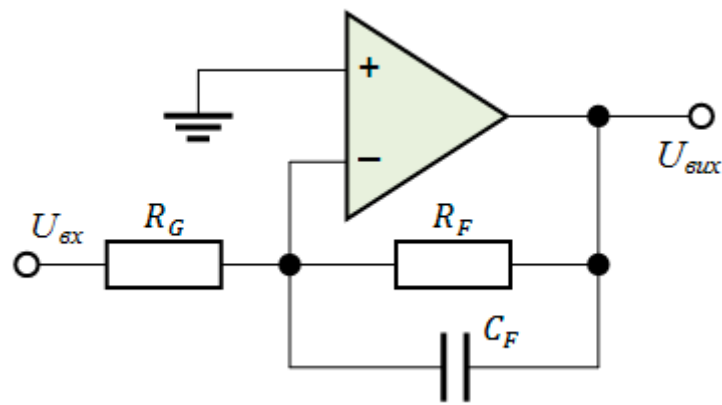
Коефіцієнт передачі пасивного фільтру менший за одиницю. На характеристики фільтра впливає опір навантаження  $R_n$ , і тому вихідний опір фільтра має бути значно менший за опір навантаження. Ці недоліки усуваються в активних RC-фільтрах. Активний фільтр є операційним підсилювачем з частотно незалежною RC-ланкою додатного (іноді від'ємного) зворотного зв'язку, які дають можливість формувати необхідну АЧХ і підсилювати сигнали.

**Активні фільтри** відзначаються малими габаритними розмірами, легко реалізуються у вигляді інтегральних мікросхем, мають високу надійність.

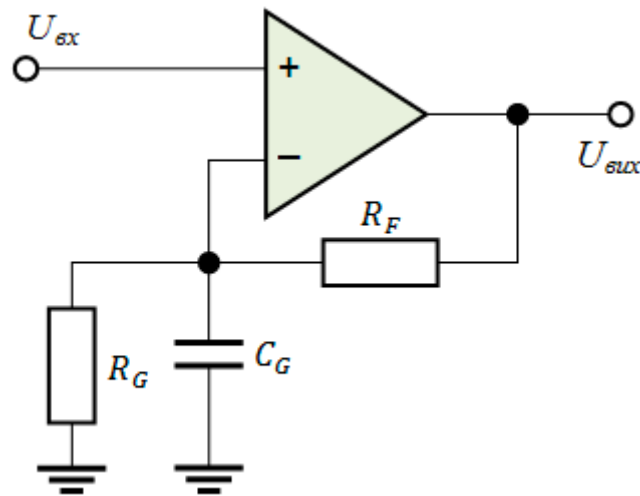
На рис. 4, а зображено схему ФНЧ на операційному підсилювачі (ОП), в якій конденсатор підключений паралельно до резистора кола зворотного зв'язку. Коефіцієнт передачі напруги цієї схеми можна представити виразом

$$K_u = \frac{U_{вux}}{U_{вх}} = \frac{X_C \parallel R_F}{R_G}.$$

На рис. 11.4, а ОП увімкнений як інвертуючий підсилювач.



а)



б)

Рис. 11.4. Схеми активних фільтрів на операційних підсилювачах:  
а – ФНЧ; б – ФВЧ

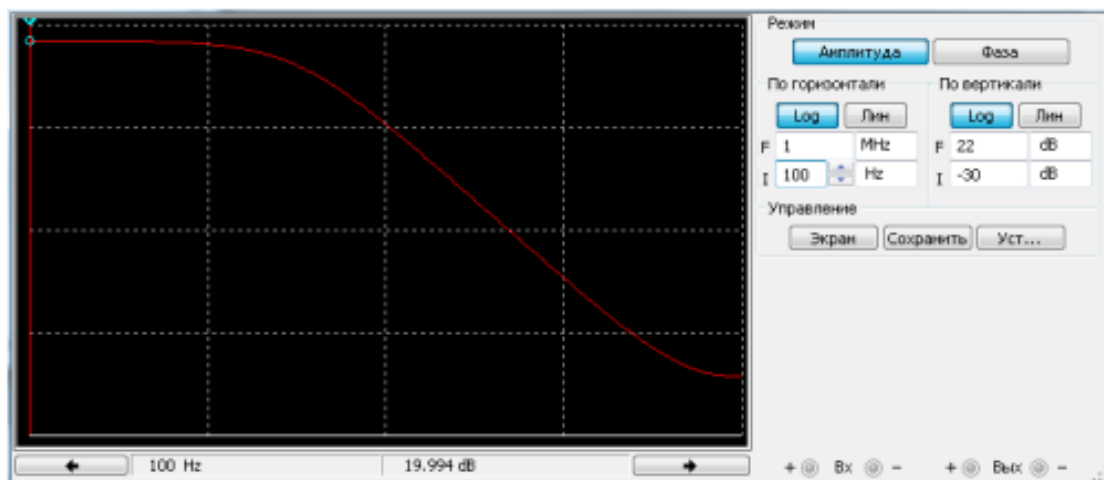
На дуже низьких частотах опір  $X_C$  прямує до нескінченності, конденсатор не впливає на схему і опір зворотного зв'язку визначається резистором  $R_F$ . Коефіцієнт підсилення на низьких частотах дорівнює

$$k = -\frac{R_F}{R_G}.$$

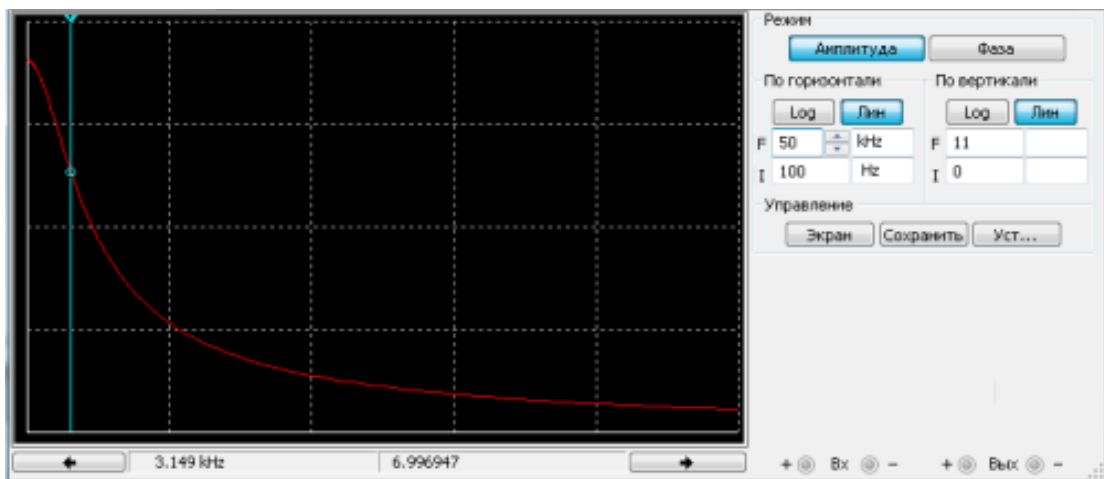
На дуже високих частотах імпеданс конденсатора прямує до нуля, резистор у колі зворотного зв'язку виявляється коротко замкнутий через конденсатор, що зменшує коефіцієнт підсилення до нуля. На частоті, коли  $X_C = R_F$ , коефіцієнт підсилення зменшується в  $\sqrt{2}$  раз у порівнянні з його максимальним значенням. Це відбувається через векторну суму рівних за модулем імпедансів конденсатора та резистора в колі зворотного зв'язку.

Амплітудно-частотна характеристика схеми приведена на рис. 11.5 в

лінійному (рис. 11.5, а) та логарифмічному (рис. 11.5, б) масштабах



а)



б)

Рис. 11.5. Амплітудно-частотна характеристика фільтра низьких частот на операційному підсилювачі

При з'єднанні конденсатора паралельно з резистором  $R_G$  виникає протилежний ефект, і схема перетворюється на фільтр верхніх частот (рис. 11.4, б), де операційний підсилювач увімкнений як неінвертуючий підсилювач. Амплітудно-частотна характеристика цього фільтра описується виразом

$$\frac{U_{вих}}{U_{вх}} = 1 + \frac{R_F}{X_C \parallel R_G}.$$

На дуже низьких частотах імпеданс конденсатора прямує до нескінченності, отже його вплив у паралельному колі з  $R_G$  нехтуючи малий. Коефіцієнт підсилення на низьких частотах становить

$$k = 1 + \frac{R_F}{R_G}.$$

На високих частотах імпеданс конденсатора зменшується, отже коефіцієнт підсилення збільшується.

Амплітудно-частотна характеристика схеми приведена на рис. 11.6.

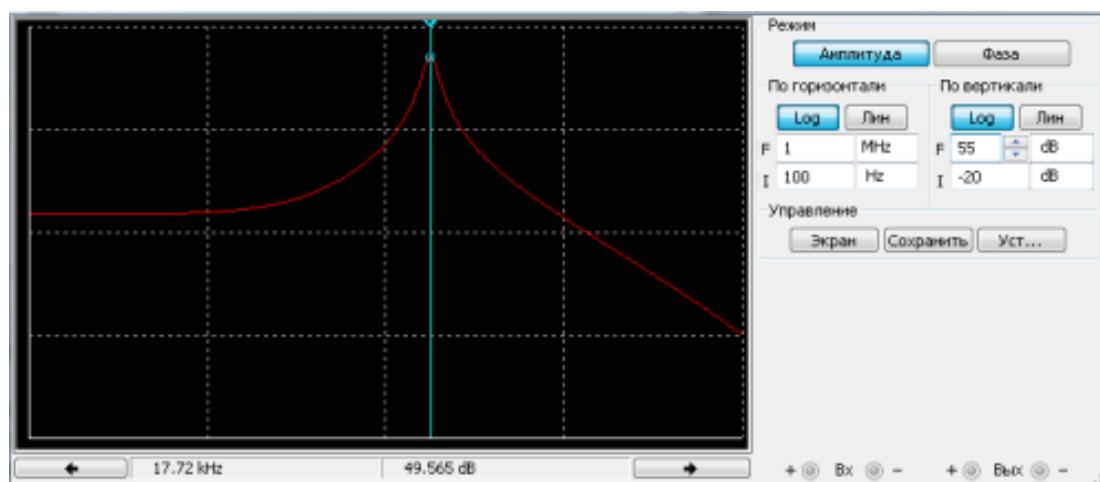


Рис. 11.6. Амплітудно-частотна характеристика схеми фільтра високих частот на операційному підсилювачі

## 11.2. ХІД РОБОТИ

1. Взявши дані з табл. 11.1, за вказаним викладачем варіантом, визначити частоту зрізу за формулою

$$f_{зр} = \frac{1}{2\pi RC}.$$

2. Увімкнути й прогріти прилади.

3. Зібрати схему ФНЧ з номіналами вказаними в табл. 11.1.

4. На генераторі ГЗ-33 виставити вихідну напругу рівну 1 В частотою 20 Гц і подати на вхід.

5. Змінюючи частоту на генераторі зафіксувати за допомогою приладу СІ-112 зміну напруги на виході фільтра.

6. Визначити  $K_u$ .

Дані занести в табл. 11.1

Таблиця 11.1

Результати експериментальних досліджень та розрахунків

| $f$<br>(Гц) | 20 | 100 | 200 | 1000 | 5000 | 10000 | 20000 | $f_{зр}$ |
|-------------|----|-----|-----|------|------|-------|-------|----------|
| $K_u$       |    |     |     |      |      |       |       |          |
| $K_{UT}$    |    |     |     |      |      |       |       |          |

7. За табличними даними побудувати АЧХ фільтра.
8. Зібрати схему ФВЧ.
9. Провести дії аналогічно як для ФНЧ згідно з п. 4, 5. Дані занести в табл. 2 аналогічну до табл. 11.1. Побудувати АЧХ ФВЧ.
10. Зробити висновки за результатами теоретичних розрахунків і експериментальних даних.

### **11.3. ПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ**

1. Що називається електричним фільтром?
2. Які основні характеристики фільтрів?
3. Класифікуйте фільтри за смугою частот, що пропускаються ними.
4. Нарисувати схему ФНЧ та його АЧХ.
5. Нарисувати схему ФВЧ та його АЧХ.
6. Недоліки пасивних фільтрів.
7. Які фільтри є активними, їх переваги?
8. Схеми активних фільтрів.

### **11.4. РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА**

1. Ефимчик М.К., Шушкевич С.С. Основы радиоэлектроники: Для физ. спец. ун-тов. 2-е изд., перераб. и доп. Минск: изд-во «Университетское», 1986. 303 с. С. 57-68.
2. Кичак В.М., Крушевський Ю.В., Гаврілов Д.В. Основи радіоелектроніки: навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2010. 368 с. С. 198-216.
3. Крушевський Ю.В., Гаврілов Д.В. Основи радіоелектроніки. Частина 2. Навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2008. 164 с. С. 45-63.

## Лабораторна робота № 12

### ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ДІОДІВ

**Мета:** ознайомлення з принципом дії, будовою та властивостями напівпровідникових діодів.

**Прилади та обладнання:** діоди, блоки живлення, амперметри, вольтметри.

#### 12.1. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

**Напівпровідниковий діод** – це прилад який має два виводи з одним який містить один електронно-дірковий ( $n$ - $p$ ) перехід [1].

Найбільше використовуються германієві та кремнієві діоди, а також діоди, виконані на основі арсеніду галію.

Діоди широко застосовуються практично в усіх вузлах радіоелектронної апаратури залежно від особливості їх будови та властивостей.

