

Міністерство освіти і науки України  
Житомирський державний університет імені Івана Франка

**Інструктивно-методичні матеріали**  
**до лабораторних робіт**  
**з електротехніки**

Житомир  
Вид-во ЖДУ імені Івана Франка  
2024

УДК 539.12.01  
ББК 22.3  
Г-54

*Рекомендовано до друку вченою радою Житомирського державного  
університету імені Івана Франка  
(протокол № 5 від 29.03.2024 р.)*

***Рецензенти:***

**Віктор Сліпокуров** – кандидат технічних наук, науковий співробітник відділу ІЧ та ТГц електроніки Інституту фізики напівпровідників ім. В.Є Лашкарьова;

**Юрій Доготар** – методист лабораторії упровадження освітніх інновацій (методика навчання фізики та астрономії), КЗ «Житомирський ОППО» ЖОР;

**Олександр Кривонос** – кандидат педагогічних наук, доцент кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій Житомирського державного університету імені Івана Франка.

Інструктивно-методичні матеріали до лабораторних робіт з електротехніки / Уклад.: С. А. Бондар, А. В. Зіновчук, П. П. Корнійчук, В. А. Нестеров, Ю.П. Бендес – Житомир: Вид-во ЖДУ ім. І. Франка, 2024. – 104 с.

Методичні рекомендації до організації лабораторних робіт з освітньої компоненти «Основи електротехніки і радіотехніки» укладено для використання здобувачами першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 014 “Середня освіта”, предметної спеціальності 014.08 “Середня освіта (Фізика та астрономія)”. Надаються рекомендації щодо проведення лабораторних робіт з електротехніки, обробки експериментальних результатів електротехнічних вимірювань, теоретичного аналізу отриманих результатів та формування здатності розв’язувати складні задачі електротехніки.

Методичні рекомендації призначені для викладачів ЗВО та здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти.

## Зміст

<i>Вступ</i>	.....4
<i>Лабораторна робота №1. Дослідження шунтового генератора постійного струму.</i>	.....5
<i>Лабораторна робота №2. Дослідження роботи трифазного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором.</i>	.....14
<i>Лабораторна робота №3. Дослідження трифазного кола змінного струму при з'єднанні споживачів «зіркою».</i>	.....25
<i>Лабораторна робота №4. Дослідження трифазного кола змінного струму при з'єднанні споживачів «трикутником».</i>	.....32
<i>Лабораторна робота №5. Вивчення електровимірювальних приладів.</i>	.....36
<i>Лабораторна робота №6. Вивчення індукційного лічильника електричної енергії та перевірка його роботи.</i>	.....45
<i>Лабораторна робота №7. Дослідження роботи колекторного електродвигуна на змінному струмі.</i>	.....50
<i>Лабораторна робота №8. Дослідження нерозгалуженого кола змінного струму з індуктивністю та активним опором, з ємністю та активним опором.</i>	.....61
<i>Лабораторна робота №9. Дослідження нерозгалуженого кола змінного струму з індуктивністю, ємністю та активним опором (резонанс напруг).</i>	.....68
<i>Лабораторна робота №10. Дослідження кола змінного струму при паралельному з'єднанні індуктивності та ємності (резонанс струмів).</i>	.....73
<i>Лабораторна робота №11. Дослідження однофазного трансформатора.</i>	.....80
<i>Лабораторна робота №12. Дослідження ферорезонансного стабілізатора напруги.</i>	.....89
<i>Лабораторна робота №13. Вивчення та дослідження магнітного підсилювача струму.</i>	.....95
<i>Список рекомендованої літератури</i>	.....103

## Вступ

У методичних рекомендаціях розглянуті питання організації проведення першої частини лабораторних робіт з освітньої компоненти “Основи електротехніки та радіотехніки”, що викладається для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти предметної спеціальності 014.08 “Середня освіта (Фізика та астрономія)”. Метою рекомендацій є формування практичних знань про фізичні процеси, що протікають в електромагнітних приладах, розвиток уявлень про будову і принципи дії електричних приладів, а також ознайомлення здобувачів з основними властивостями типових електричних кіл. Посібник містить детальні інструкції для викання 13 лабораторних робіт, які охоплюють основні принципи роботи важливих електротехнічних пристроїв та машин. Завдання даного посібника – допомогти майбутнім фахівцям спеціальності засвоїти такі основні питання з електротехніки:

- основні види електровимірювальних приладів, їх призначення, будова і принцип дії;
- будова, принцип дії та розрахунок основних параметрів трансформаторів;
- будова і принцип дії синхронних машин;
- будова, принцип дії колекторного електродвигуна на змінному струмі.
- принцип дії та розрахунок основних параметрів шунтового генератора постійного струму;
- методи розрахунку електричних кіл постійного і змінного струмів;
- особливості розрахунку параметрів трифазних систем змінного струму;
- побудова векторних діаграм електричних кіл, приладів і машин.

Оскільки дане видання орієнтоване на підготовку фахівців предметної спеціальності “Середня освіта (Фізика та астрономія)”, то значна увага в ньому приділялася ряду важливих питань загальної фізики, які є основою для роз’яснення принципів роботи типових електротехнічних приладів.

## Лабораторна робота №1

### Дослідження шунтового генератора постійного струму.

**Мета роботи:** Вивчити будову шунтового генератора та дослідити його основні характеристики.

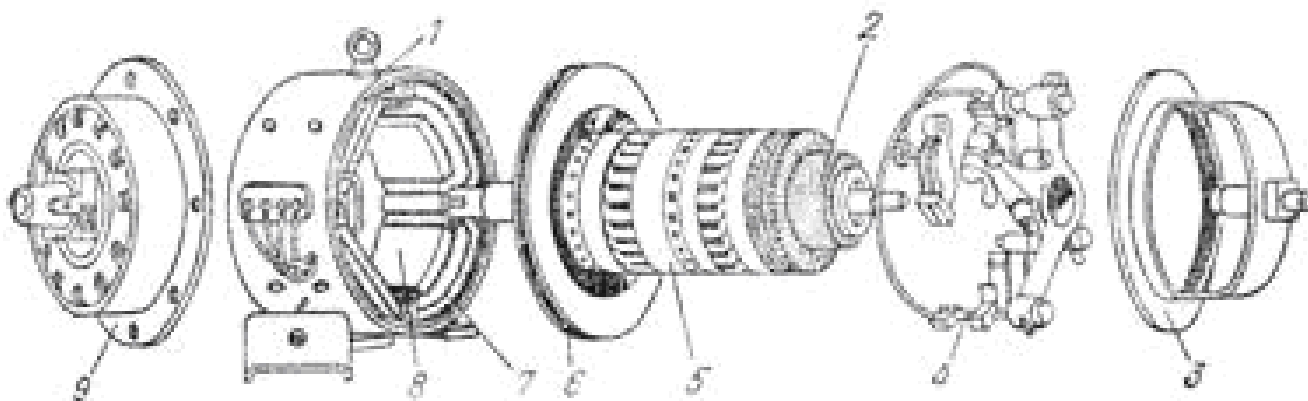
#### Теоретичні відомості.

Електричні машини призначені для перетворення механічної енергії в електричну або навпаки. За видом струму розрізняють машини змінного струму і машини постійного струму.

Електрична машина має нерухому частину — статор і рухому — ротор (якір), нерухомо з'єднаний з валом машини. Кожна із цих частин може виконувати будь-яку з двох функцій: створювати або магнітне поле, або ЕРС індукції. Термін «ротор» звичайно вживають тоді, коли говорять про машини змінного струму, а термін «якір» — стосовно машин постійного струму. Кількість обертів ротора (вала машини) за одиницю часу називають частотою обертання електричної машини.

Одна й та сама машина постійного струму в принципі може працювати і як генератор, і як двигун. Проте кожен електричний завод випускає з певним призначенням — працювати тільки як генератор або тільки як двигун. Дуже рідко використовують машини постійного струму, призначені для роботи як генератором, так і двигуном.

Механічну енергію на електричну перетворюють за допомогою електричних генераторів.

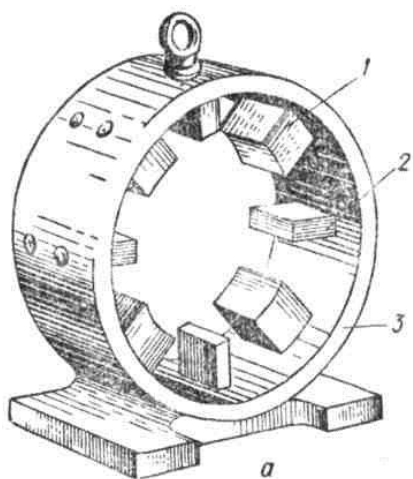


**Мал. 1. Генератор постійного струму в розібраному вигляді.**

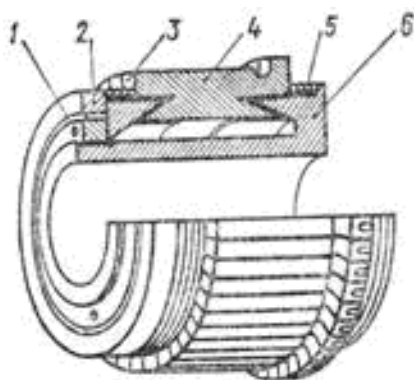
Основними частинами генератора (мал. 1) є станина 1, осердя полюсів 8, обмотка полюсів (обмотка збудження) 7, якір 5 (осердя з обмоткою), колектор 2,

підшипникові щити 3 і 9 (передній і задній), траверса 4 з щіткотримачами та щітками. Під час роботи електричні машини нагріваються. Це шкідливо для ізоляції та інших частин. Тому більшість електричних машин мають вентиляційні пристрої. На валу якоря закріплено вентилятор 6. Станина 1 — це литий або зварений циліндр, виготовлений з чавуну або сталі з високою магнітною провідністю. Вона є також основою для кріплення головних і додаткових полюсів (мал 2).

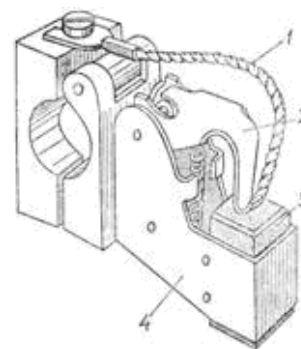
Головний полюс – це електромагніт, який утворює магнітний потік. Осердя полюса з поперечним перерізом овальної форми відливають зі сталі. На осерді полюса розміщується обмотка збудження з ізолюваного мідного проводу. Котушки всіх полюсів з'єднуються послідовно, утворюючи обмотку збудження. Струм, що протікає по обмотці збудження, утворює магнітний потік.