Найважливішими перевагами напівпровідникових діодів перед електронними лампами є [2]:

- малі габарити та маса;
- високий коефіцієнт корисної дії (понад 90%);
- відсутність розжарювального джерела електронів;
- тривалий термін служби (при дотриманні рекомендованих правил експлуатації);
- висока надійність.

Принцип дії діода базується на властивостях  $p$ - $n$ -переходу, який є контактом напівпровідників  $p$ - і  $n$ -типів. Ширина  $p$ - $n$ -переходу дуже мала (від 1 до 50 мкм). Найважливіша властивість  $p$ - і  $n$ -напівпровідників – одностороння провідність у місці контакту. Електрична провідність кожного  $n$ -напівпровідника базується на вільних електронах, тобто подібна провідності металів. Електрична провідність  $p$ -напівпровідників зумовлена дірками. Їх можна вважати фіктивними позитивними частинками, бо вони є місцями в кристалічній ґратці, де відсутні валентні електрони [1].

Розглянемо процеси на границі поділу двох напівпровідників приведених у тісний контакт (рис. 12.1, *а*). На рисунку іони позначені кружками, а вільні носії – знаками «+» і «-». Відразу після дотику кристалів починається дифузії дірок з  $p$ -області в  $n$ -область та дифузія електронів у протилежному напрямку.

При зіткненні відбувається рекомбінація електронів та дірок, що супроводжується утворенням біля граничної області двох шарів: ліворуч – шар некомпенсованих негативних іонів, праворуч – шар некомпенсованих позитивних іонів. Між цими протилежно зарядженими шарами виникає електричне поле, напруженість якого перешкоджає дифузії дірок і електронів, дифузний струм припиниться. Цій величині напруженості відповідає певна ширина шару  $l$ , в якому рекомбінували рухомі носії зарядів та певна контактна різниця потенціалів  $\phi_k$  (рис. 12.1, б).

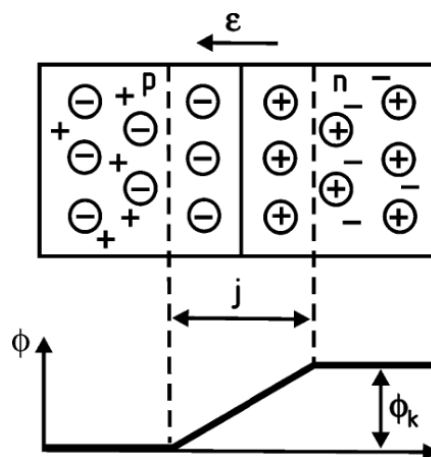


Рис. 12.1. Утворення контактної різниці потенціалів в електронно-дірковому переході: а – розподіл іонів і вільних носіїв заряду в області  $p$ - $n$ -переходу; б – зміна потенціалу в напрямку, перпендикулярному до площини  $p$ - $n$ -переходу

Присутні в напівпровідникових кристалах неосновні носії заряду під дією напруженості  $\varepsilon$  будуть дрейфувати назустріч дифузним зарядам, тобто виникає дрейфовий струм, напрямлений зустрічно струму дифузії. Динамічна рівновага настає при рівності дифузного та дрейфового струмів, при цьому шар  $l$  стає збідненим вільними носіями заряду. Причому, чим ближче до межі поділу кристалів збіднення шару  $l$  носіями зарядів буде дедалі більше вираженим.

Властивість односторонньої провідності  $p$ - $n$ -переходу має широке практичне застосування.

Власну контактну різницю потенціалів збідненого шару  $\phi_k$  можна змінювати, якщо до  $p$ - $n$ -переходу прикласти напругу  $U$ . Причому, якщо позитивний полюс джерела підключити до області  $p$ , а негативний – до області  $n$ , то таке включення називається **прямим**. Відповідну різницю потенціалів позначають  $\phi_{k,n}$ . Включення, при якому до області  $p$  приєднано негативний

полюс джерела, а до області  $n$  – позитивний, називається **зворотнім**. Відповідну різницю потенціалів позначають  $\varphi_{к.зв.}$  (рис. 12.2).

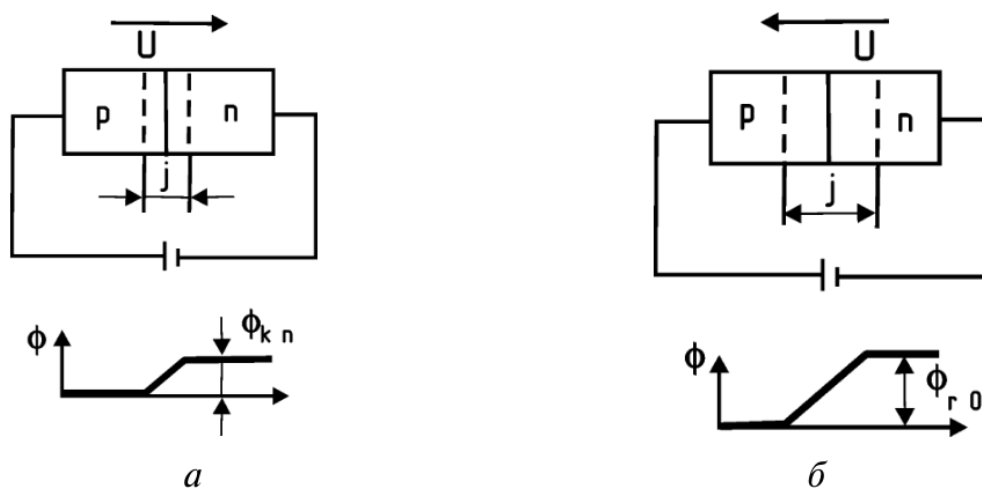


Рис. 12.2. Пряме (а) і зворотнє (б) включення  $p$ - $n$ -переходу

Враховуючи те, вся прикладена напруга практично спадає на збідненому шарі, оскільки опір кристалів невеликий, то можна записати:

$$\varphi_{к.п.} = \varphi_{к} - U ; \varphi_{к.зв.} = \varphi_{к} + U .$$

Отже, якщо маємо пряме включення  $p$ - $n$ -переходу, то різниця потенціалів на межі збідненого шару (так званий потенціальний бар'єр) зменшиться, а в іншому випадку – збільшиться. Зменшення потенціального бар'єру призводить до зростання дифузного струму та зменшення зустрічного дрейфового струму. Результатуючий струм (його називають прямим) збігається з дифузним. Збільшення потенційного бар'єру призводить до зменшення дифузного струму та зростання дрейфового. Результуючий струм  $p$ - $n$ -переходу і всього замкнутого кола збігається з дрейфовим струмом. Цей струм називають зворотним. Зворотний струм є в сотні і тисячі разів меншим від прямого [22].

Щоб зменшити зворотний струм, треба зменшити кількість неосновних носіїв заряду. Це досягається зменшенням сторонніх (нелегуючих) домішок і поліпшенням структури кристала (зменшенням кількості дефектів кристалічної ґратки).

Властивості та особливості  $p$ - $n$ -переходу відображаються на їх вольт-амперних характеристиках (ВАХ), які відображають залежність значення та напрямку струму від значення та полярності напруги (рис. 12.3) [23].

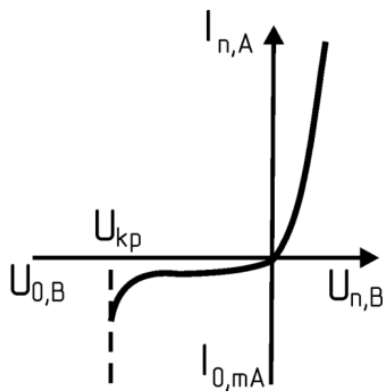


Рис. 12.3. Вольт-амперна характеристика  $p$ - $n$ -переходу

При досягненні зворотною напругою деякого критичного значення  $U_{кр}$  зворотний струм зростатиме – це явище називається пробоем  $p$ - $n$ -переходу. Розрізняють електричний та тепловий пробій. **Електричний пробій** не є небезпечним для  $p$ - $n$ -переходу, якщо відключити подачу зворотної напруги, то вентильні властивості  $p$ - $n$ -переходу повністю відновлюються. **Тепловий пробій** призводить до руйнування кристала і є аварійним режимом. Він виникає за недостатнього охолодження кристала. Для боротьби з тепловим пробоем напівпровідникові прилади забезпечуються пристроями, які підвищують тепловіддачу. Електронно-дірковий перехід є основою напівпровідникового приладу.

Класифікація діодів є такою [23]:

- 1) За конструкцією: точкові, площинні та мікросплавні;
- 2) За функціональним призначенням: випрямляючі, імпульсні, фотодіоди, світлодіоди, стабілітрони, варикапи, тунельні діоди;
- 3) За частотою: низькочастотні, високочастотні, надвисокочастотні;
- 4) За потужністю: малопотужні, середньої потужності, потужні.

На електричних схемах діоди мають визначені умовні графічні позначення (рис. 12.4).

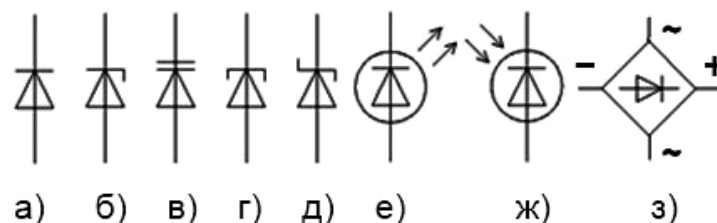


Рис. 12.4. Умовні графічні позначення напівпровідникових діодів: а) випрямляючі, імпульсні, універсальні; б) стабілітрони та стабістори; в) варикапи; г) тунельні діоди; д) діоди Шотткі; е) світлодіоди; ж) фотодіоди; з) випрямляючі блоки

Залежно від розробки діода, його позначення може включати додаткові символи. В будь-якому випадку вершина трикутника, що примикає до осьової лінії діода, вказує на напрямок протікання струму (рис. 12.5). У тій частині позначення, де розташовується трикутник, є  $p$ -область, яку називають анодом або емітером, а з боку, де до трикутника примикає відрізок, є  $n$ -область, яку відповідно називають катодом, або базою.

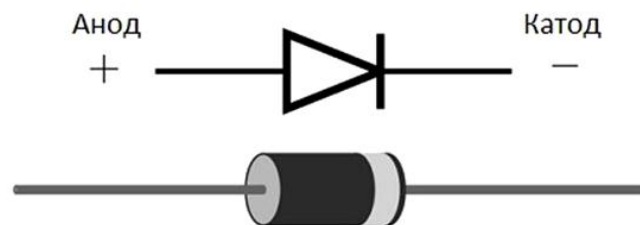


Рис. 12.5. Елементи схеми діода

Залежно від способу одержання  $p$ - $n$ -переходу діоди поділяють на точкові та площинні. Конструкцію точкового діода представлено на рис. 12.6.



Рис. 12.6. Конструкція точкового діода

У точковому діоді до його бази приєднано вольфрамовий дріт, який легований атомами акцепторної домішки. Через дріт пропускають імпульсний струм силою до 1 А. У результаті цього утворюється точка розігріву в якій атоми акцепторної домішки переходять у базу, в результаті чого формується  $p$ -область (рис. 12.6). Таким чином утворюється  $p$ - $n$  перехід на дуже малій площі. При таких технічних параметрах точкові діоди є високочастотними, але працюють на малих прямих струмах [22].

Конструкцію площинного діода представлено на рис. 12.7. У ньому на

базу (напівпровідник  $n$ -типу провідності) накладається матеріал акцепторної домішки та при температурі понад  $500^{\circ}\text{C}$  у вакуумній печі забезпечується її дифузія в базу діода. Як наслідок утвориться область  $p$ - $n$ -перехіду значної площини. Вивід з  $p$ -області називають анодом, а вивід з  $n$ -області – катодом. Основне призначення площинних діодів – випрямлення великих струмів та напруг [23].

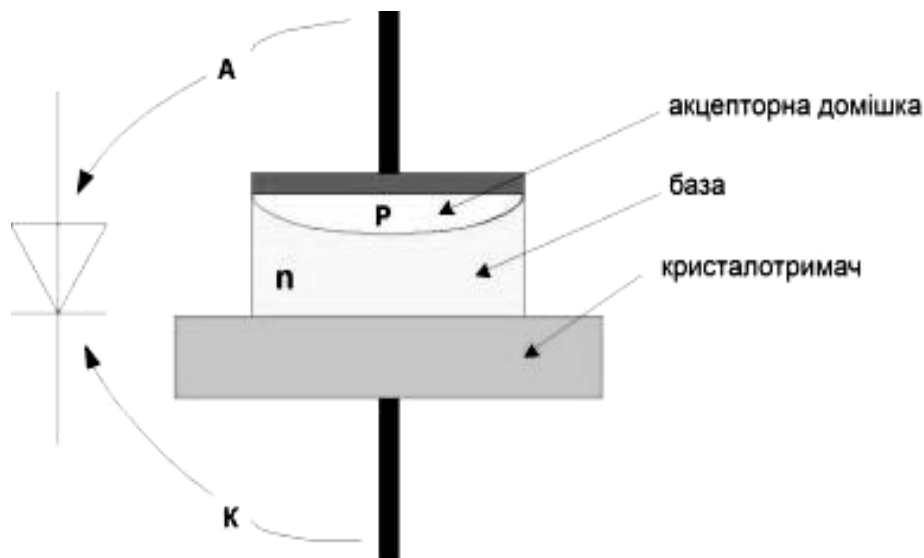


Рис. 12.7. Конструкція площинного діода

На рис. 12.8 приведено вольт-амперну характеристику ідеального та реального діода. Вона виражає залежність протікаючого струму від прикладеної напруги в прямому та зворотному напрямі.