**Мал. 2. Будова статора машини постійного струму: 1 — головний полюс; 2 – додатковий полюс; 3 – станина.**



**Мал. 3. Колектор: 1 – гайка; 2 – натискний конус; 3 – міканітв конус; 4 – колекторні пластинки; 5 – бандаж; 6 – втулка.**



**Мал. 4. Щіткотримач з щіткою: 1 – провід; 2 – пружина; 3 – щітка; 4 – щіткотримач.**

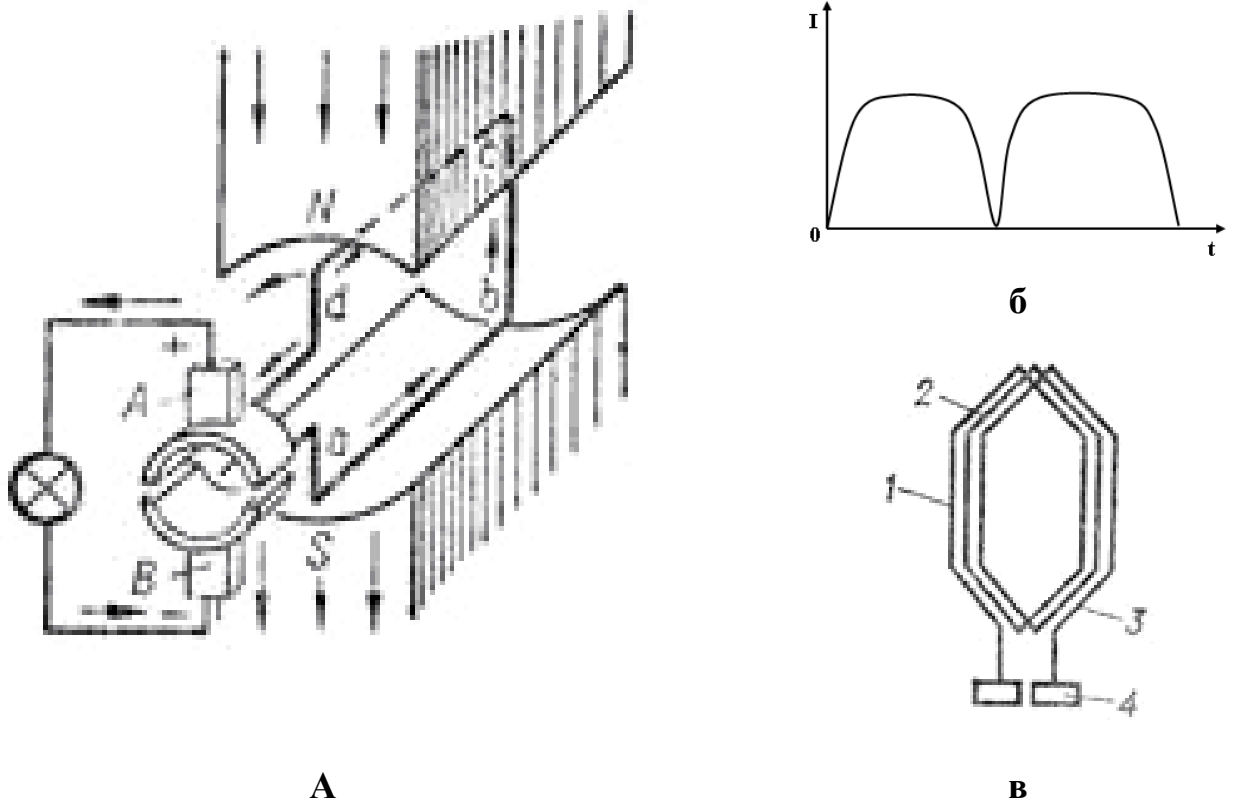
Колектор (мал. 3) складається з окремих пластин 4 клиновидної форми, виготовлених з міді. Вони ізолювані одна від одної слюдою. До кожної колекторної пластини прикріплюють відводи від обмотки якоря. Осердя якоря з обмоткою і колектором закріплюють на валу ротора, ізолюючи їх від вала.

Щіткотримач із щіткою показано на мал. 4. Щітка 3 — це вугляно-графітова, графітова, мідно-графітова прямокутна призма. Щітка притискається до колектора

пружиною 2. Щіткотримач із щітками призначено для знімання струму з колектора генератора і подавання його до споживача.

Принцип дії генератора постійного струму ґрунтується на законах електромагнітної індукції та електромагнітних сил. Найпростішим генератором є виток, що обертається у магнітному полі. У такому провіднику індукується змінна у часі ЕРС. Тому при з'єднанні кінців витка з контактними кільцями, що обертаються разом з витком, у навантаженні через нерухомі щітки протікає змінний струм, тобто така машина буде генератором змінного струму. Для перетворення змінного струму в постійний використовують колектор.

У провіднику, що рухається в магнітному полі генератора, постійний струм виникнути не може. Постійні е. р. с. і струм можуть створюватися тільки



**Мал. 5. Схема роботи машин постійного струму:**

**а – схема генератора; б – випрямлений пульсуючий струм;**

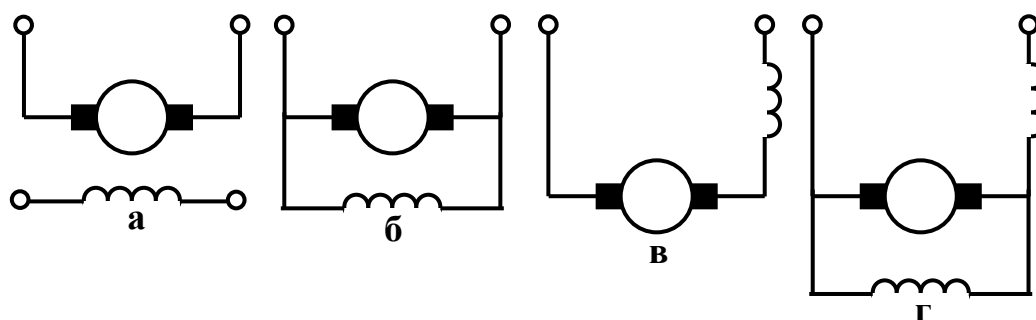
**в - секція обмотки якоря: 1 – активні провідники, що лежать у пазах; 2 – задня лобова частина; 3 – передня лобова частина; 4 – колекторні пластинки;**

випрямленням змінної е. р. с., що виникає в обмотці генератора змінного струму. До пластин колектора (рис. 4) приєднують кінці витка abed. Щітки на колекторі встановлені нерухомо так, щоб вони при обертанні витка з півкільцями переходили з

одного півкільця на друге, коли індукована е. р. с. у витку дорівнює нулю. Як видно з рис. 4, а, щітка А завжди в контакті з тим півкільцем, провід від якого проходить під північним полюсом, а щітка В — з тим, провід від якого проходить під південним полюсом. Тому в зовнішньому колі струм проходить в одному напрямі — від щітки А до В. Графік випрямленого струму показано на рис. 4, б. Як видно з рисунка, випрямлений струм є пульсуючим, тобто значення е. р. с. і струму збільшуються від нуля до максимуму і знову спадають до нуля. Для зменшення пульсації е. р. с. і струму на роторі збільшують кількості витків (які зсунуті між собою під певним кутом) і відповідно колекторних пластин, до яких приєднують кінці витків.

Генератори постійного струму можуть бути виконані з магнітним та електромагнітним збудженням. Для утворення магнітного потоку в генераторах першого типу використовують постійні магніти, а в генераторах другого типу — електромагніти. Постійні магніти застосовують лише в машинах дуже малих потужностей. Отже, електромагнітне збудження є найширше використовуваним способом утворення магнітного потоку. За цього способу збудження магнітний потік утворюється струмом, що протікає в обмотці збудження.

Залежно від способу живлення обмотки збудження генератори постійного



**Мал. 6. Схеми машин постійного струму (пускові й регулювальні реостати не показано):**

**а — з незалежним збудженням; б — з паралельним збудженням; в — з послідовним збудженням; г — зі змішаним збудженням.**

струму можуть бути з незалежним збудженням та з самозбудженням. За незалежного збудження (рис. 6, а) обмотку збудження приєднують в мережу допоміжного джерела постійного струму.

Недоліком генераторів незалежного збудження є потреба в додатковому джерелі енергії. Тому генератори незалежного збудження мають дуже обмежене



застосування лише в машинах високих напруг, у яких живлення обмотки збудження від кола якоря неприпустиме з конструктивних міркувань.

Якщо обмотка збудження дістає живлення від затискачів якоря і з'єднана з ними паралельно, таку машину називають машиною з паралельним збудженням (рис. 6, б). Таку саму машину, але з послідовним з'єднанням обмотки збудження із затискачами якоря називають машиною з послідовним збудженням (рис. 6, в). У машинах зі змішаним збудженням є дві обмотки збудження, одна з яких з'єднана із затискачами якоря послідовно, а друга — паралельно (рис. 6, г).

Для регулювання сили струму збудження в коло обмотки вводять опір. За такого збудження сила струму збудження не залежить від сили струму в якорі.

У генераторів паралельного збудження сила струму збудження низька (кілька процентів номінальної сили струму в якорі) і обмотка збудження має велику кількість витків. За послідовного збудження сила струму збудження дорівнює силі струму в якорі і обмотка збудження має малу кількість витків. У разі змішаного збудження на полюсах генератора розміщують дві обмотки збудження — паралельну і послідовну.

Процес самозбудження генераторів постійного струму протікає однаково за будь-якої схеми збудження. Наприклад, у генераторах паралельного збудження, які набули найширшого застосування, процес самозбудження протікає таким чином. Первинний двигун обертає якор генератора, магнітне коло (ярмо й осердя полюсів) якого має невеликий залишковий магнітний потік  $\Phi$ . Цей магнітний потік в обмотці якоря, що обертається, індукуює ЕРС  $E_0$ , яка становить кілька процентів номінальної напруги машини. Під дією ЕРС  $E_0$  в замкненому колі, що складається з якоря й обмотки збудження, протікає струм силою  $I_3$ . Магніторушійна сила обмотки збудження  $\omega I_3$  ( $\omega$  — кількість витків) спрямована узгоджено з потоком залишкового магнетизму, збільшуючи магнітний потік машини  $\Phi$ , що обумовлює зростання ЕРС в обмотці якоря  $E$  та сили струму в обмотці збудження  $I_3$ . Збільшення сили струму в обмотці збудження призводить до подальшого зростання  $\Phi$ , що в свою чергу збільшує  $E$  та  $I_3$ .