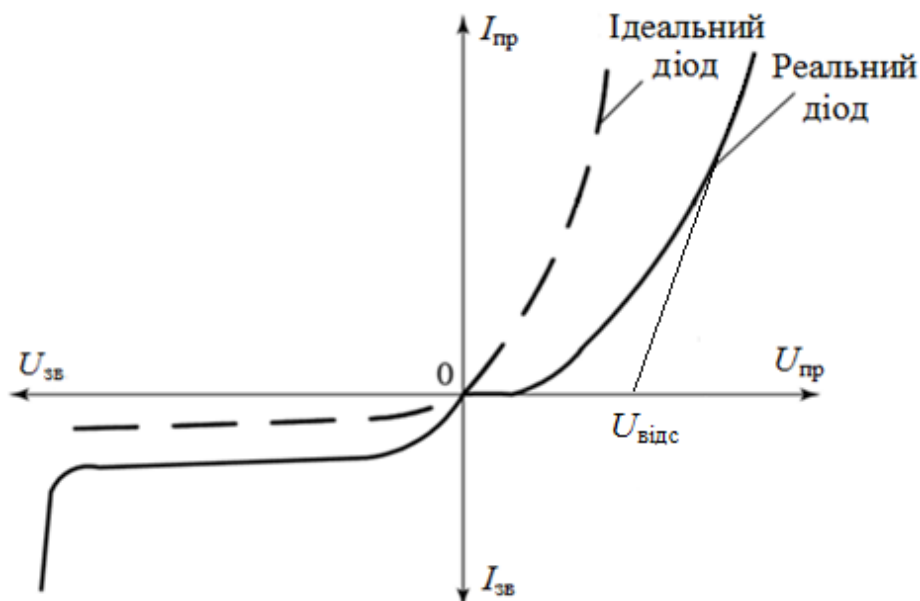


Рис. 12.8. Вольт-амперна характеристика діода

Типові ВАХ германієвих та кремнієвих діодів представлено на рис. 12.9.

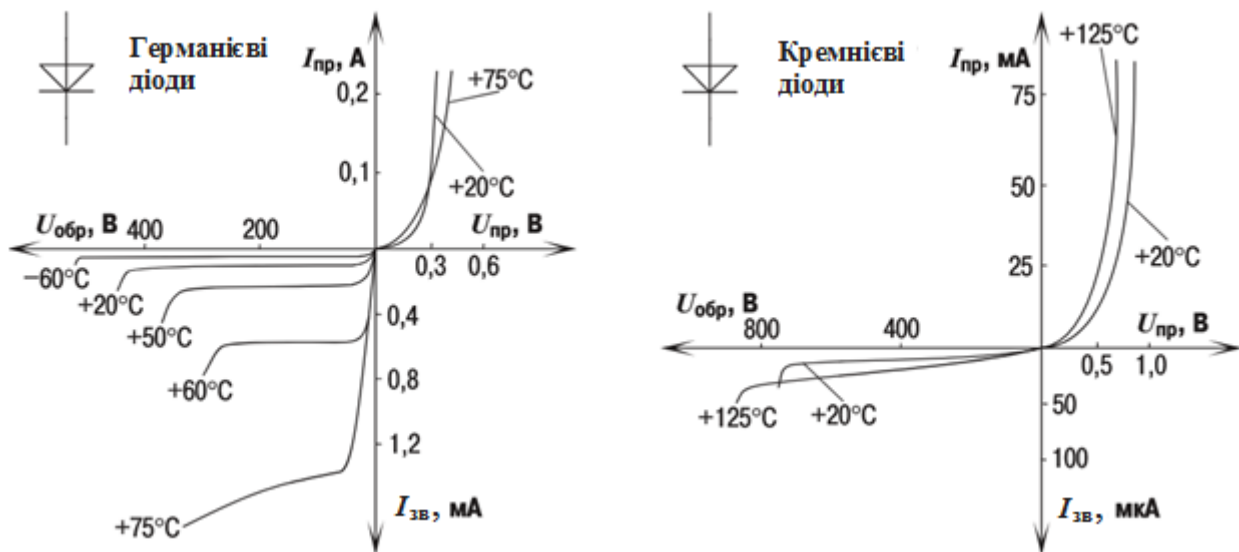


Рис. 12.9. Вольт-амперні характеристики германієвих та кремнієвих діодів

Як видно з рисунка, вольт-амперні характеристики не є прямими лініями, тому діоди – це нелінійні елементи. А всі нелінійні елементи мають таку важливу особливість, що їх опір не стала величина, а залежить від прикладеної напруги.

Характеристики реального діода відрізняються від ідеального через такі причини 22:

1. У реальному діоді, здебільшого, використовують несиметричний  $p$ - $n$ -перехід, для якого виконується одна з умов  $p_p \gg n_n$ , або  $n_n \gg p_p$ .

Різка відмінність концентрації основних носіїв заряду призводить до того, що одна з областей напівпровідникового кристала стає низькоомною, а інша високоомною. Низькоомна область є домінуючим джерелом рухомих носіїв зарядів, і струм через діод при прямому включенні  $p$ - $n$ -переходу практично повністю визначатиметься потоком її основних носіїв. Тому, низькоомна область напівпровідникового кристала називається **емітером**, а високоомна область – **базою**. База завжди високоомна у всіх напівпровідникових приладах [19].

2. Опір об'єму напівпровідникового кристала не дорівнює нулю, і через великі прямі струми ним не можна нехтувати. Зазвичай опір емітера набагато менший від опору бази ( $r_e \ll r_o$ ), тому враховують лише  $r_o$ , що впливає на пряму вітку вольт-амперної характеристики (ВАХ).

3. У реальному діоді  $p$ - $n$ -перехід має кінцеві розміри, внаслідок чого необхідно враховувати процеси, що відбуваються в області та на поверхні  $p$ - $n$ -переходу. Найбільш важливими з них є: термогенерація носіїв заряду в області  $p$ - $n$ -переходу та струм витоку, які впливають на зворотну вітку ВАХ діода.

4. У реальних діодах при великих негативних напругах на емітері спостерігається різке зростання зворотного струму. Це називається пробоем  $p$ - $n$ -переходу.

Продовження лінійної ділянки ВАХ до перетину з віссю  $U$  дає значення напруги відсікання  $U_{відс}$ , яке можна прийняти за оцінку бар'єрної різниці потенціалів.

Зворотна вітка ВАХ також відрізняється від теоретичної  $I_{зв} = I_s$  для  $U \gg kT$ . У цій області опір  $p$ - $n$ -переходу швидко збільшується і навіть перевищує опір ізоляції діода. Тому виникає струм витоку, який протікає не через  $p$ - $n$ -перехід, а через постійний опір ізоляції. Цій ситуації відповідає лінійна ділянка зворотної вітки, перетин якої з віссю струму  $I$  дає оцінку струму насичення  $I_s$ .

Для оцінки ширини  $p$ - $n$ -переходу можна використовувати таку формулу:

$$d \approx \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0 U_{відс}}{en_d}}.$$

де  $n_d$  – концентрація атомів донорної домішки в напівпровіднику  $n$ -типу,  $\varepsilon$  – діелектрична проникність матеріалу напівпровідника. Цю формулу можна отримати, вважаючи, що шар об'ємного заряду має значну товщину тільки в  $n$ -області.

## 12.2. ХІД РОБОТИ

1. Ознайомитися з експериментальним стендом рис. 12.10. Постійна напруга від джерела живлення  $G1$  надходить на дільник, який складається з резисторів  $R1$  та  $R2$ . З резистора  $R2$  потенціометрично знімається напруга  $U$ , яка подається на діод  $VD$ . Цю напругу вимірюють вольтметром  $PV$ . Амперметром  $PA$  вимірюють струм  $I$  через діода.

2. Включити прилади.

3. Перемикач  $П1$  на макетній платі встановити в положення «пряме» (ліворуч).

4. Вибрати перемикачем  $П2$  на макетній платі тип досліджуваного діода:

германієвий (Ge) або кремнієвий (Si).

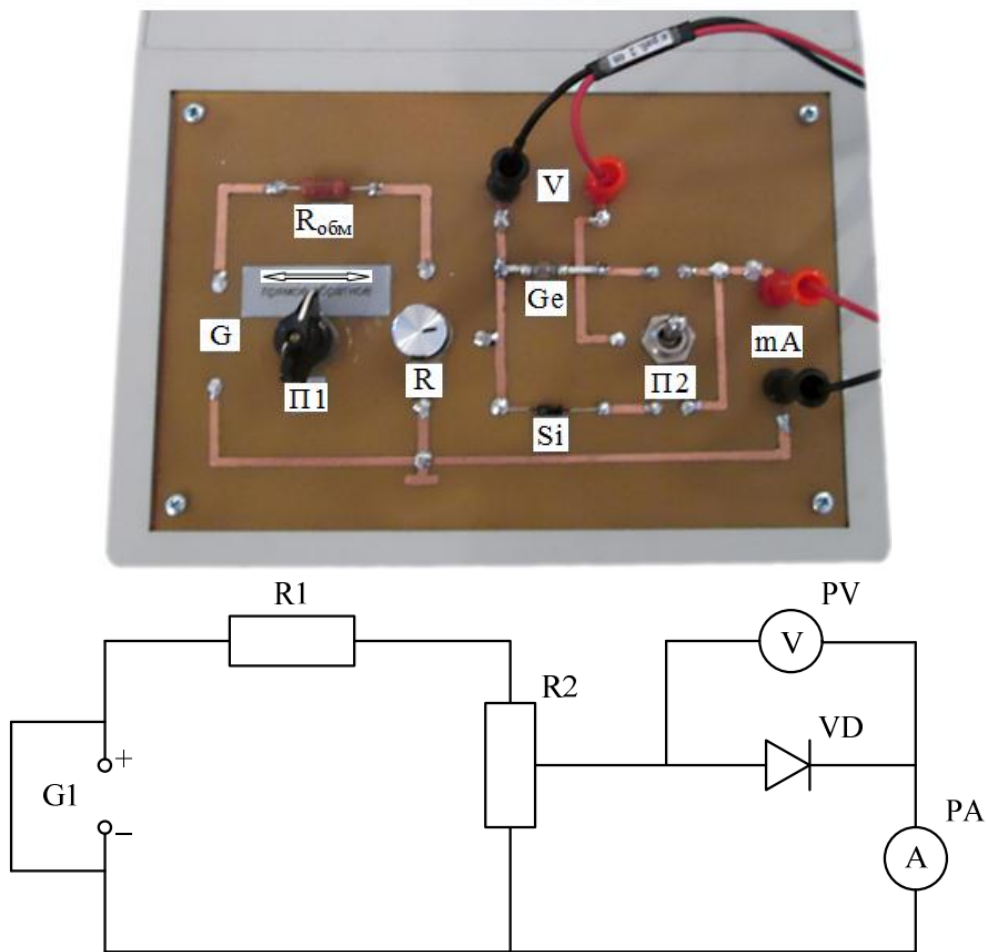


Рис. 12.10. Експериментальний стенд та його електрична схема

5. За допомогою змінного опору  $R_2$  змінювати спад напруги на діоді (рекомендований крок зміни напруги на прямій вітці ВАХ – 0,02 В) та записувати покази вольтметра PV ( $U_{пр}$ ) та міліамперметра PA ( $I_{пр}$ ) у табл. 1 (близько 15÷20 точок).

6. Перемикач П2 на макетній платі встановити в положення «зворотній» (праворуч).

7. Провести вимірювання відповідно до п.5.

8. Перемикачем П1 вибрати інший тип діода та здійснити вимірювання його ВАХ відповідно до пп. 5-7.

9. Після завершення роботи знеструмити лабораторну установку.

10. За результатами приведеними в табл. 12.1 побудувати ВАХ.

## Вольт-амперні характеристики досліджуваних діодів

| №<br>з/п | Діод (германієвий)  |              |             |               | Діод (кремнієвий)   |              |             |               |
|----------|---------------------|--------------|-------------|---------------|---------------------|--------------|-------------|---------------|
|          | електричне зміщення |              |             |               | електричне зміщення |              |             |               |
|          | пряме               |              | зворотне    |               | пряме               |              | зворотне    |               |
|          | $U_{пр}, В$         | $I_{пр}, мА$ | $U_{зв}, В$ | $I_{зв}, мкА$ | $U_{пр}, В$         | $I_{пр}, мА$ | $U_{зв}, В$ | $I_{зв}, мкА$ |
| 1        |                     |              |             |               |                     |              |             |               |
| 2        |                     |              |             |               |                     |              |             |               |
| ...      |                     |              |             |               |                     |              |             |               |

11. Побудувати графіки обох діодів ВАХ на міліметровому папері або за допомогою комп'ютерних програм обробки масивів даних. Використати різні масштаби для напруг і струмів у прямій та зворотній вітці ВАХ. Візуально порівняти ВАХ германієвого та кремнієвого діодів.

12. Для обох діодів окремо знайти напруги відсікання  $U_{відс}$ , продовживши лінійні ділянки прямої вітки ВАХ до перетину з віссю напруги. Вказати експериментальне значення висот потенційного бар'єру  $\phi_{pn}$  та порівняти їх із ширинами заборонених зон відповідних матеріалів (для германію  $E_g = 0,72$  еВ, для кремнію  $E_g = 1,1$  еВ).

13. Знайти величини ширини  $p$ - $n$ -переходів різних діодів, використовуючи значення діелектричних проникностей і концентрації носіїв, вказані в довідкових таблицях.

14. Оцінити струми насичення, продовживши лінійні ділянки зворотних гілок ВАХ до перетину з віссю струмів.