Через насичення сталюого осердя магнітного кола машини самозбудження відбувається не безмежно, а до якоїсь певної напруги, залежної від частоти обертання якоря машини та від опору в колі обмотки збудження. У разі насичення сталі

магнітного кола збільшення магнітного потоку сповільнюється і процес самозбудження закінчується. Збільшення опору в колі обмотки збудження зменшує силу струму в ній та магнітний потік, збуджуваний цим струмом. Тому знижуються ЕРС і напруга, до якої збуджується генератор.

Зміна частоти обертання якоря генератора обумовлює зміну ЕРС, яка прямо пропорційна частоті, внаслідок чого змінюється й напруга, до якої збуджується генератор.

Самозбудження генератора відбуватиметься лише за умов, наведених нижче.

1. У генераторі має бути потік залишкового магнетизму. У разі відсутності цього потоку не утворюватиметься ЕРС  $E_0$ , під дією якої в обмотці збудження починає протікати струм, тому збудження генератора буде неможливе. Якщо машина розмагнічена і не має залишкового намагнічування, то через обмотку збудження треба пропустити постійний струм від стороннього джерела електричної енергії. Після від'єднання обмотки збудження в машині знову буде залишковий магнітний потік.
2. Обмотка збудження має бути приєднана узгоджено з потоком залишкового магнетизму, тобто так, щоб намагнічувальна сила цієї обмотки збільшувала потік залишкового магнетизму. У разі зустрічного приєднання обмотки збудження її магніторушійна сила зменшуватиме залишковий магнітний потік і за тривалої роботи може повністю розмагнітити машину. Якщо обмотка збудження приєднана зустрічно, то потрібно змінити напрямок струму в ній, тобто поміняти місцями провідники, що підходять до затискачів цієї обмотки.
3. Опір кола обмотки збудження має бути не дуже великим; у разі дуже великого опору самозбудження генератора неможливе.
4. Опір зовнішнього навантаження має бути великим, оскільки за низького опору сила струму збудження буде також малою і самозбудження не відбудеться.

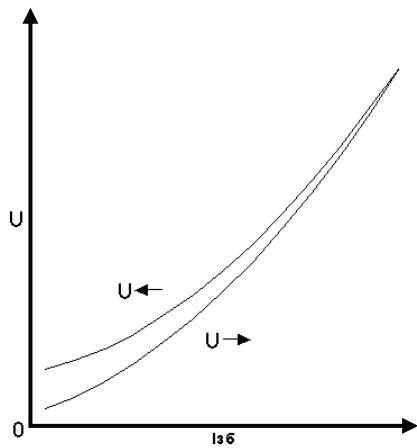
Генератори постійного струму застосовують як збудники синхронних генераторів, у зарядних пристроях, на автомобілях і т. ін.

Характеристики машини постійного струму показують її робочі якості.

**Характеристика холостого ходу** – це залежність напруги на клеммах машини

від величини струму збудження при постійній швидкості обертання якоря машини при відсутності навантаження.

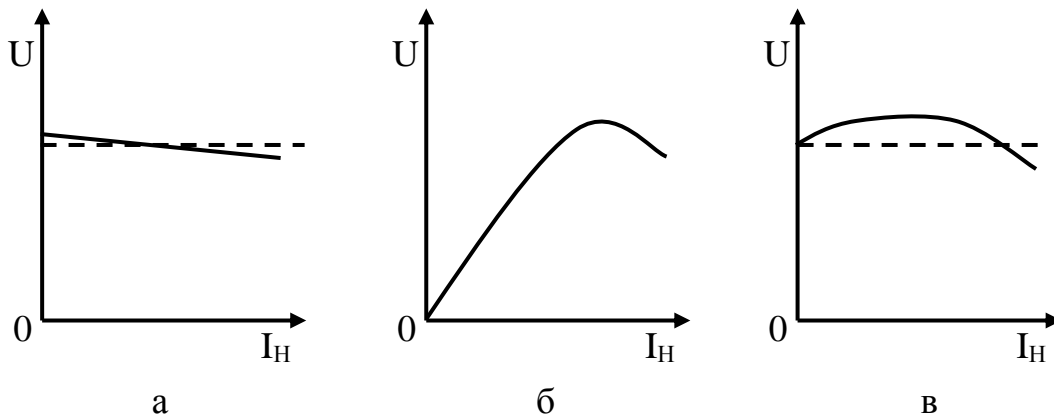
$$U = f(I_{зб}), n = const, I_H = 0$$



При зніманні характеристики холостого ходу необхідно відєднати реостати навантаження і за допомогою реостату в колі збудження змінювати струм збудження через 0,1 А від нуля до максимально

можливого значення і відмічати величину напруги на клеммах машини. Після цього треба зменшувати  $I_{зб}$  до 0 і фіксувати напругу. По кривій  $U = f(I_{зб})$  визначають номінальне значення струму збудження, що відповідає початку верхнього згину цієї кривої.

**Зовнішня характеристика генератора** – залежність напруги на клеммах



**Мал. 7. Зовнішня характеристика генератора постійного струму:**

**а** — з незалежним і паралельним збудженням;

**б** — з послідовним збудженням; **в** — зі змішаним збудженням.

машини від струму навантаження генератора при постійній швидкості обертання і постійному опорі в обмотці збудження.

З рисунка видно, що залежно від способу збудження генератора можна дістати як стабільні, так і регульовані напруги.

$$U = f(I_H), n = const, R_u = const$$

При зніманні характеристики необхідно спочатку встановити на клеммах генератора номінальну напругу  $U_{ном} = 120$  В. Першу точку зняти при відсутності навантаження. Потім збільшувати струм навантаження і через кожен 1 А відмічати

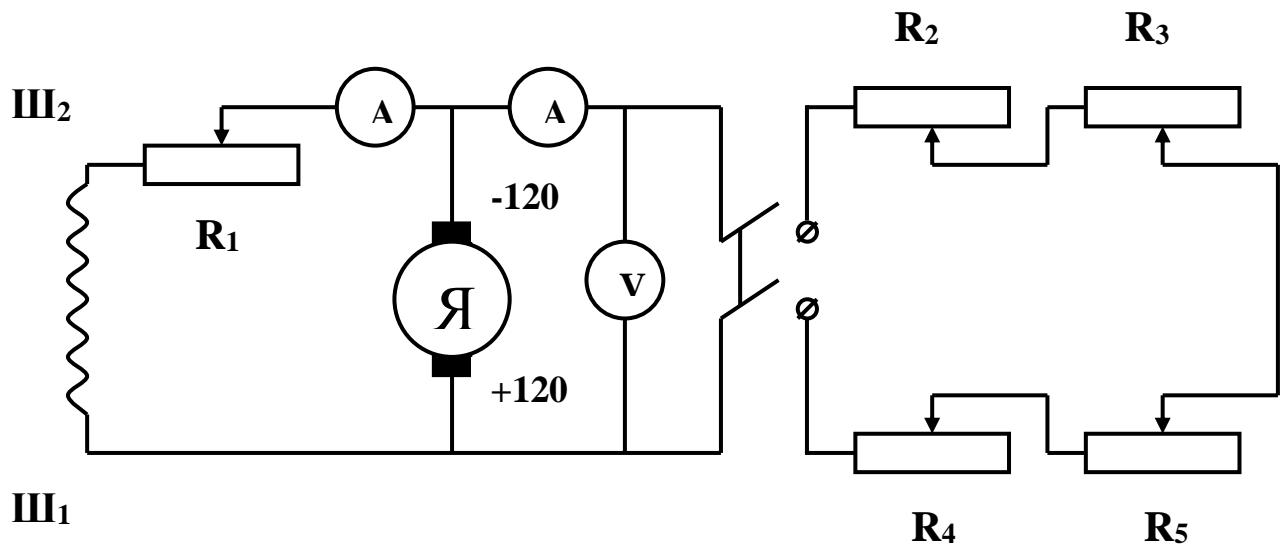
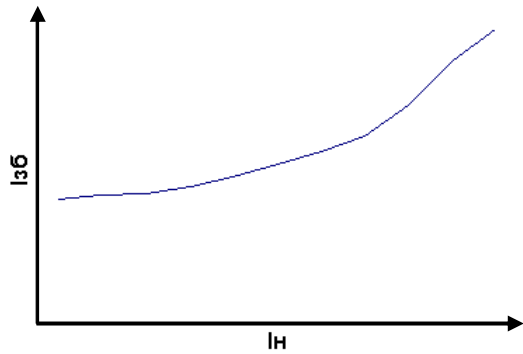
напругу на клеммах генератора. Номінальний струм генератора відповідає напрузі кривої  $U_{ном} = f(I_n)$ , що становить 85 – 80% від максимальної напруги.

**Характеристика регулювання генератора** – залежність струму збудження від струму навантаження при сталих номінальних обертах і напрузі на клеммах генератора.

$$I_{зб} = f(I_n), \quad n = const, \quad U = 110B = const$$

Ця характеристика показує, як треба змінювати струм збудження, щоб при сталих номінальних обертах підтримати напругу на клеммах генератора сталою.

При зніманні характеристики регулювання треба встановити на клеммах генератора номінальну напругу. Першу точку зняти при відсутності навантаження. А далі, збільшуючи струм навантаження, збільшувати струм збудження так, щоб напруга на клеммах залишалась сталою 110 В.



Мал. 8

### Виконання роботи:

1. Перевірити схему на мал. 1.
2. Зняти і побудувати основні характеристики генератора.
3. Пояснити фізичний зміст характеристик генератора.
4. Визначити номінальні значення напруги і струму навантаження генератора.

### Контрольні запитання:

1. Описати будову машини постійного струму.
2. Пояснити принцип дії шунтового генератора постійного струму.

### Результати вимірювань

Характеристика холостого ходу

$I_{зб}, A$	$U \rightarrow, B$	$U \leftarrow, B$
0		
0,1		
0,2		
0,3		
0,4		
0,5		
0,6		
0,7		
0,8		
0,9		
1		
1,1		
1,2		
1,3		
1,4		
1,5		

Зовнішня характеристика

$I_n, A$	$U, B$
0	120
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	

Характеристика регулювання

$U, B$	$I_n, A$	$I_{зб}, A$
110	0	
	1	
	2	
	3	
	4	
	5	
	6	
	7	
	8	
	9	
	10	

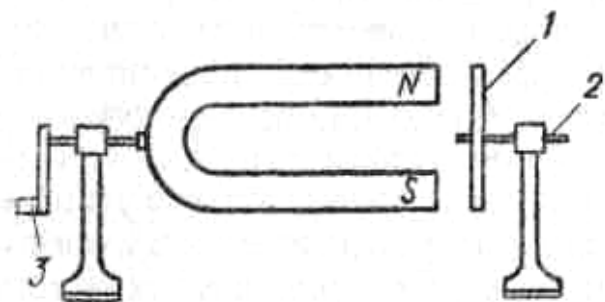
## Лабораторна робота №2

### Дослідження роботи трифазного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором.

#### Мета роботи:

1. Вивчити будову і правила користування асинхронним двигуном трифазного струму з короткозамкненим ротором.
2. Ознайомитись з методикою дослідження асинхронного двигуна за допомогою гальмування машиною постійного струму.
3. Експериментально одержати робочі характеристики двигуна і визначити номінальні величини, що характеризують його роботу.

#### Теоретичні відомості:



Мал. 1

Робота асинхронного двигуна ґрунтується на явищі, що називається «диск Араго — Ленца» (мал. 1). Це явище полягає ось у чому: якщо перед полюсами постійного магніту помістити мідний диск 1, який вільно сидить на осі 2, й обертати магніт навколо його осі за допомогою

рукоятки 3, то мідний диск обератиметься у тому ж напрямку. Це пояснюється тим, що під час обертання магніта його магнітне поле пронизує диск і індукує в ньому вихрові струми. Внаслідок взаємодії вихрових струмів з магнітним полем магніту виникає сила, яка приводить диск в обертання. На основі закону Ленца напрямкубудь-якого індукованого струму такий, що він протидіє причині, яка його викликала. Тому вихрові струми в тілі диска прагнуть затримати обертання магніту, але не маючи можливості зробити це, приводять диск в обертання так, що він обертається слідом за магнітом. При цьому частота обертання диска завжди менша, ніж частота обертання магніту. Якби ці частоти з якоїсь причини стали однаковими, то магнітне поле не переміщувалось би відносно диска, а отже, в ньому не виникали б вихрові струми, тобто не було б сили, під впливом якої диск обертається.

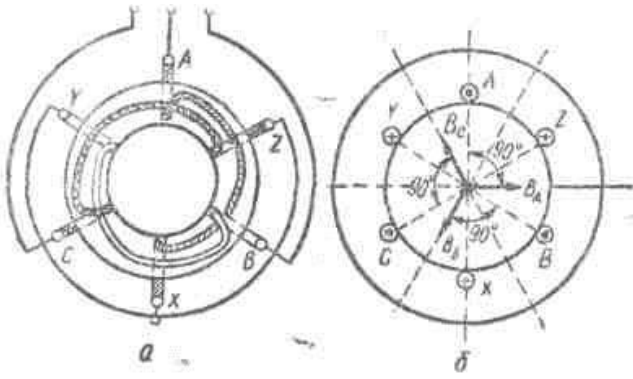
Обертове магнітне поле створює будь-яка багатофазна система змінного струму, тобто система з кількістю фаз дві, три і т. д. Найбільшого поширення набув трифазний змінний струм.

У асинхронних двигунів постійне магнітне поле замінене обертовим магнітним полем, яке утворює трифазна система, ввімкнена в мережу змінного струму. Обертове магнітне поле статора перетинає провідники обмотки ротора й індукує в них ЕРС. Якщо обмотка ротора замкнена на якийсь опір або накоротко, то по ній під дією індукованої ЕРС протікає струм. Внаслідок взаємодії струму в обмотці ротора з обертовим магнітним полем обмотки статора утворюється обертаючий момент, під дією якого ротор починає обертатися за напрямком обертання магнітного поля.

У асинхронному двигуні робочий процес протікатиме тільки за асинхронної частоти, тобто коли частота обертання ротора не дорівнює частоті обертання магнітного поля. Частота обертання ротора може мало чим відрізнитися від частоти обертання поля, але під час роботи двигуна вона завжди буде менша ( $n_2 < n_1$ ).

Якщо припустити, що в певний момент часу частота обертання ротора дорівнює частоті обертання статорного поля, то провідники роторної обмотки не перетинатимуть магнітного поля статора і струму в роторі не буде. У цьому разі обертаючий момент дорівнюватиме нулеві і частота обертання ротора зменшиться порівняно з частотою обертання статорного поля, доки не виникне обертаючий момент, що зрівноважує гальмівний момент, який складається з моменту навантаження на валі і моменту сил тертя в машині.

Розглянемо обертове магнітне поле трифазної системи машини змінного струму. На мал. 2, *a* показано найпростішу трифазну систему, ввімкнену в мережу трифазного струму. У статорі, зібраному з листової сталі, як це робиться у всіх машинах змінного струму, розміщено три котушки, осі яких зсунуті взаємно на кут  $120^\circ$ . Кожну котушку для наочності зображено такою, що складається з одного витка, розміщеного у двох пазах (западинах) статора. Насправді котушки мають більшу кількість витків. Літерами А, В, С позначено початки обмоток, а літерами Х, У, Z—їхні кінці. Фази з'єднуються зіркою або трикутником.



**Мал. 2. Найпростіша трифазна обмотка;**

**а — схема; б — розріз.**

створюється котушкою А — Х, спрямована під кутом  $90^\circ$  до площини цієї котушки (мал. 2, б). Напрямки магнітних полів усіх трьох котушок показані векторами  $B_A$ ,  $B_B$ ,  $B_C$ , зміщеними один відносно одного також на кут  $120^\circ$ .

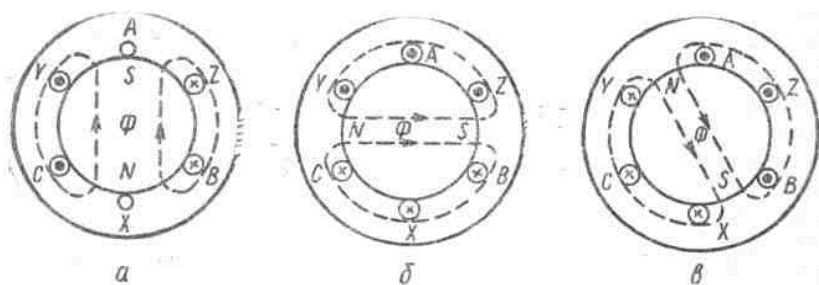
Умовимося вважати додатними напрямки струмів у котушках від початку до кінця обмотки кожної фази. При цьому у провідниках статора, приєднаних до початкових точок А, В і С, струми будуть спрямовані з площини млюнка, а у провідниках, приєднаних до кінцевих точок Х, Y, Z— за площину рисунка. Додатним напрямкам струмів відповідатимуть додатні напрямки магнітних полів, які показані на мал. 2, б і визначаються за правилом свердлика.

Напрямок результуючого магнітного поля, утвореного трифазною системою, для різних моментів часу визначимо так. У момент часу  $t_0 = 0$  сила струму в котушці А — Хдорівнює нулеві, у котушці В — Y— від'ємна, у котушці С — Z —додатна. Отже, в цей момент струму в провідниках А і Хнемає, у провідниках С і Zвін має додатний напрямок, а у провідниках В і Y— від'ємний (мал. 3, а). Іншими словами, у вибраний нами момент  $t_0 = 0$  у провідниках С і Yструм спрямований на глядача, а у провідниках В і Z— від глядача. За такого напрямку струму, згідно з правилом свердлика, утворене магнітне поле спрямоване знизу вгору, тобто у нижній частині всередині статора знаходиться північний полюс, а у верхній — південний.

У момент  $t_1$  струм у фазі А додатний, у фазах В і С — від'ємний, у провідниках Z, А і Yструми спрямовані на глядача, у провідниках С, Xі В — від глядача (мал. 3,



б), і магнітне поле повернуте на  $90^\circ$  за годинниковою стрілкою відносно свого початкового напрямку.



**Мал. 3** Магнітне поле трифазної обмотки в різні моменти часу: *a* —  $t = 0$ ; *б* —  $t = t_1$ ; *в* —  $t = t_2$ .

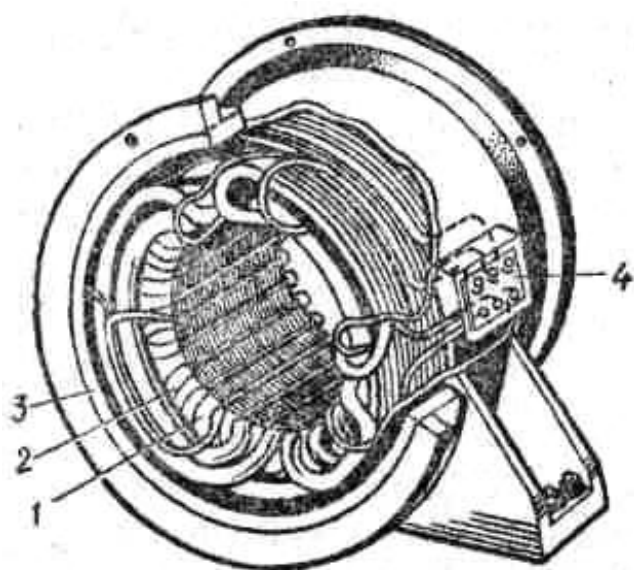
У момент  $t_2$  струми у фазах А і В додатні, а у фазі С — від'ємний. У провідниках А, Z і В струми спрямовані на глядача, а у провідниках Y, С і X — від глядача, і магнітне поле повернуте ще на більший

кут відносно початкового положення (мал. 3, в).

Отже, з часом відбувається безперервна й рівномірна зміна напрямку магнітного поля утвореного трифазною обмоткою, тобто магнітне поле обертатиметься зі сталою швидкістю. У нашому випадку магнітне поле обертається за годинниковою стрілкою.

Щоб змінити напрямок обертання магнітного поля, треба змінити напрямок струму в одній із котушок, помінявши місцями провідники, що приєднують цю котушку до мережі, або помінявши місцями провідники, що приєднують до мережі котушки А і В.