## 12.5. ПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

1. Принцип дії діода.
2. Будова та параметри точкового діода.
3. Будова й властивості площинного діода.
4. Основні параметри випрямляючих діодів.
5. Вольт-амперна характеристика напівпровідникового діода.
6. Принцип дії, будова та основні параметри кремнієвих стабілітронів.
7. Принцип дії, будова та параметри світлодіодів.

## **12.6. РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА**

1. Гершунский Г.С. Основы электроники. К: Высшая школа, 1977. 344 с. С. 144-164.
2. Ефимчик М. К., Шушкевич С. С. Основы радиоэлектроники: Для физ. спец. ун-тов. 2-е изд., перераб. и доп. Минск: изд-во «Университетское», 1986. 303 с. С. 71-76.
3. Колонтаєвський Ю.П., Сосков А.Г. Електроніка і мікросхемотехніка: Підручник. 2-е вид. / За ред. А.Г. Соскова. К.: Каравела, 2009. 416 с. С. 20-31.

### Лабораторна робота №13

## ПРАКТИЧНЕ ВИКОРИСТАННЯ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ДІОДІВ. СХЕМИ ВИПРЯМЛЕННЯ ТА СТАБІЛІЗАЦІЇ

**Мета роботи:** вивчення практичного застосування напівпровідникових діодів; дослідження схем виправлення та стабілізації змінного струму.

**Прилади та обладнання:** блоки живлення, напівпровідникові діоди, стабілітрони, резистори, вольтметри, амперметри.

### 13.1. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Напівпровідникові діоди та кремнієві стабілітрони широко використовуються в схемах випрямлення та стабілізації. Випрямляч в основному складається з таких елементів [24]:

- силового трансформатора, який призначений для підвищення або пониження напруги електромережі до потрібної величини;
- одного або декількох діодів з односторонньою провідністю струму, які виконують функцію перетворення змінного струму в постійний;
- згладжуючого фільтра, який зменшує пульсацію випрямленого струму.

Найчастіше для живлення елементів радіоелектроніки використовують однофазні випрямлячі невеликої потужності.

У випадку невеликих потужностей випрямленого струму і невисоких вимогах до пульсацій використовується однопівперіодна схема випрямляча (рис. 13.1).

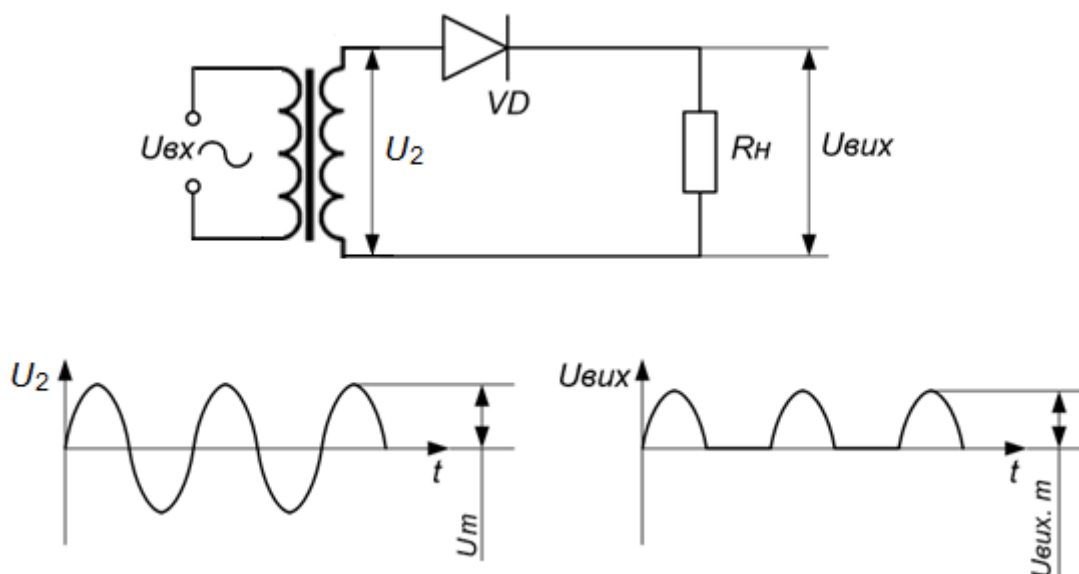


Рис. 13.1. Схема однопівперіодного випрямляча

Основною перевагою схеми однопівперіодного випрямляча є її простота, а основними недоліками є низький ККД і великі пульсації.

У цій схемі діод перебуває у відкритому стані впродовж одного півперіоду змінної напруги. Постійну складову вихідної напруги можна визначити за формулою:

$$U_{вих} = \frac{U_m}{\pi} = 0,318U_m = 0,45U_2,$$

де  $U_2$  – дійсне значення спаду напруги на вторинній обмотці трансформатора.

У другому півперіоді діод перебуває у стані непровідності. У цьому випадку до діода прикладається зворотна напруга – від катода до анода. Її можна визначити за формулою:

$$U_{зв} = U_m = 0,141U_2 = 3,14U_0,$$

У випадку перевищення зворотної напруги допустимого значення для даного діода стається електричний пробій діода. Тому при підбиранні діода для однопівперіодної схеми, необхідно забезпечити умову:

$$U_{зв.доп.} \geq U_{зв} = 3,14U_0,$$

де  $U_{зв.доп.}$  – максимальне допустиме значення зворотної напруги для вибраного діода. При невиконанні даної умови, беруть діод з вищими значеннями допустимої зворотної напруги, або підключають послідовно кілька однотипних діодів. Їх кількість можна визначити за формулою:

$$k = \frac{U_{зв}}{U_{зв.доп.}}.$$

При виборі діода не менш важливим є забезпечення умови:

$$I_{ср.} < I_{ср.доп.}.$$

де  $I_{ср.}$  – середнє значення струму;  $I_{ср.доп.}$  – допустиме середнє значення струму цього діода.

В однопівперіодній схемі  $I_{ср.} = I_0$ . Тому необхідно, щоб

$$I_{ср.доп.} \geq I_0.$$

Якщо дана умова не виконується, то підбирають діод з вищим значенням струму  $I_{ср.доп.}$  або підключають паралельно кілька однотипних діодів. Їх кількість визначають за формулою:

$$m = \frac{I_0}{I_{ср.доп.}}.$$

і заокруглюється до більшого цілого числа.

Величину пульсацій випрямленої напруги характеризують коефіцієнтом пульсацій  $K_n$ :

$$K_n = \frac{U_{nm}}{U_0}.$$

де  $U_{nm}$  – амплітуда змінної складової напруги амплітуди першої гармоніки.

$$U_{nm} = 1,75U_0, K_n = 1,75.$$

Така величина коефіцієнта пульсацій є основним недоліком однопівперіодної схеми випрямляча. Тому на практиці частіше використовують різні схеми двопівперіодних випрямлячів.

На рис. 13.2 показані схеми двопівперіодних випрямлячів з виводом від середини вторинної обмотки трансформатора рис. 13.2 і мостова схема рис. 13.3.

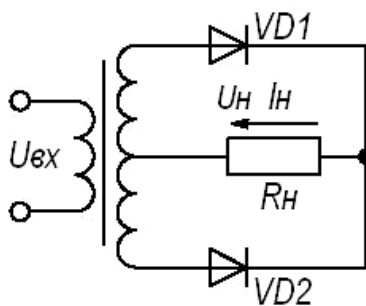


Рис. 13.2. Схема двопівперіодного випрямляча з виводом середньої точки вторинної обмотки трансформатора

Найбільш розповсюдженою є мостова схема (рис. 13.3) оскільки вона не потребує трансформатора. Під час кожного півперіоду струм послідовно протікає через діоди. Так під час першого півперіоду для додатної півхвилі вхідної напруги струм проходить через діоди VD1, VD3 (рис. 13.3, б), а під час другого півперіоду для від'ємної півхвилі вхідної напруги струм проходить через діоди VD2, VD4.

Постійну складову  $U_0$  вхідної напруги випрямляча можна визначити за формулою:

$$U_0 = \frac{2U_m}{\pi} = 0,636U_m = 0,9U_{ex}.$$

Зворотну напругу прикладену одночасно до двох діодів з різних плечей моста визначають за формулою:

$$U_{зв} = 1,41U_{ex}.$$

Коефіцієнт пульсацій випрямленої напруги визначають за формулою:

$$K_n = 0,667.$$

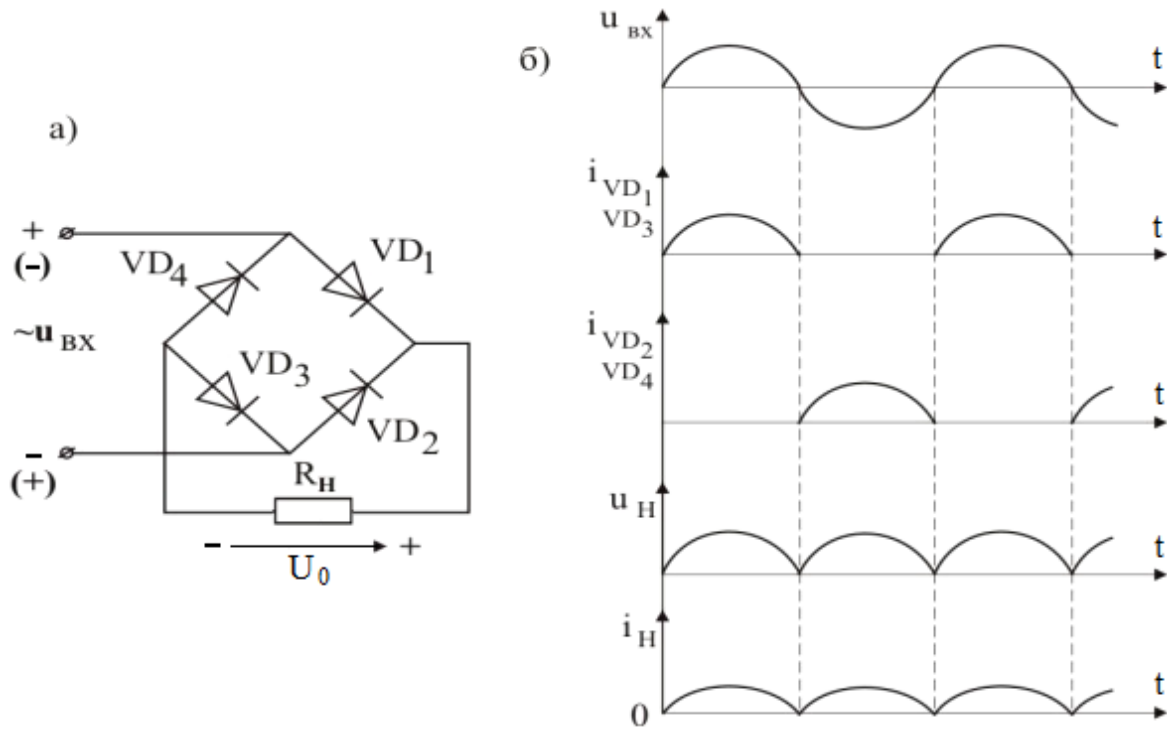


Рис. 13.3. Мостова схема випрямлення

Зворотне допустиме значення напруги:

$$U_{зв.доп.} = 1,57U_0.$$

Якщо використано діоди з меншою допустимою зворотною напругою, ніж у схемах виправлення, то потрібно застосувати послідовне з'єднання діодів.

**Стабілізатор напруги** – пристрій, який автоматично підтримує з заданою точністю напругу на навантаженні при дії дестабілізуючих факторів у заданих межах. Стабілізатори напруги за методом стабілізації поділять на параметричні, компенсаційні, компенсаційно-параметричні, а за способом включення регулюючого елемента – на послідовні, паралельні та змішані. Найбільшого поширення одержали параметричні та компенсаційні стабілізатори. Найпростіша схема параметричного стабілізатора на кремнієвому стабілітроні приведена на рис. 13.4, в якій стабілітрон включено паралельно до навантаження  $R_H$  і вихідна напруга  $U_H$  рівна напрузі стабілізації стабілітрона.

Характеристика стабілітрона (рис. 13.4, б) має робочу область  $\Delta = I_{ст. max} - I_{ст. min}$ , де  $I_{ст. max}$ ,  $I_{ст. min}$  – паспортні дані максимального та мінімального струму стабілітрона.

При вхідній номінальній напрузі  $U_{вх. ном.}$  значення вихідної напруги

стабілізатора становить  $U_{H.HOM.}$  (робоча точка  $A_0$ ) і через стабілітрон протікає струм  $I_{CT.HOM.}$ . При зміні вхідної напруги та при  $R_H = \text{const}$  відбувається зміщення робочої точки стабілітрона та змінюється струм через стабілітрон.

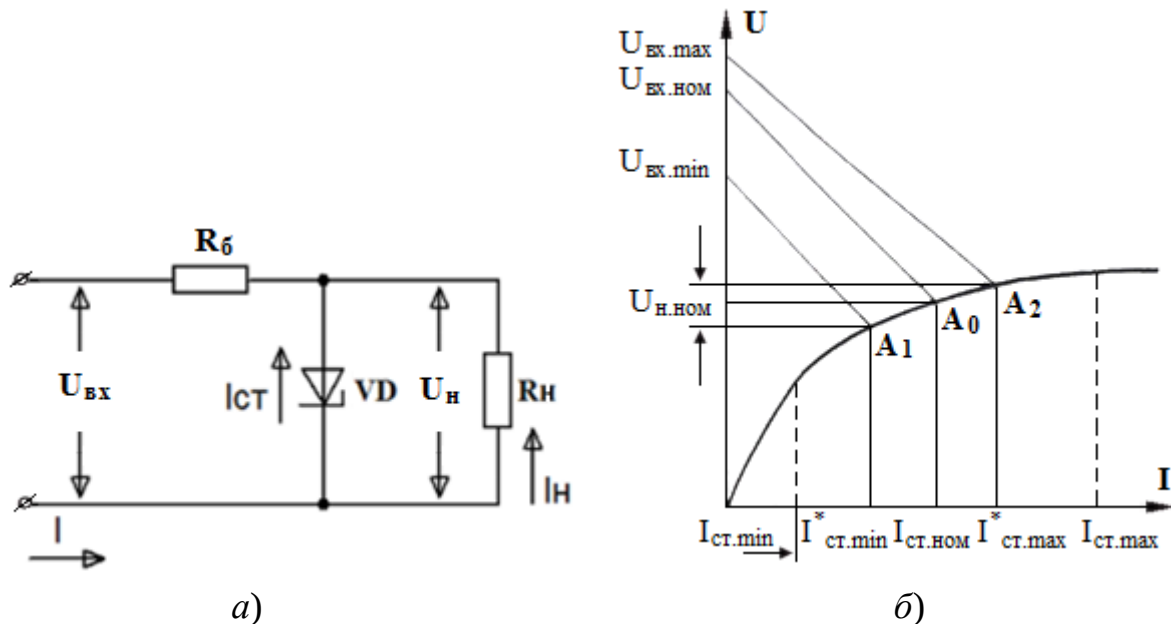


Рис. 13.4. Схема (а) та характеристика (б) найпростішого параметричного стабілізатора напруги

При збільшенні  $U_{вх}$  струм через стабілітрон збільшується, що приводить до збільшення спаду напруги на балансовому опорі  $R_б$ , в результаті чого вихідна напруга практично залишається постійною: при зменшенні  $U_{вх}$  струм стабілізації зменшується, що приводить до зменшення спаду напруги на  $R_б$ , в результаті чого вихідна напруга стабілітрона практично незмінна. Вибір типу стабілітрона проводять, виходячи з заданої напруги стабілізації. При виборі робочої точки стабілітрона необхідно врахувати, що мінімальний струм через стабілітрон  $I_{CT.min}^*$  має бути більшим від паспортного  $I_{CT.min}$ , а максимальний струм через стабілітрон  $I_{CT.max}^*$  повинен бути меншим від паспортного значення  $I_{CT.max}$ .

Величина опору балансного резистора:

$$R_б = \frac{U_{вх.min} - U_{H.max}}{I_{CT.min}^* + I_{H.max}}.$$

Збільшити коефіцієнт стабілізації даного стабілізатора можна шляхом збільшення  $R_б$  або шляхом послідовного включення стабілізаторів (рис. 13.5, а), при цьому напруга стабілізації VD1 має бути більшою від  $U_{CT} VD2$ . Для

одержання більшої напруги, ніж номінальне значення напруги стабілізації, використовують послідовне включення стабілітронів.

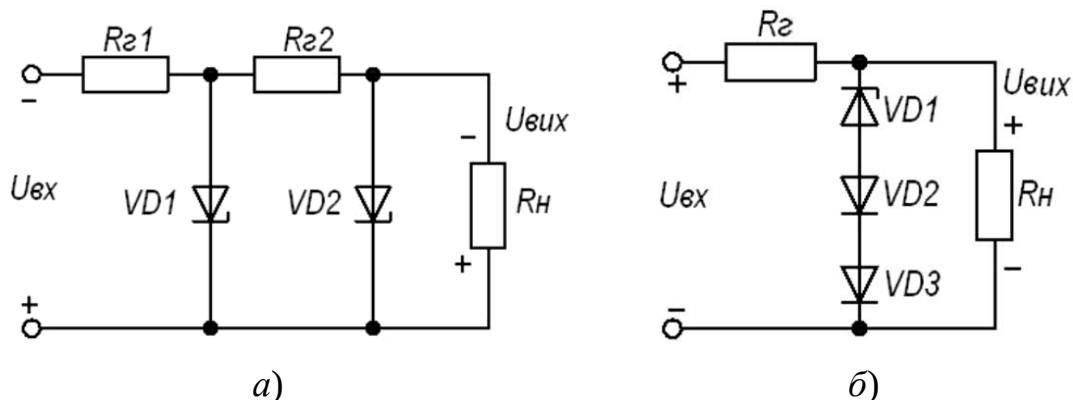


Рис. 13.5. Схеми включень: а) збільшення коефіцієнта стабілізації; б) підвищення напруги стабілізації.

### Основні параметри стабілізаторів [25]

1) коефіцієнт стабілізації за напругою:

$$k_{ст} = \frac{\Delta U_{ex} / U_{ex.ном}}{\Delta U_n / U_{n.ном}},$$

де  $U_{ex}$ ,  $U_n$  – абсолютні відхилення вхідної напруги та напруги в навантаженні від номінальних значень  $U_{ex.ном}$  і  $U_{вих.ном}$  відповідно;

2) коефіцієнт згладження пульсацій:

$$k_{зг} = \frac{P_{вх}}{P_{вих}},$$

де  $P_{вх}$ ,  $P_{вих}$  – коефіцієнти пульсацій на виході та вході стабілізатора відповідно;

3) вихідний опір:

$$R_{вих} = \frac{\Delta U_n}{\Delta I_n},$$

де  $U_n$  – зміна вихідної напруги стабілізації,  $I_n$  – зміна струму навантаження;

4) номінальна вихідна напруга:

$$U_{вих.ном} = U_n;$$

5) межа регулювання вихідної напруги:

$$U_{вих} = U_{n.max} - U_{n.min};$$

де  $U_{n.max}$  та  $U_{n.min}$  – верхнє і нижнє значення діапазону регулювання вихідної напруги;

б) номінальний струм навантаження  $I_H$  та межа його зміни:

$$\Delta I_H = I_{H, \max} - I_{H, \min},$$

де  $I_{H, \max}$ ,  $I_{H, \min}$  – верхнє та нижнє значення струму навантаження.

### 13.2. ХІД РОБОТИ

#### 1. Дослідження роботи випрямлячів.

1.1. Зібрати схему для дослідження однопівперіодного випрямляча (рис. 13.6, а).

1.2. Подати на вхід змінну напругу 6,3 В.

1.3. Підключити мультиметр С1-112 до входу й зарисувати форму вхідного сигналу, перемкнути на вихід (на опір  $R$ ) і зарисувати форму вихідного сигналу.

1.4. Зібрати схему для дослідження місткової схеми (рис. 13.6, б).

1.5. Зарисувати форми вхідного та вихідного сигналів.

#### 2. Дослідження роботи стабілітрона.

2.1. Зібрати схему для досліджень (рис. 13.6, в).

2.2. Змінюючи  $U_{BX}$  від 12 до 20 В з інтервалом 2 В визначити відповідні значення  $U_H$  при  $R_{\bar{\sigma}} = 82$  Ом.

Дані занести в табл. 13.1.

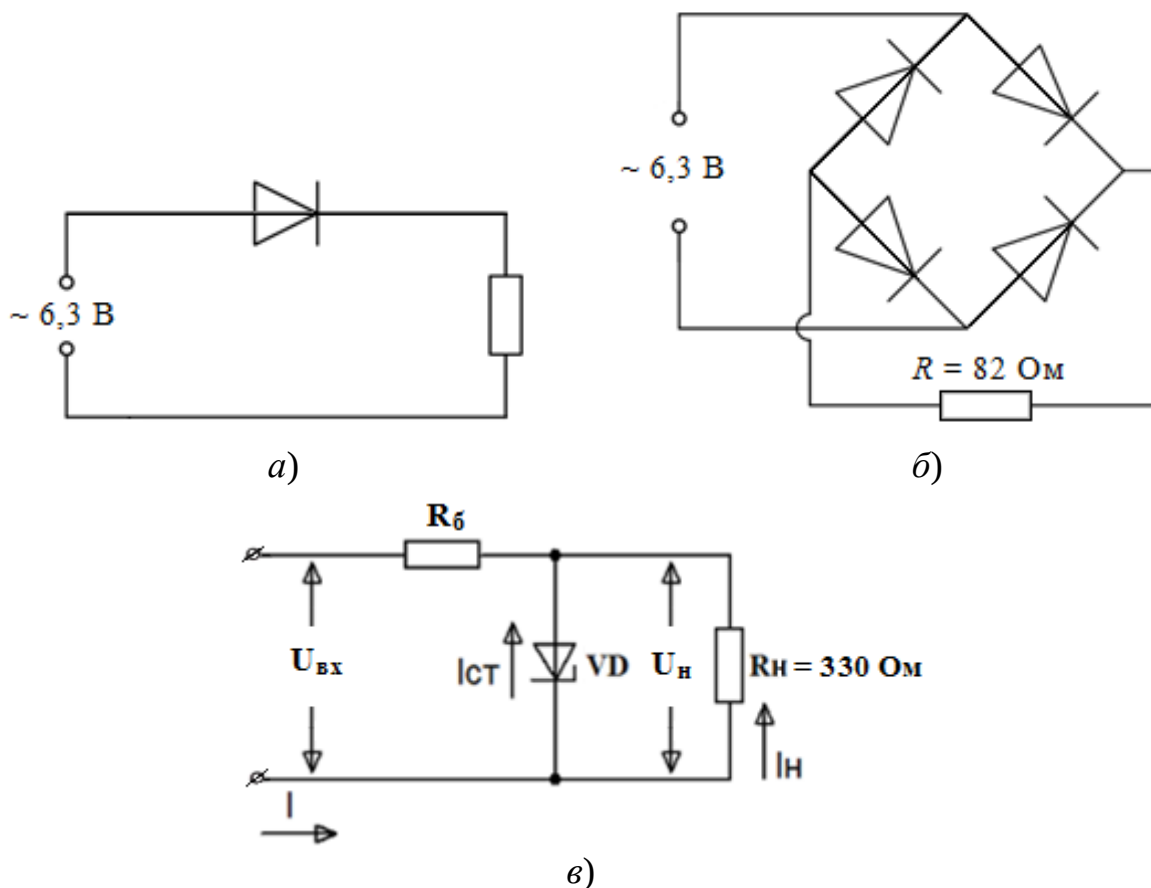


Рис. 13.6. Схема для досліджень роботи: а) однопівперіодного випрямляча; б) мостової схеми; в) найпростішого стабілітрона

2.3. За даними табл. 1 побудувати графік залежності  $U_{ст.} = U_n = f(U_{вх.})$ .

Визначити  $U_{н.ном.}$ ,  $U_{вх.}$ .

2.4. Визначити коефіцієнт стабілізації за формулою:

$$k_{ст} = \frac{\Delta U_{вх.}/U_{вх.ном.}}{\Delta U_n/U_{н.ном.}}$$

2.5. Змінити величину  $R_b$  на 160 Ом, повторити п. 2.3.-2.4.

2.6. Зробити висновки як змінилась величина  $R_{ст}$  зі змінною  $R_b$ .

Таблиця 13.1

Результати дослідження роботи випрямлячів

|               |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|---------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| $U_{вх.}$ , В | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| $U_n$ , В     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |

### 3.13. ПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

- 1.1. Що називається випрямлячем, які є види випрямлячів?
- 1.2. Схема та характеристики однопівперіодного випрямляча.
- 1.3. Які є схеми двопівперіодних випрямлячів?
- 1.4. Як працює мостова схема, її характеристики?
- 1.5. Що таке стабілізатор напруги? Які є їх види?
- 1.6. Принцип роботи та характеристика кремнієвого стабілізатора напруги.
- 1.7. Основні параметри стабілізаторів та шляхи їх покращення.

### 13.4. РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Гершунский Г.С. Основы электроники. К: Высшая школа, 1977. 344 с. С. 144-164.
2. Иванов И. И., Соловьев Г. И., Фролов В. Я. Электротехника и основы электроники: Учебник. 7-е изд., перераб. и доп. СПб.: Издательство «Лань», 2012. 736 с. С. 620-638.
3. Колонтаєвський Ю.П., Сосков А.Г. Електроніка і мікросхемотехніка: Підручник. 2-е вид. / За ред. А.Г. Соско- ва. К.: Каравела, 2009. 416 с. С. 20-31.

4. Харченко В.М. Основы электроники. Учебн. пособ. Для техникумов. М.: Энергоиздат, 1982. 352 с. С. 121-140.

## Лабораторна робота № 14

### ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ТРАНЗИСТОРІВ

**Мета:** ознайомлення з принципом дії, будовою, схемами включення та характеристиками біполярних та уніполярних (польових) транзисторів.

**Прилади та обладнання:** транзистори, блоки живлення, амперметри, вольтметри.

#### 14.1. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

**Транзистор** (напівпровідниковий тріод) – активний елемент, який забезпечує підсилення вхідного сигналу потужності. Транзистор має три виводи: колектор (К), емітер (Е), базу (Б) (рис. 14.1). Структура містить два *p-n*-переходи: колекторний та емітерний. Транзистори застосовуються всюди, де необхідне підсилення сигналів, наприклад, у радіоприймачах, телевізорах, електронній апаратурі, автоматичних пристроях тощо [21].