### Будова асинхронного двигуна

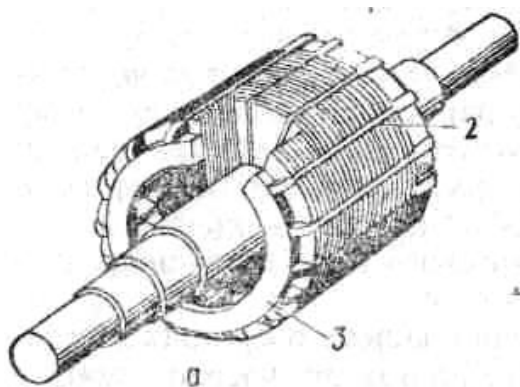


**Мал 4.** Статор асинхронногодвигуна

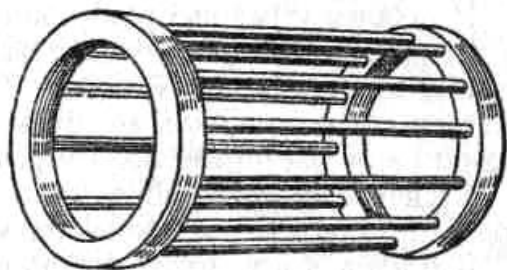
Осердя статора 1 (мал. 4) набирають зі сталевих пластин завтовшки 0,35 або 0,5 мм. Пластини штамнують із западинами (пазами), ізолюють лаком або окалиною для зменшення втрат на вихрові струми, складають в окремі пакети і закріплюють у станині двигуна 3. До станини прикріплюють також бічні щити з розміщеними на них підшипниками, на які спирається роторний вал. Станину встановлюють на фундаменті. У

поздовжні пази статора вкладають провідники його обмотки 2, які відповідно з'єднують між собою так, що утворюється трифазна система. На щитку машини 4 знаходяться шість затискачів, до яких приєднуються початки й кінці обмоток кожної фази. Для приєднання статорних обмоток до трифазної мережі їх можна з'єднати зіркою або трикутником, що дає змогу вмикати двигун у мережу з двома різними лінійними напругами. Наприклад, двигун може працювати від мережі з напругою 380 та 220 В. На щитку машини зазначено обидві напруги мережі, на які розрахований двигун, тобто 220/127 В або 380/290 В.

Для нижчих напруг, що зазначені на щитку, статорна обмотка з'єднується трикутником, для вищих — зіркою.



а



б

**Мал. 5. Ротор короткозамкненого асинхронного двигуна:**  
а — будова; б — обмотка.

Осердя ротора 1 (мал. 5, а) також набирають зі сталевих пластин завтовшки 0,5 мм, ізолюваних лаком або окалиною для зменшення втрат на вихрові струми. Залежно від типу обмотки асинхронні машини можуть бути з фазним та короткозамкненим роторами. Короткозамкнену обмотку виконують за типом білячого колеса (мал. 5, б). В пазах ротора укладають масивні стержні, з'єднані на торцьових боках мідними кільцями 3 (див. мал. 5, а). Часто короткозамкнену обмотку ротора виготовляють з алюмінію. Алюміній у гарячому стані заливають у пази ротора підтиском. Така обмотка завжди замкнена накоротко, і ввімкнення в неї опору неможливе. Фазна обмотка ротора виконана аналогічно статорній, тобто провідники відповідно з'єднані між собою, утворюючи трифазну систему. Обмотки трьох

фаз з'єднані зіркою.

Зараз асинхронні двигуни виготовляють переважно з короткозамкненим ротором і тільки при великих потужностях та в спеціальних випадках

використовують фазну обмотку ротора. Асинхронні двигуни можуть бути потужністю від кількох десятків ват до 15 000 кВт при напрузі статорної обмотки до 6 кВ.

### **Робота асинхронного двигуна під навантаженням.**

У робочому режимі ротор двигуна обертається з частотою  $n_2$ , меншою від частоти  $n_1$  магнітного поля статора, який обертається у тому самому напрямку, що й ротор. Тому магнітне поле, яке має велику частоту обертання, ковзає відносно ротора з частотою, що дорівнює різниці між частотами поля й ротора, тобто  $n_s = n_1 - n_2$ .

Відносне відставання ротора від обертового магнітного поля статора характеризується ковзанням  $S$ .

Ковзання являє собою відношення частоти обертання статорного магнітного поля відносно обертового ротора до частоти статорного поля:  $S = n_s/n_1 = (n_1 - n_2)/n_1$ .

Якщо ротор нерухомий ( $n_2 = 0$ ), то ковзання дорівнює одиниці або 100 %. Якщо ротор обертається синхронно з магнітним полем, тобто з однаковою частотою ( $n_2 = n_1$ ), то ковзання дорівнює нулеві. Отже, чим більша частота обертання ротора, тим менше ковзання.

У робочому режимі асинхронного двигуна ковзання мале. У сучасних асинхронних двигунів ковзання за повного навантаження становить 3...5 %, тобто ротор обертається з частотою, яка незначною мірою відрізняється від частоти магнітного поля статора. У разі холостого ходу, тобто за відсутності навантаження на валі, ковзання надзвичайно мале і його можна приймати за нуль.

$$n_2 = n_1 - n_s = n_1(1 - S) = \left( \frac{60f}{p} \right) (1 - S)$$

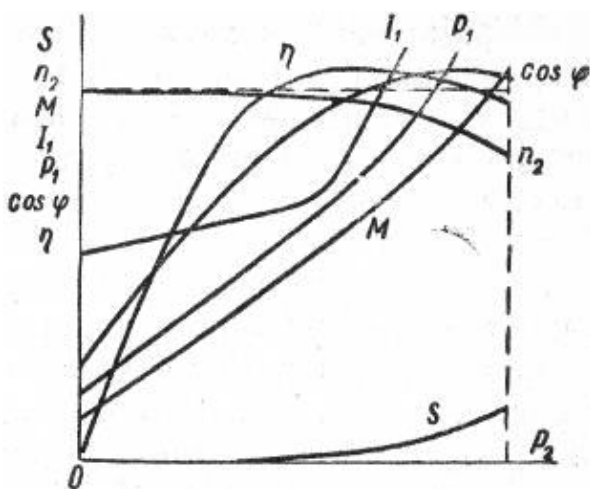
Двигун працюватиме стійко зі сталою частотою обертання ротора в разі рівноваги моментів, тобто коли обертаючий момент двигуна  $M$  буде дорівнювати гальмівному моменту на його валу  $M_T$ , якого розвиває приймач механічної енергії, наприклад різець токарного верстата. Отже,  $M = M_T$ . Будь-якому навантаженню машини відповідає певна частота обертання ротора  $n_2$  і певне ковзання  $S$ .

Магнітне поле статора обертається відносно ротора з частотою  $n_s$  і індукує в його обмотці електрорушійну силу  $E_2$ , під дією якої по замкненій обмотці ротора протікає струм силою  $I_2$ . Якщо навантаження на валу машини збільшиться, тобто

зросте гальмівний момент, то рівновага моментів порушиться, оскільки гальмівний момент буде більший від обертаючого моменту. Це призведе до зменшення частоти обертання ротора, а отже, до збільшення ковзання. Зі збільшенням ковзання магнітне поле статора перетинатиме провідники роторної обмотки частіше, електрорушійна сила  $E_2$ , індукована в роторній обмотці, зросте, а в підсумку збільшаться сила струму в роторі й обертаючий момент, що розвивається двигуном. Ковзання і сила струму в роторі збільшуватимуться до значень, за яких знову настане рівновага моментів, тобто обертаючий момент дорівнюватиме гальмівному.

Так само протікає процес зміни частоти обертання ротора і моменту, що розвивається, у разі зменшення навантаження двигуна. Зі зменшенням навантаження на валу двигуна гальмівний момент став меншим від обертаючого, що призводить до збільшення частоти обертання ротора або до зменшення ковзання. У підсумку зменшуються ЕРС і сила струму в роторній обмотці, а отже, й обертаючий момент, який знову дорівнює гальмівному моменту.

**Робочі характеристики** асинхронного двигуна – це залежності ковзання  $S$ , частоти обертання ротора  $n_2$ , моменту  $M$ , сили споживаного струму  $I_1$ , витраченої потужності  $P_1$ , коефіцієнта потужності  $\cos \varphi$  та ККД, від корисної потужності  $P_2$  на валу машини. Ці характеристики (мал. 4) знімають за природних умов роботи двигуна, тобто коли двигун нерегульований, частота струму  $f_x$  і напруга  $U_1$  у мережі залишаються сталими, а змінюється лише навантаження на валу двигуна.



**Мал. 6. Робочі характеристики асинхронного двигуна.**

Зі збільшенням навантаження на валу двигуна ковзання зростає, причому в разі великих навантажень ковзання збільшується дещо швидше, ніж при малих навантаженнях. У разі холостого ходу двигуна ковзання дуже мале ( $n_2 \approx n_1$  або  $S \approx 0$ ). За номінального навантаження ковзання  $S = 3 \dots 5\%$ . Частота обертання ротора

$$n_2 = n_1(1 - S) = \left( \frac{60 f_1}{p} \right) (1 - S).$$

Зі збільшенням навантаження на валу двигуна ковзання зростає, а частота обертання зменшується. Проте зміна частоти обертання зі збільшенням навантаження від 0 до номінального дуже незначна і не перевищує 5 %. Тому швидкісна характеристика асинхронного двигуна є жорсткою — у кривій надто малий нахил до горизонтальної осі.

Обертаючий момент  $M$ , що розвивається двигуном, зрівноважений гальмівним моментом на валу  $M_r$  та моментом  $M_0$ , який іде на подолання механічних втрат:

$$M = M_r + M_0 = \frac{P_2}{\Omega_2} + M_0, \text{ де } P_2 \text{ — корисна потужність двигуна; } \Omega_2 \text{ — кутова швидкість}$$

ротора.

У разі холостого ходу двигуна  $M = M_0$ ; зі збільшенням навантаження на валу обертаючий момент також збільшується, причому за рахунок деякого зменшення частоти обертання ротора обертаючий момент збільшується швидше, ніж корисна потужність на валу.

Сила струму  $I_1$ , споживаного двигуном із мережі, нерівномірно змінюється зі збільшенням навантаження на валу двигуна. У разі холостого ходу  $\cos\varphi$  малий і сила струму має велику реактивну складову. За малих навантажень на валу двигуна активна складова сили струму в статорі менша від реактивної складової, тому активна складова незначною мірою впливає на силу струму  $I_1$ , що обумовлюється в основному реактивною складовою. Якщо навантаження великі, активна складова сили струму в статорі стає більш реактивною і зміна навантаження обумовлює значну зміну сили струму  $I_1$ .

Графічно залежність споживаної двигуном потужності  $P_1$  зображується майже прямою лінією, яка незначною мірою відхиляється вгору у разі великих навантажень, що можна пояснити збільшенням втрат у статорній і роторній обмотках зі зростанням навантаження.

Коефіцієнт потужності змінюється залежно від навантаження на валу двигуна таким чином. У разі холостого ходу  $\cos\varphi$  малий (до 0,2), оскільки активна складова сили струму в статорі, обумовлена втратами потужності в машині, мала порівняно з реактивною складовою цієї сили струму, яка утворює магнітний потік. Зі збільшенням навантаження на валу  $\cos\varphi$  зростає (досягаючи найбільшого значення —

0,8...0,9) внаслідок збільшення активної складової сили струму в статорі. У разі дуже великих навантажень  $\cos\varphi$  дещо зменшується, оскільки внаслідок значного збільшення ковзання та частоти струму в роторі зростає реактивний опір обмотки ротора.