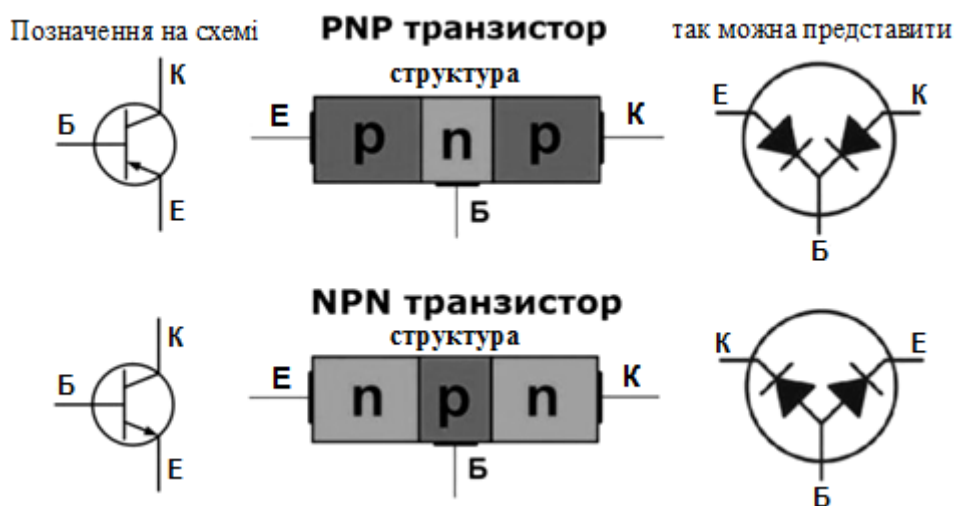


Рис. 14.1. Структура транзистора та позначення на схемі

Залежно від провідності емітера, бази, колектора використовується два типи транзисторів: *n-p-n* і *p-n-p*. На рис. 14.1 їх показано разом зі схемними позначеннями. Обидва ці типи транзисторів мають один і той же принцип дії та однакові підсилювальні властивості, але різняться лише полярністю джерел живлення. При цьому полярність джерел живлення така, що емітерний перехід

включений завжди в прямому напрямку, а колекторний у зворотному. Біполярний транзистор проявляє підсилювальні властивості в трьох видах схем, які відрізняються способом включення транзистора: зі спільним емітером (СЕ), спільною базою (СП) і спільним колектором (СК) (рис. 14.2).

На практиці використовують три основні схеми, оскільки кожна з них має свої недоліки та переваги [21].

1. У схемі зі спільним емітером (СЕ) вхідний сигнал діє між базою й емітером, а напруга підключена між колектором та емітером (рис. 14.2, а). Ця схема підсилює за напругою та за струмом і на практиці використовується найчастіше. І вихідний і вхідний опір дуже великі.

2. У схемі зі спільною базою (СБ) (рис. 14.2, б) вхідний сигнал діє між емітером і базою навантаження підключене між колектором і базою. Ця схема підсилює не лише за потужністю, а і має великий вхідний та вихідний опори.

3. У схемі зі спільним колектором (СК), її ще називають емітерний повторювач, вхідний сигнал поступає на керований перехід емітер-база, проходячи через навантаження, яке вмикається між емітером і колектором (рис. 14.2, в). Це схема підсилення за струмом. Її вхідний опір великий, а вихідний малий.

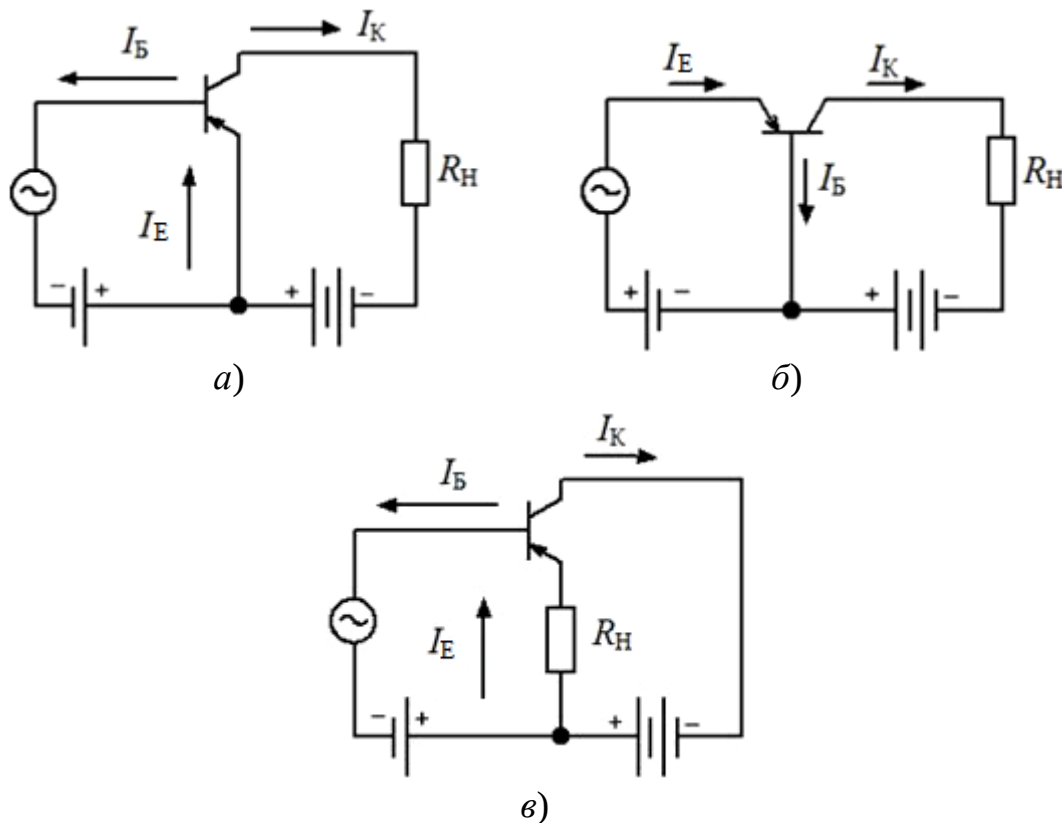


Рис. 14.2. Схеми включення транзисторів: а) зі спільним емітером; б) зі спільною базою; в) зі спільним колектором

Зв'язок між напругою і струмами на вході й виході транзистора виражають графічні характеристики, які ще називають статистичними характеристиками. Вони роблять процеси наочними та дають можливість швидко й легко визначити величину цих напруг і струмів.

Вхідні характеристики визначають зв'язок між вхідною напругою та вхідним струмом.

У схемі зі СЕ вхідні характеристики виражають залежність базового струму  $I_b$  від прикладеної між базою й емітером напруги  $U_{be}$  (при заданому  $U_{ce}$ ).

Для зняття характеристик використовується схема приведена на рис. 14.3, де за допомогою потенціометра  $R$  регулюється вхідна напруга та вимірюється вхідний струм  $I_b$ .

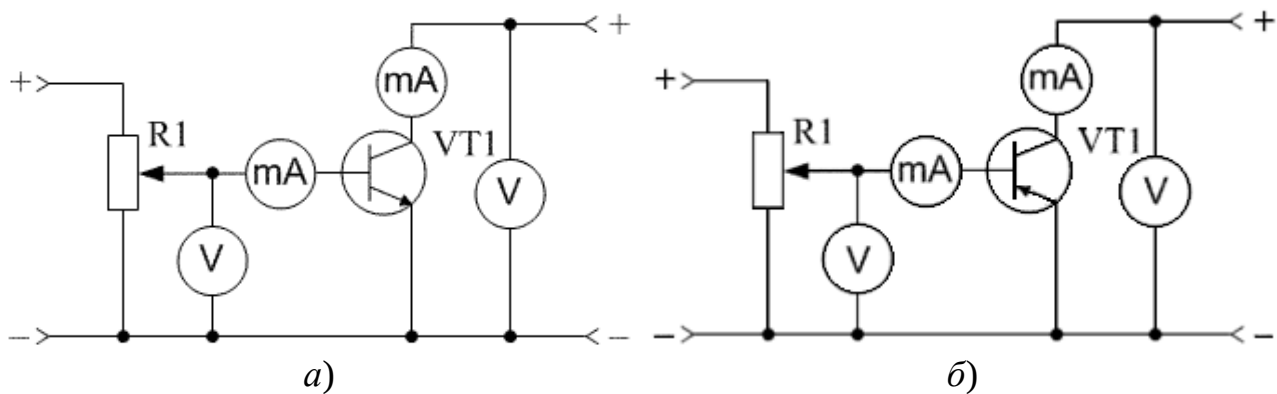


Рис. 14.3. Схеми для зняття характеристик біполярних транзисторів: а)  $n-p-n$ -типу; б)  $p-n-p$ -типу

На рис. 14.4 зображено вхідні характеристики для германієвого ( $p-n-p$ ) та кремнієвого ( $n-p-n$ ) транзисторів. Видно, що вони подібні на характеристики діодів і є нелінійними. За схемою з СЕ напруга база-емітер у германієвих транзисторах не перевищує 0,43 В, а в кремнієвих – 0,88 В.

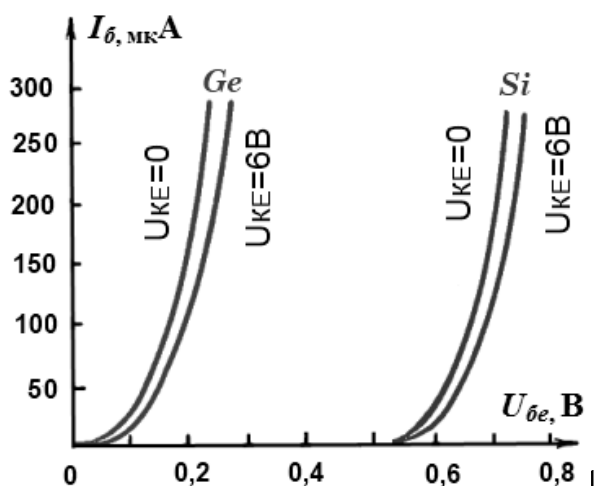


Рис. 14.4. Характеристики для германієвого ( $p-n-p$ ) та кремнієвого ( $n-p-n$ ) транзисторів

При перевищенні цих напруг струми, що проходять через транзистор, можуть стати недопустимо великі та призведуть до виходу транзистора з ладу.

Вихідні характеристики дають кількісний зв'язок між трьома основними величинами транзистора: струмом бази, струмом колектора й колекторною напругою. Для схеми зі СЕ вони виражають залежність колекторного струму  $I_K$ , від вихідної напруги  $U_{ке}$  (при певному струмі  $I_B$ ). Для зняття цих характеристик використовується схема рис. 14.5. На цьому ж рисунку зображено сімейство вихідних характеристик, де кожна відповідає певному струму бази.

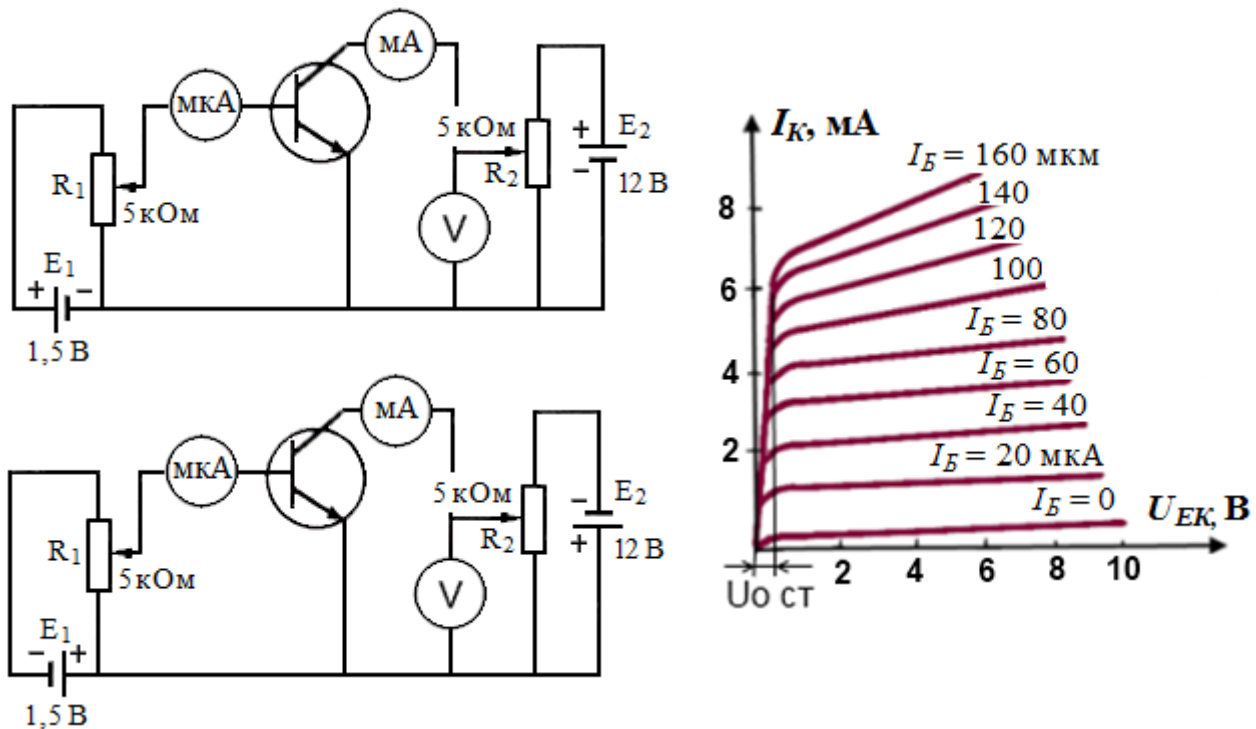


Рис. 14.5. Вихідні статичні характеристики в схемі СЕ (б) та схеми для зняття цих характеристик (а)

Вихідні характеристики також нелінійні. Їх особливість у тому, що при малих напругах (не більше 0,4-0,83 В) колекторний струм швидко зростає, після чого він практично не залежить від колекторної напруги, а залежить лише від базового струму.

Іншими словами, якщо буде потрібно збільшити колекторний струм даного транзистора, то домогтись цього можна не збільшенням колекторної напруги, а збільшенням базового струму.

Основними показниками транзисторного підсилюючого каскаду при будь-якій схемі включення транзистора є:

1. Коефіцієнт підсилення за струмом:

$$K_I = \Delta I_{\text{вих}} / \Delta I_{\text{вх}}.$$

2. Коефіцієнт підсилення за напругою:

$$K_U = \Delta U_{\text{вих}} / \Delta U_{\text{вх}}.$$

3. Коефіцієнт підсилення за потужністю:

$$K_P = K_I K_U.$$

4. Вхідний опір:

$$R_{\text{вх}} = \Delta U_{\text{вх}} / \Delta I_{\text{вх}}.$$

Крім цього, транзистор, як і будь-який інший електронний прилад, характеризується рядом експлуатаційних параметрів, критичні значення яких вказують на можливості застосування того чи іншого транзистора.

До таких параметрів відносять [21]:

1. Максимально допустиму потужність розсіяння на колекторі ( $P_{\text{к max}}$ ).

2. Максимально допустимий струм через колектор  $I_{\text{к}}$ . Його перевищення призводить до теплового пробою колекторного переходу та виходу транзистора з ладу.

3. Максимально допустимий спад напруги між колектором і спільним електродом транзистора  $U_{\text{ке max}}$  або  $U_{\text{кб max}}$  – напруга пробою переходу. Вона залежить струму через колектор, потужності та температури навколишнього середовища.

4. Гранична частота підсилення за струмом ( $f_{\alpha}$  або  $f_{\beta}$ ) – частота, при якій коефіцієнт підсилення за струмом ( $\alpha$  або  $\beta$ ) зменшується до 0,7 від свого значення на нижчих частотах.

### **Польовий (уніполярний) транзистор**

**Польові транзистори** – це активні напівпровідникові прилади, в яких за допомогою електричного поля керують вихідним струмом (у біполярних транзисторах – вхідним струмом). Польові транзистори називають також уніполярними, оскільки в них протікання електричного струму забезпечується лише одним видом носіїв. Польові транзистори поділяють на дві групи [25]:

1. Польові транзистори з *p-n*-переходами (канальні або уніполярні).

2. Польові транзистори з ізольованим затвором (МОН- або МДН-

транзистори).

На рис. 14.6 приведено схематичне зображення та включення в електричне коло польового транзистора з  $p$ - $n$ -переходами.

Тонкий шар напівпровідника типа  $n$  (або  $p$ ) обмежений з двох сторін електронно-дірковими переходами, називається *каналом*.

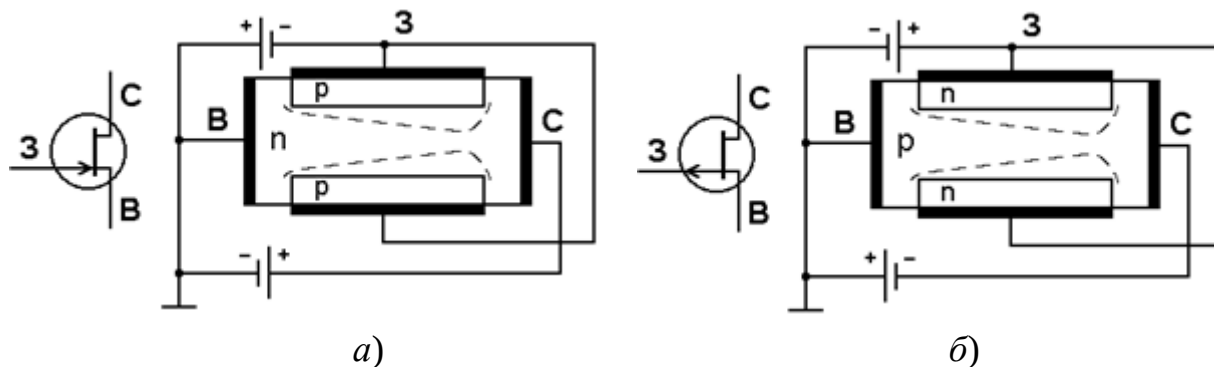


Рис. 14.6. Умовні позначення та схеми включення польових транзисторів з  $p$ - $n$ -переходами: а) канал  $n$ -типу; б) канал  $p$ -типу

Принцип дії транзисторів з каналом типу  $n$  або  $p$  подібний, різниця полягає лише в полярності напруги джерела.

Включення каналу в електричне коло забезпечується за допомогою двох омичних електродів, один з яких називається *витком*, а другий *стоком*.

Вивід під'єднаний до областей  $p$ -типу є управляючим електродом і називається *затвором*.

Величина струму, який протікає через канал польового транзистора залежить від напруги прикладеної між витком і стоком, опору навантаження  $R_n$ , та від'ємної напруги на затворі  $U_z$ . Будова МОН (МДН) транзистора приведена на рис. 14.7.

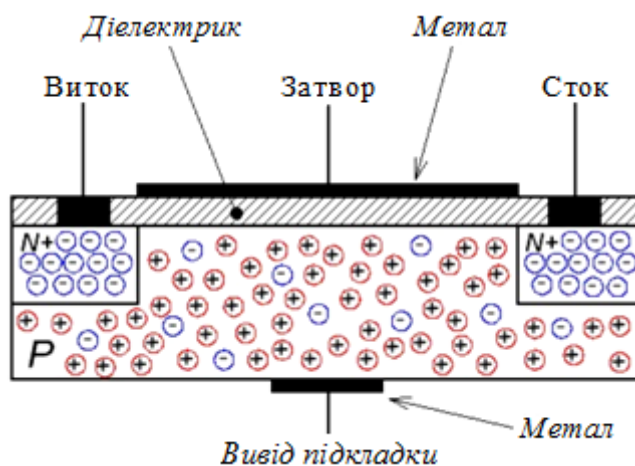


Рис. 14.7. Схема польового транзистора

Прикладаючи до затвору напругу певної полярності канал польового транзистора може збіднюватися або збагачуватися носіями заряду (електронами). Зокрема, при прикладанні від'ємної напруги до затвору електрони провідності з області каналу виштовхуються в об'єм напівпровідника підкладки. Таким чином канал стає збідненим носіями, що призводить до зменшення струму в ньому. Наявність додатної напруги на затворі сприяє витягуванню електронів з підкладки в канал. Таким чином реалізовується так званий режим збагачення при якому струм в каналі зростає.

Характеристики обох видів польових транзисторів приведено на рис. 14.8. та рис. 14.9.

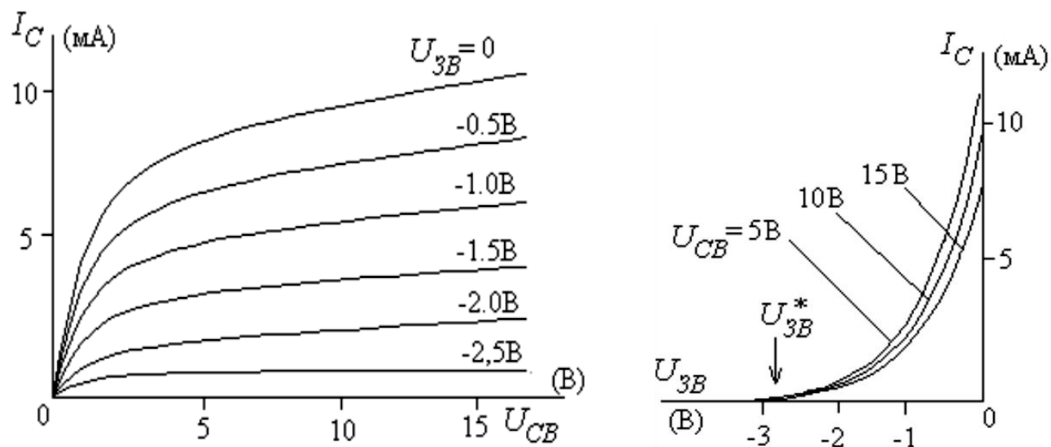


Рис. 14.8. Характеристики польового транзистора з  $p-n$ -переходами: а) вихідні (витоківі) характеристики; б) виток-затворна характеристика

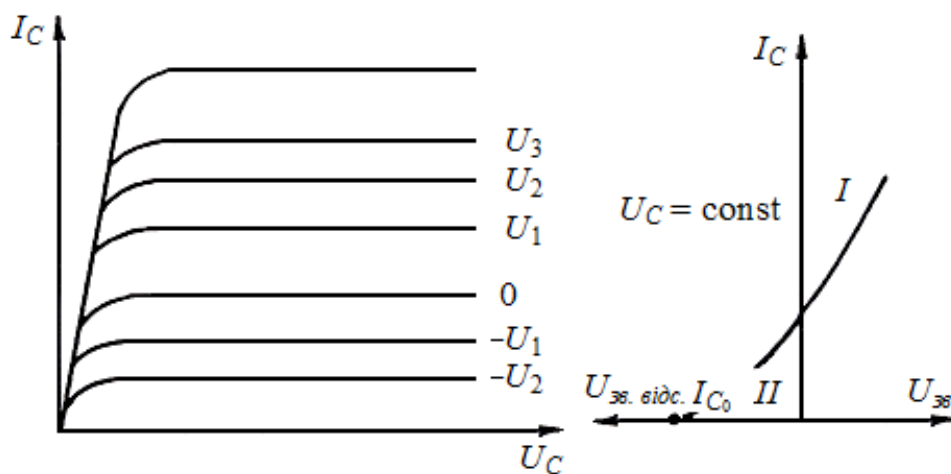


Рис. 14.9. Витоківі (а) та виток-затворна (б) характеристики польового транзистора з ізолюваним затвором:  $I$  – режим збагачення;  $II$  – режим

За аналогією з біполярними використовуються також три схеми включення польових транзисторів (рис. 14.10).

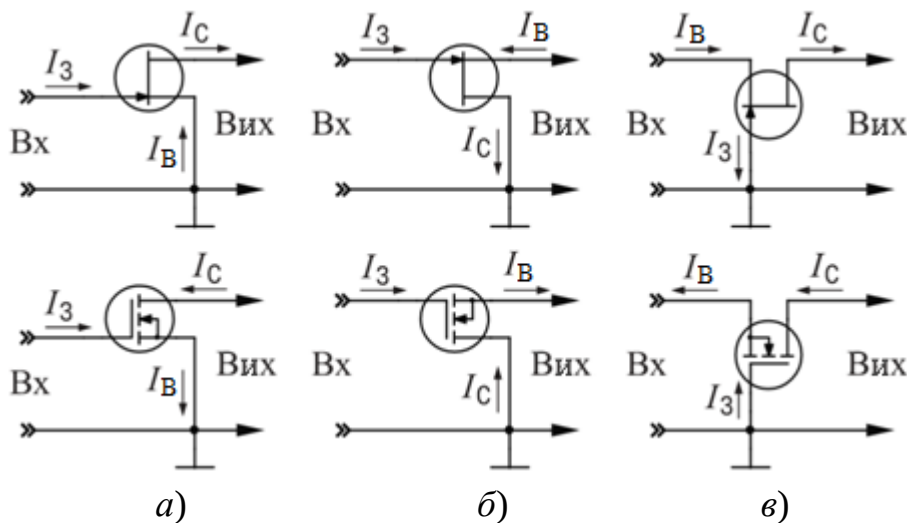


Рис. 14.10. Схемні включення польових транзисторів: а) зі спільним витоком; б) зі спільним стоком; в) зі спільним затвором

Основні параметри та переваги польових транзисторів такі [25]:

1. Крутизна характеристики:

$$S = \Delta I_c / \Delta U_{зв} \text{ при } U_c = \text{const.}$$

2. Напруга відсікання  $U_{зв \text{ відс}}$  – зворотна напруга на затворі при якій струмопровідний канал буде перекритим.

3. Вхідний опір  $R_{вх}$  між затвором і витоком:

$$R_{вх} = \Delta U_{зв \text{ max}} / \Delta I_{з \text{ max}} .$$

4. Вихідний опір  $R_{вих}$  (у режимі насичення):

$$R_{вих} = \Delta U_c / \Delta I_c \text{ при } U_{зв} = \text{const.}$$

Польові транзистори мають такі переваги:

1. Великий вхідний опір ( $10^6 - 10^9$  Ом для транзисторів з  $p-n$ -переходом і  $10^{13} - 10^{15}$  Ом – з ізольованим затвором).
2. Низький рівень власних шумів.
3. Висока стійкість проти температурної та радіаційної дії.
4. Висока густина розташування елементів в інтегральних мікросхемах.

## 14.2. ХІД РОБОТИ

*1. Вивчення вхідної характеристики транзистора.*

1.1. Зібрати схему вивчення вхідних характеристик транзистора (рис. 14.11).

1.2. Повертаючи ручку потенціометра на 1 кОм, встановити напругу між базою та емітер  $U_{бе} = 0$  В.

1.3. Змінюючи напругу  $U_{бе}$  за допомогою потенціометра від 0 до 0,5 В з кроком 0,1 В та від 0,5 до 0,7 з кроком 0,02 для кожного значення  $U_{бе}$  виміряти відповідне йому значення  $I_b$ . Результати вимірювань занести в табл. 14.1.