Крива ККД  $\eta$  має такий самий вигляд, як у будь-якої машини чи трансформатора. У разі холостого ходу ККД дорівнює нулеві. Зі збільшенням навантаження на валу двигуна ККД різко збільшується, а потім зменшується. Найбільшого значення ККД досягає за навантаження, коли втрати потужності в сталі та механічні втрати, що не залежать від навантаження, дорівнюють втратам потужності в обмотках ротора і статора, які залежать від навантаження.

Робочі властивості асинхронного двигуна характеризуються його механічною характеристикою:  $n_2 = f(M)$ , де  $M$  – корисний момент на валу машини,  $n_2$  – кількість обертів валу машини за хвилину, а також робочими характеристиками:  $n_2 = f(P_2)$ ;  $S = f(P_2)$ ;  $I = f(P_2)$ ;  $\cos\varphi = f(P_2)$ ;  $\eta = f(P_2)$ , де  $P_2$  – корисна потужність на валу машини,  $S$  – ковзання ротора,  $I$  – струм, що споживає двигун,  $\varphi$  – зсув фаз між струмом і напругою,  $\eta$  – к.к.д. двигуна.

Корисну потужність на валу двигуна можна визначити наближено за корисною потужністю генератора постійного струму  $P_3$ , яка визначається по ватметру в колі генератора:  $P_2 = P_3 + M_{\text{тер}} \cdot \omega + 2I_2^2 \cdot R$ , де  $M_{\text{тер}}$  – момент тертя в генераторі. Для даного генератора  $M_{\text{тер}} = 0,064 \text{ нм}$ . Струм в колі генератора –  $I_2$ ,  $R$  – опір рбмотки генератора,  $R = 80 \text{ Ом}$ ,  $\omega = \frac{2\pi n_2}{60}$ . Корисний момент на валу двигуна визначається по  $P_2$ :

$$M = \frac{P_2}{n_2} \cdot \frac{60}{2\pi} (\text{нм}) = \frac{P_2}{n_2} \cdot \frac{60}{9,8 \cdot 2\pi} (\text{кГм}).$$

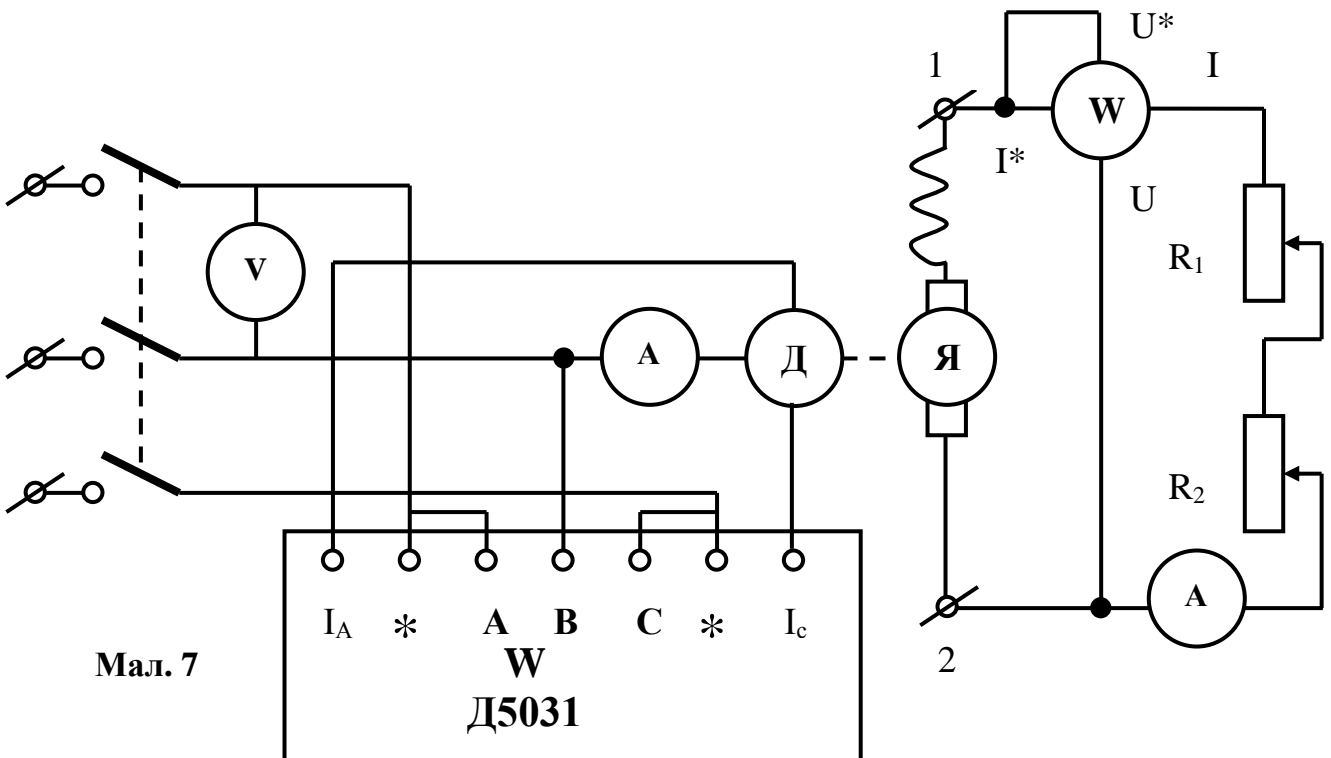
Коефіцієнт потужності  $\cos\varphi$  і коефіцієнт корисної дії знаходимо за формулами:

$$\cos\varphi = \frac{P_1}{I_1 U_1 \sqrt{3}}; \eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\%; S = \frac{n_1 - n_2}{n_1}; n_1 = \frac{60f}{p}; p = 1; f = 50 \text{ Гц}$$

де  $I_1$ ,  $U_1$  – відповідно лінійні струм і напруга,  $P_1$  – ел. потужність, що споживає двигун,  $p$  – число пар полюсів.

## Виконання роботи:

1. Ознайомитись з будовою і правилами експлуатації двигуна.
2. Розглянути будову розібраного асинхронного двигуна. Записати по паспорту технічні дані досліджуваного двигуна, спосіб сполучення обмоток статора.
3. Зібрати коло по схемі на мал. 1 для досліджування двигуна. Після перевірки керівником зняти робочі характеристики двигуна змінюючи навантаження двигуна реостатами – спочатку високоомними – так, щоб  $P_3$  мало значення: холостий хід, 12, 18, 24, 30, 36, 42, 48, 54, 60, 66, 72, 78



Мал. 7

Вт. Потужність  $P_1$  визначають ватметром Д5031. Кількість обертів двигуна за 1 секунду визначають за допомогою тахометра.

4. Результати вимірювань і обчислень заносять у таблицю.
5. Побудуйте на спільній осі  $P$  характеристики двигуна:  $n_2 = f(P_2)$ ;  $S = f(P_2)$ ;  $I = f(P_2)$ ;  $\cos \varphi = f(P_2)$ ;  $\eta = f(P_2)$ . Виберіть номінальний режим роботи двигуна.

### Контрольні питання:

1. Яка будова асинхронного двигуна?
2. Як створюється обертове магнітне поле в статорі двигуна.
3. Як реверсувати асинхронний двигун?

### Результативимірюваньтаобчислень

Вимірювання						Обчислення				
$P_3, \text{Вт}$	$P_1, \text{Вт}$	$I_1, \text{А}$	$U_1, \text{В}$	$n_2$	$I_2, \text{А}$	$P_2, \text{Вт}$	$S, \%$	$\cos \varphi$	$\eta, \%$	$M$



## Лабораторна робота №3

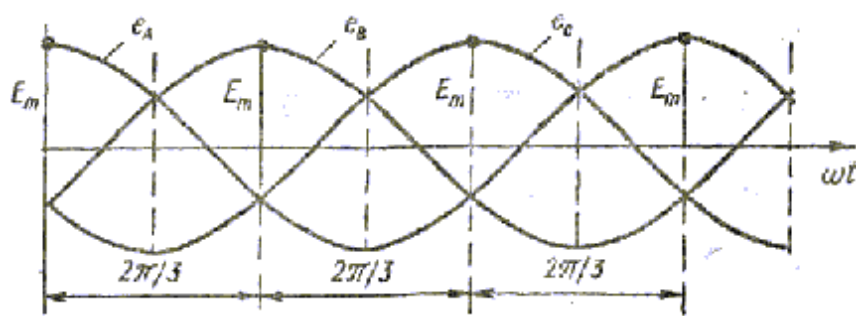
### Дослідження трифазного кола змінного струму при з'єднанні споживачів «зіркою».

**Мета роботи:** прослідкувати зміну потужності, лінійних і фазових значень напруг і струмів трифазної системи при включенні їх на «зірку» для симетричного і несиметричного навантаження.

#### Теоретичні відомості:

Трифазною системою змінного струму (або просто трифазною системою) називається електричне коло або мережа змінного струму, в якій діють три ЕРС однакової частоти, але взаємно зміщені за фазою на одну третину періоду. Окремі кола, з яких складається трифазна система, називаються фазами.

Якщо ЕРС у всіх трьох фазах мають однакову амплітуду і зміщені за фазою на однаковий кут, то така трифазна система називається симетричною.



Мал. 1. Криві зміни ЕРС у трифазній обмотці генератора

Якщо генератор навантажений, на затискачах котушок встановлюються напруги, які називаються фазними. У разі відсутності навантаження (холостий хід) фазні напруги дорівнюють ЕРС, що індукуються в котушках статора.

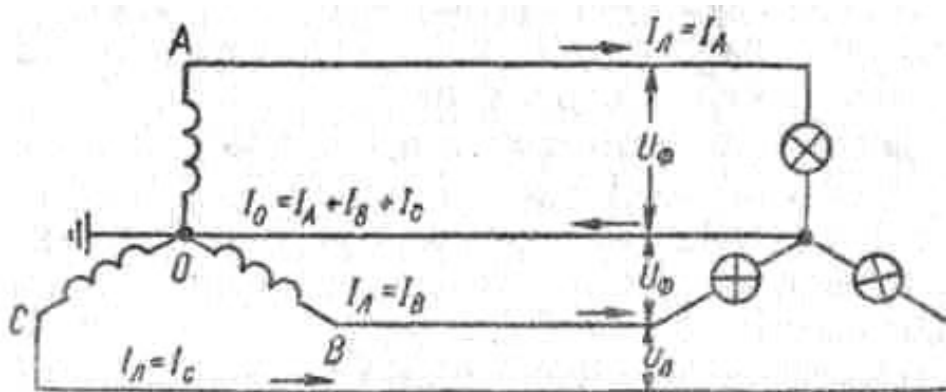
Трифазний струм передається чотири- або трипровідною системою і споживачі енергії можуть бути ввімкнені в мережу за схемою «зірка» або «трикутник».