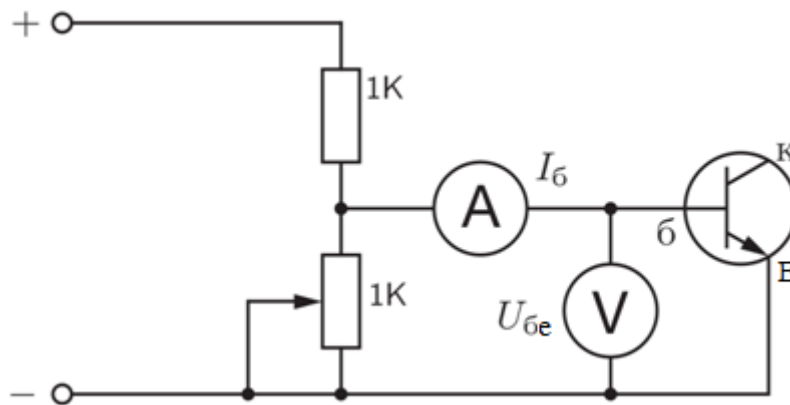


Рис. 14.11. Схема вивчення вхідної характеристики транзистора

1.4. Побудувати графік залежності  $I_b$  від  $U_{бе}$ . З графіка визначити значення порогу спрацювання (напруги, при перевищенні якої починається різке збільшення сили струму).

*2. Вивчення перехідної характеристики транзистора.*

2.1. Зібрати схему вивчення перехідних характеристик транзистора (рис. 14.12).

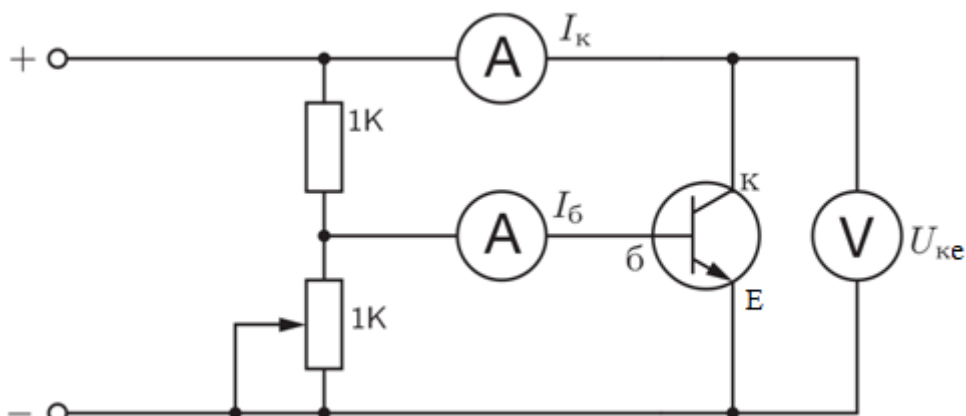


Рис. 14.12. Схема вивчення перехідної характеристики транзистора

2.2. Записати значення напруги між колектором та емітером  $U_{ке}$ .

2.3. Повертаючи ручку потенціометра на 1 кОм, досягнути мінімального струму бази  $I_{\delta}$ .

2.4. За допомогою потенціометра збільшувати струм бази з кроком 0,1 мА, для кожного  $I_{\delta}$  виміряти відповідне значення струму колектора  $I_{\kappa}$ . Результати вимірювань занесіть в таблицю.

2.5. Побудувати графік залежності  $I_{\kappa}$  від  $I_{\delta}$ . З графіка визначити коефіцієнт підсилення біполярного транзистора за струмом  $\beta = I_{\kappa}/I_{\delta}$  для початкової та кінцевої ділянок характеристики.

### 3. Вивчення вихідної характеристики транзистора

3.1. Зібрати схему вивчення вихідних характеристик транзистора (рис. 14.13). Для цього замінити в схемі для попереднього завдання потенціометр на 1 кОм резистором на 46 кОм і додати в коло колектора потенціометр на 200 Ом.

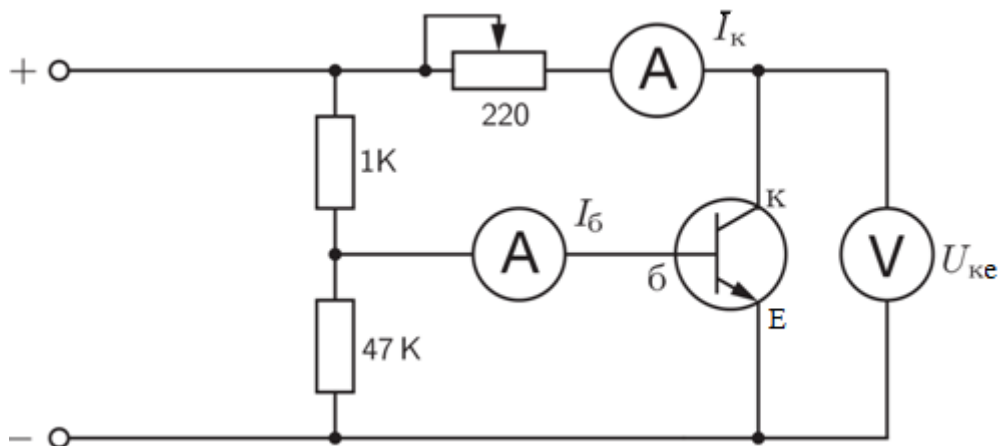


Рис. 14.13. Схема вивчення вихідної характеристики транзистора

3.2. Записати значення струму бази  $I_{\delta}$ .

3.3. Повертаючи ручку потенціометра на 220 Ом, досягнути мінімальної напруги між колектором та емітером  $U_{ке}$ .

3.4. За допомогою потенціометра збільшувати струм колектора з кроком приблизно 50 мА, для кожного  $I_{\kappa}$  виміряти відповідне значення  $U_{ке}$ . Результати вимірювань занесіть в таблицю.

3.5. Побудувати графік залежності  $I_{\kappa}$  від  $U_{ке}$ . З графіка знайти максимальне значення потужності, яка виділяється на транзисторі  $P = U_{ке} \cdot I_{\kappa}$ .

### 14.3. ПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

1.  $P$ - $n$ -перехід у напівпровідниках.
2. Інжекція носіїв струму. Концепція дифузійної довжини носіїв.
3. Будова та принцип дії транзистора.
4. Роль емітера, бази та колектора.
5. Позначення на схемах транзисторів  $p$ - $n$ - $p$  та  $n$ - $p$ - $n$  типів.
6. Статичні характеристики транзистора та визначення за ними його параметрів.

### 14.4. РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Ефимчик М. К., Шушкевич С. С. Основы радиоэлектроники: Для физ. спец. ун-тов. 2-е изд., перераб. и доп. Минск: изд-во «Университетское», 1986. 303 с. С. 77-85.
2. Колонтаєвський Ю.П., Сосков А.Г. Електроніка і мікросхемотехніка: Підручник. 2-е вид. / За ред. А.Г. Соскова. К.: Каравела, 2009. 416 с. С. 31-55.
3. Харченко В.М. Основы электроники. Учебн. пособие для техникумов. М.: Энергоиздат, 1982. 352 с. С. 55-95.

### Список використаних літературних джерел

1. Правила надання першої допомоги при ураженні електричним струмом. URL: <https://lviv.dsp.gov.ua/operatyvna-informatsiia/novyny/pravyla-nadannia-pershoi-dopomohy-pry-u/>
2. Будіщев М.С. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка. Львів: «Афіша», 2001. 424 с.
3. Паначевний Б. І. Загальна електротехніка. Теорія і практикум: підручник. Київ: Каравела, 2004. 300 с.
4. Матвійчук А.Я., Стінянський В.Л. Електротехніка: навчально-методичний посібник. Вінницький державний педагогічний університет ім. М. Коцюбинського. Вінниця, 2017. 270 с.
5. ДСТУ 3120-95 Електротехніка. Літерні позначення основних величин. URL: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=68355](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=68355)
6. ДСТУ 2815-94 Електричні й магнітні кола та пристрої. Терміни та визначення. URL: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=60356](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=60356)
7. ДСТУ 2843-94 Електротехніка. Основні поняття. Терміни та визначення. URL: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=60106](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=60106)
8. Електровимірювальні прилади та електричні вимірювання. URL: <https://studfile.net/preview/9705642/>
9. ГОСТ 8.401-80 Державна система забезпечення єдності вимірювань. Класи точності засобів вимірювань. Загальні вимоги. URL: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=66211](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=66211)
10. Курс загальної фізики. Електрика і магнетизм. Навчальний посібник. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2010. 516 с.
11. Астапенко Э.С. Электротехника. Однофазные и трехфазные цепи переменного тока. Учебное пособие. Томск: ТГАСУ, 2016. 65 с.
12. Ашанин В.Н., Регеда О.Н. Трехфазные цепи: учеб. пособие. Пенза: Изд-во ПГУ, 2016. 52 с.
13. Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники. Линейные электрические цепи: учеб. пособие. Санкт-Петербург: Лань, 2010. 124 с.
14. Теоретические основы электротехники: учеб. для вузов / К.С. Демирчян, Л.Р. Нейман, Н.В. Коровкин, В.Л. Чечурин. 4-е изд. Санкт-Петербург: Питер, 2006. 386 с.

15. Афанасьева Н.А., Булат Л.П. Электротехника и электроника: Учеб. пособие. СПб.: СПбГУНИПТ, 2010. 181 с.
16. Трансформаторы тока / В.В. Афанасьев, Н.М. Адоньев, В.М. Кибель и др. 2-е изд., перераб. и доп. Ленинград: Энергоатомиздат, 1989. 416 с.
17. Мартынов А.А. Трансформатор для вторичных источников питания. Учебн. пособие. Санкт-Петербург: СПбГУАП, 2001. 50 с.
18. Электротехнические аппараты высокого напряжения: учебник для ВУЗов / под ред. Г.Н. Александрова. 2-е изд., доп. Санкт-Петербург: Изд-во СПбГПУ, 2000. 540 с.
19. Грабко В.В., Розводюк М.П., Левицкий С.М. Експериментальні дослідження електричних машин. Частина IV. Трансформатори. Навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2008. 219 с.
20. Сергеевков Б.Н. Электрические машины. Трансформаторы. Москва: Высшая школа, 1959. 428 с.
21. Ефимчик М.К., Шушкевич С.С. Основы радиоэлектроники: Для физ. спец. ун-тов. 2-е изд., перераб. и доп. Минск: изд-во «Университетское», 1986. 303 с.
22. Колонтаєвський Ю.П., Сосков А.Г. Електроніка і мікросхемотехніка: Підручник. 2-е вид. / За ред. А.Г. Соскова. К.: Каравела, 2009. 416 с.
23. Гершунский Г.С. Основы электроники. К: Высшая школа, 1977. 344 с.
24. Иванов И. И., Соловьев Г. И., Фролов В. Я. Электротехника и основы электроники: Учебник. 7-е изд., перераб. и доп. СПб.: Издательство «Лань», 2012. 736 с.
25. Харченко В.М. Основы электроники. Учебн. пособ. Для техникумов. М.: Энергоиздат, 1982. 352 с.

## ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК

### **А**

*Абсолютна похибка приладу, 13*

### **В**

*Варіація показів приладу, 14*

*Відносна похибка приладу, 13*

*Вітка, 8*

### **Д**

*Диференційний метод, 12*

*Добротність контуру, 47*

*Додаткова похибка, 12*

### **Е**

*Електровимірювальні прилади, 10*

*Електровимірювання, 10*

*Електрична схема, 8*

*Електричне коло, 8*

### **З**

*Затухання контуру, 47*

*Зведена похибка приладу, 14*

*З'єднання споживачів зіркою, 52*

*З'єднання споживачів  
трикутником, 60*

### **К**

*Коефіцієнт корисної дії лінії  
передачі, 26*

*Коефіцієнт корисної дії  
трансформатора, 72*

*Коефіцієнт поверхневого  
ефекту, 18*

*Коефіцієнт трансформації, 69*

*Контур, 8*

### **М**

*Міри, 10*

### **Н**

*Напівпровідниковий діод, 90*

*Несиметричні трифазні кола, 52*

*Нульовий метод, 12*

### **О**

*Основна похибка, 12*

### **П**

*Польовий транзистор, 113*

*Поправка приладу, 13*

### **Р**

*Резонанс напруг, 37*

*Резонансом струмів, 45*

*Резонансна частота, 37*

*Режим короткого замикання, 26, 70*

*Режим узгодження, 27*

*Режим холостого ходу, 27, 69*

### **С**

*Симетричні трифазні кола, 52*

*Смуга пропускання, 83*

*Стабілізатор напруги, 104*

### **Т**

*Трансформатор, 67*

*Транзистор, 109*

### **Ф**

*Фазометр, 30*

*Фільтр електричний, 83*

### **Х**

*Характеристичний опор контуру, 47*

### **Ч**

*Частота зрізу, 83*

Навчальне видання

Павловський Юрій Вікторович  
Пагута Мирослав Вікторович

## **Лабораторний практикум з електротехніки та електроніки**

НАВЧАЛЬНО-МЕТОДИЧНИЙ ПОСІБНИК

Головний редактор  
*Ірина Невмержицька*

Технічний редактор  
*Наталія Кізіма*

Комп'ютерний набір  
*Юрій Павловський*

Здано до набору 05.05.22 р. Підписано до друку 18.05.22 р. Формат 60×84/16. Папір офсетний. Гарнітура Times. Наклад 50 прим. Ум. друк. арк. 8,0. Зам. № 19.

Редакційно-видавничий відділ Дрогобицького державного педагогічного університету імені Івана Франка (Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до державного реєстру видавців, виробників і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 2155 від 12.04.2005 р.) 82100, м. Дрогобич, вул. І.Франка, 24, кім. 43, тел. (0324) 42-23-78