У разі з'єднання зіркою, кінці трьох фаз з'єднують у спільній точці, а до початків фаз приєднують провідники, які підводять електричну енергію. Ці три проводи називаються лінійними, а напруга між будь-якими двома лінійними провідниками – лінійною напругою  $U_L$ . Від спільної точки з'єднання кінців (або початків) трьох фаз (від нульової точки зірки) можна відвести четвертий провідник,

який називається нульовим. Напряга між будь-яким лінійним провідником і нульовим дорівнює напрузі між початком і кінцем однієї фази, тобто фазній напрузі  $U_\phi$ .

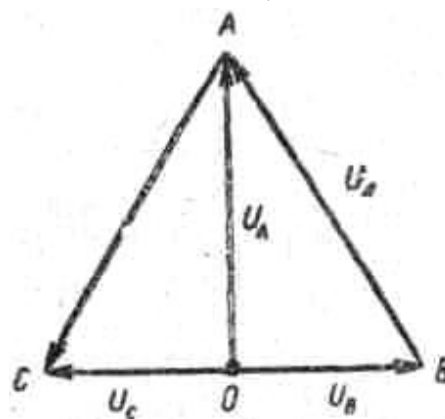
Споживачі енергії, ввімкнені в чотирипровідну систему зіркою (мал. 2), одним проводом приєднані до лінійного проводу, іншим — до нульового. В разі з'єднання обмоток зіркою за рівномірного навантаження співвідношення між лінійними та фазними напругами і силами струмів такі:  $U_L = \sqrt{3}U_\phi$  та  $I_L = I_\phi$ .

Сила струму нульового проводу, яка дорівнює геометричній сумі сил струмів трьох фаз, за рівномірного навантаження дорівнює нулеві. Отже, у нульовому проводі струм не протікатиме. і потреба в ньому відпадає. Наприклад, трифазні двигуни змінного струму вмикаються в мережу зіркою без нульового проводу.



**Мал. 2. Схема чотирипровідної системи.**

За нерівномірного навантаження сила струму в нульовому проводі не дорівнює нулеві, тому він обов'язково має бути в чотирипровідній системі, хоча його й виконують з меншою, ніж у лінійних проводів, площею поперечного перерізу. У разі відсутності нульового проводу або його обриву за нерівномірного навантаження виникає різка зміна напруги (мал. 3). Так, якщо у фазі А навантаження немає, а у фазах В і С навантаження однакові, то за відсутності нульового проводу навантаження у фазах В і С будуть ввімкнені послідовно на лінійну напругу, яка рівномірно розподілиться між ними (у разі однакових навантажень). Отже, опори навантажень у фазах В і С будуть під напругою, яка дорівнює половині лінійної



**Мал. 3.**

**Векторна діаграма напруг за нерівномірного навантаження і відсутності нульового проводу.**

напруги, тобто  $U_B = U_C = U_{л}/2 = U\sqrt{3}/2 = 0,86U_{\phi}$ . Нейтральна точка зміститься в точку О так, що напруга фази А дорівнюватиме  $1,5U_{\phi}$ .

Виходить, що від'єднання нульового проводу за нерівномірного навантаження недопустиме. Тому нульовий провід виконують завжди «глухим», тобто в ньому не встановлюють запобіжників, вимикачів тощо.

Для безпеки обслуговування нульовий провід заземлюють, якщо немає регулярного контролю за опором ізоляції.

Дуже цінним у чотирипровідної системи є можливість ввімкнення двох приймачів енергії на різні напруги. Для цього їх вмикають між лінійними проводами та нульовим проводом, з'єднуючи зіркою. Ці приймачі будуть ввімкнені на фазну напругу. Другу групу приймачів з'єднують трикутником так, щоб вони були ввімкнені тільки між лінійними проводами і перебували під лінійною напругою, яка в  $\sqrt{3}$  разів більша від фазної.

Чотирипровідна система широко використовується для електропостачання змішаних освітлювально-силових навантажень. Освітлювальні навантаження вмикають на фазну напругу, а силові (електродвигуни) — на лінійну.

Для трифазних систем справедливі співвідношення однофазного змінного струму:  $I_{\phi} = U_{\phi}/Z_{\phi}$ ,  $\cos\varphi = R_{\phi}/Z_{\phi}$ , де  $U_{\phi}$ ,  $Z_{\phi}$  та  $R_{\phi}$  — відповідно напруга, повний та активний опори розглядуваної фази.

### Потужність трифазного струму

Потужність, яку споживає навантаження від мережі трифазного струму, дорівнює сумі потужностей в окремих фазах:  $P = P_A + P_B + P_C$ .

У разі рівномірного навантаження потужність, яку споживає кожна фаза,  $P_{\phi} = U_{\phi}I_{\phi}\cos\varphi$ , де  $U_{\phi}$  — фазна напруга;  $I_{\phi}$  — сила фазного струму;  $\cos\varphi$  — коефіцієнт потужності навантаження.

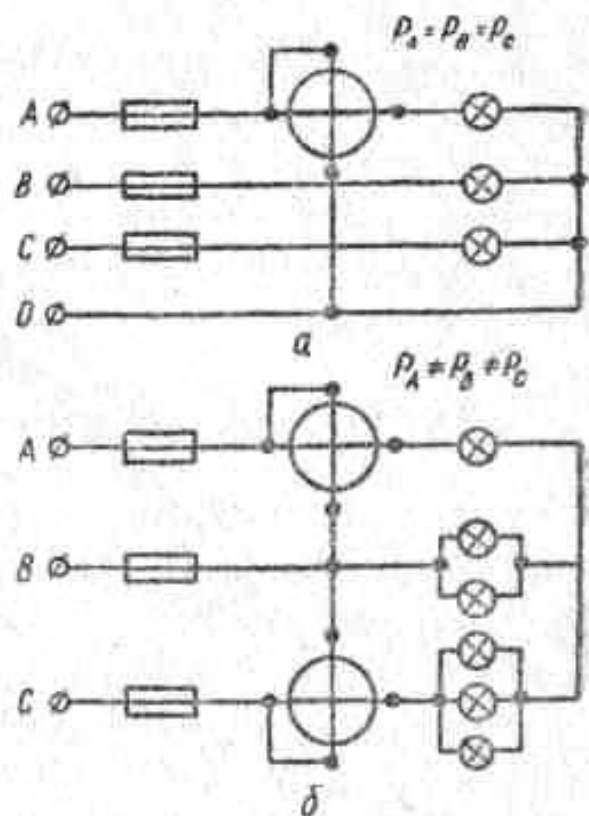
Потужність, споживана трьома фазами,  $P = 3U_{\phi}I_{\phi}\cos\varphi$ .

Якщо приймачі енергії з'єднані зіркою, співвідношення між лінійними та фазними напругами й силами струмів такі:  $U_{л} = \sqrt{3}U_{\phi}$ ;  $I_{л} = I_{\phi}$ . Звідси потужність, споживана навантаженням від трифазної мережі,  $P = \sqrt{3}U_{л}I_{л}\cos\varphi$ .

Для вимірювання потужності застосовують спеціальні вимірювальні прилади — ватметри. Якщо навантаження симетричне, або рівномірне, то потужність, яка споживається від трифазної системи, можна визначити одним однофазним ватметром. У чотирипровідній системі (з нульовим проводом) струмова обмотка ватметра вмикається послідовно в один із лінійних проводів, а обмотка напруги — між тим самим лінійним і нульовим проводами (мал. 4, а). За такого ввімкнення ватметр показує потужність в одній фазі  $P_{\phi}$ , а оскільки при рівномірному навантаженні потужності фаз однакові, то сумарна потужність трифазної системи  $P = 3P_{\phi}$ .

У трипровідній системі коло напруги ватметра ввімкнено на лінійну напругу мережі, а по його струмовій обмотці протікає лінійний струм. Тому потужність трифазної системи в  $\sqrt{3}$  разів більша від показів ватметра  $P_w$ , тобто  $P = \sqrt{3}P_w$ .

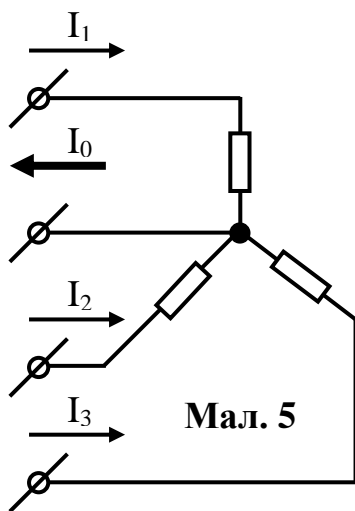
У разі несиметричного навантаження недостатньо одного ватметра для визначення потужності трифазної системи. У чотирипровідній системі треба застосовувати три ватметри, обмотки напруги яких вмикаються між нульовим і відповідним лінійним проводами. Кожен ватметр вимірює потужність однієї фази. Потужність трифазної системи дорівнює сумі показів трьох ватметрів:  $P = P_1 + P_2 + P_3$ . У схемі двох ватметрів обмотки напруги кожного ватметра з'єднані з вхідним затискачем струмової обмотки та лінійним проводом, що залишився вільним. Повна потужність трифазної системи дорівнює сумі показів ватметрів:  $P = P_1 + P_2$ .



**Мал. 4. Вимірювання потужності у трифазній системі:**

**а – симетричне навантаження у чотирипровідній мережі;**

**б — у трипровідній мережі за нерівномірного навантаження.**

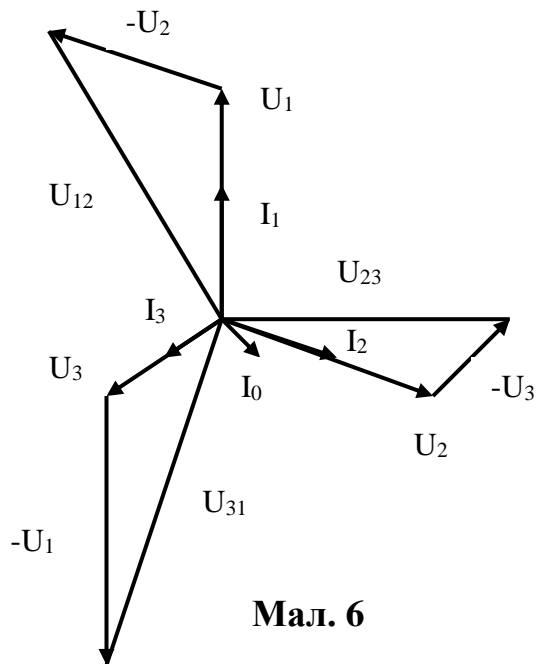


Одним з видів навантаження трифазної системи є включення споживачів «зіркою» (мал. 5). При такому включенні споживачів ел. енергії лінійний струм і струм окремих фаз рівні між собою. Струми окремих фаз можуть бути різні в залежності від навантаження. При активному навантаженні фазові напруги і струми співпадають по фазі. При рівномірному навантаженні всіх фаз, з'єднаних «зіркою», струми окремих фаз рівні між собою, рівні і падіння напруги в провідниках:

$$I_{\phi 1} = I_{\phi 2} = I_{\phi 3}; U_{\phi 1} = U_{\phi 2} = U_{\phi 3}$$

Фазові напруги і струми різних фаз зсунуті на кут  $120^\circ$ . Значення лінійної напруги в  $\sqrt{3}$  більше фазової і зсунуто відносно фазової на кут  $30^\circ$ . Алгебраїчна сума миттєвих струмів всіх фаз і векторна сума їх ефективних значень дорівнює нулю. В нульовому проводі струму нема. На мал. 6 показано векторну діаграму для несиметричного навантаження.

В деяких випадках в трифазному колі нульовий провід відсутній. В цьому випадку нульовий провід може бути приєднаний до нульової точки вторинної обмотки трансформатора. При несиметричному навантаженні струм в нульовому проводі не рівний нулю. Тому при симетричному навантаженні трифазної системи «зіркою» нульовий провід не підводять (трифазний трансформатор, двигуни трифазного струму і т.д.). Якщо навантаження не симетричне (побутове використання електроенергії лабораторії), нульовий провід обов'язково підводять.



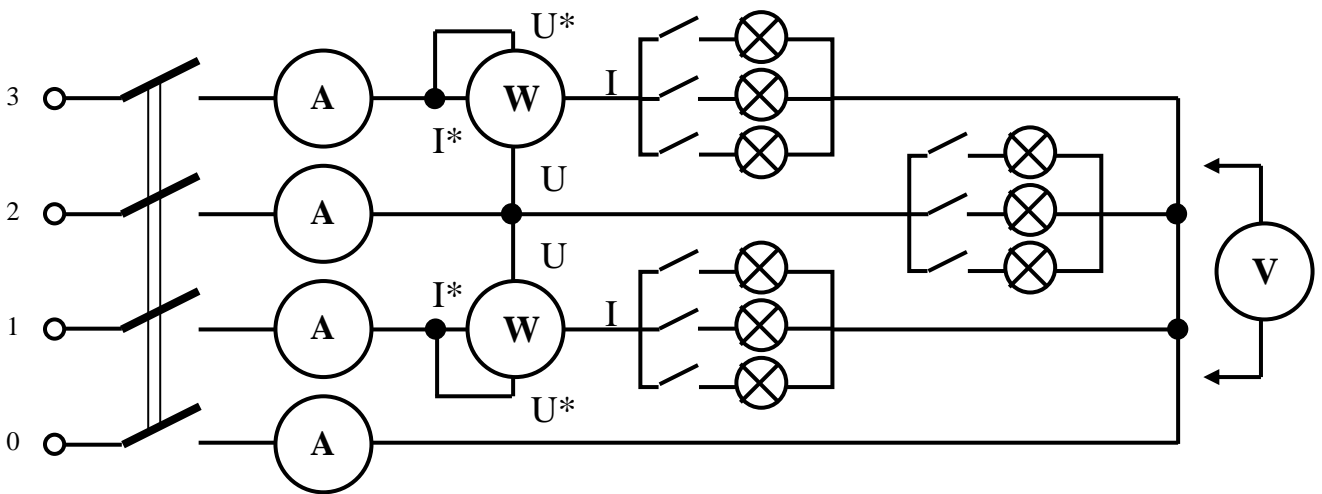
### Виконання роботи:

1. Скласти коло за схемою на мал. 3. Амперметри  $A_1, A_2, A_3$  розраховані на струм 3А, а амперметр  $A_0$  – на 2А. В кожну фазу включається навантаження на лампових

реостатах. Потужність вимірюється за допомогою двох ватметрів. Як показують теоретичні міркування, в цьому випадку незалежно від навантаження потужність трифазного кола дорівнює алгебраїчній сумі показників ватметрів.

2. Прослідкувати зміну потужності лінійних і фазових напруг, струмів в трифазній системі при включенні на “зірку” для таких випадків навантаження з нульовим проводом:

- а) при симетричному навантаженні фаз;
- б) при несиметричному активному навантаженні всіх фаз;



Мал. 7

в) при обриві фазового проводу другої фази для випадку несиметричного навантаження.

3. Заповнити таблицю вимірювань.
4. Для всіх перелічених випадків побудувати векторні діаграми струму і напруг.
5. Повторити всі виміри і побудову векторних діаграм для включення на “зірку” без нульового проводу.
6. Обчислити потужність за показниками амперметрів і ватметрів. Перевірити обчислення за показами ватметрів.

**Результати вимірювань та обчислень**

	$U_{\Phi 1},$ В	$U_{\Phi 2},$ В	$U_{\Phi 3},$ В	$U_{1-2},$ В	$U_{2-3},$ В	$U_{3-1},$ В	$I_1, A$	$I_2, A$	$I_3, A$	$P_{\Phi 1},$ Вт	$P_{\Phi 2},$ Вт	$P_{\Phi 3},$ Вт	$\Sigma P,$ Вт	$P,$ Вт	$I_0, A$	
Навантаження																
Симетричне																
Несиметричне																
Обрив фаз																

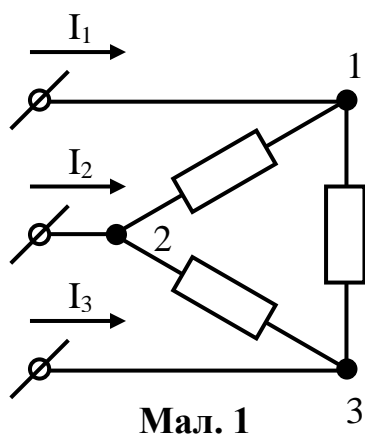
Без нульового провідника.

	$U_{\Phi 1},$ В	$U_{\Phi 2},$ В	$U_{\Phi 3},$ В	$U_{1-2},$ В	$U_{2-3},$ В	$U_{3-1},$ В	$I_1, A$	$I_2, A$	$I_3, A$	$P_{\Phi 1},$ Вт	$P_{\Phi 2},$ Вт	$P_{\Phi 3},$ Вт	$\Sigma P,$ Вт	$P,$ Вт	$I_0, A$	
Навантаження																
Симетричне																
Несиметричне																
Обрив фаз																

## Лабораторна робота №4

### Дослідження трифазного кола змінного струму при з'єднанні споживачів трикутником.

**Мета роботи:** прослідкувати зміну лінійних і фазових напруг і струмів трифазної системи при вмиканні споживачів електроенергії “трикутником” (мал. 1).



Мал. 1

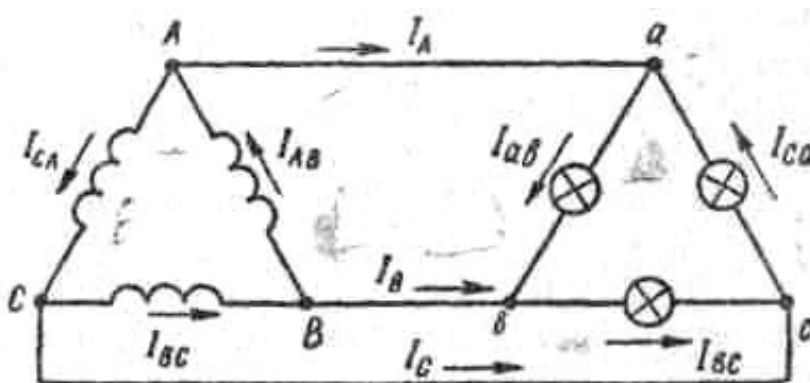
Якщо навантаження вмикають в мережу трифазного струму за схемою трикутник, то кожену групу навантаження приєднують до двох лінійних проводів (мал. 2), тобто лінійні провідники приєднуються до точок з'єднання початку однієї фази і кінця іншої. Напруга між лінійними провідниками дорівнює напрузі між початком і кінцем однієї фази. Отже, співвідношення між лінійними та

фазними напругами й силами струмів у разі з'єднання приймачів енергії трикутником такі:  $U_L = U_\phi$  і  $I_L = \sqrt{3}I_\phi$  (за рівномірного навантаження). Звідси потужність, споживана навантаженням,  $P = \sqrt{3} U_L I_L \cos\phi$ .

Отже, в разі рівномірного навантаження потужність, яка споживається від трифазної мережі, незалежно від способу ввімкнення навантаження виражається формулою  $P = \sqrt{3} U_L I_L \cos\phi$ .

При цьому джерело електричної енергії, яке живить споживачів, має бути розраховане на повну потужність:  $S = \sqrt{3} U_L I_L$ .

При такому включенні споживачів електричного струму лінійна напруга дорівнює фазовій. Напруги окремих фаз зсунуті одна відносно іншої на кут  $120^\circ$ .

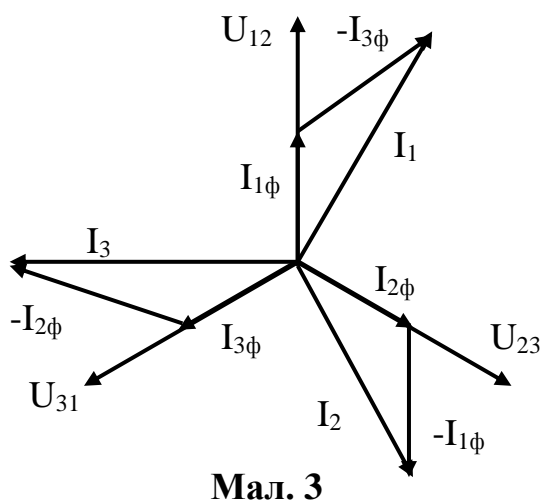


Мал. 2. Схема ввімкнення обмоток генератора і приймачів трикутником.

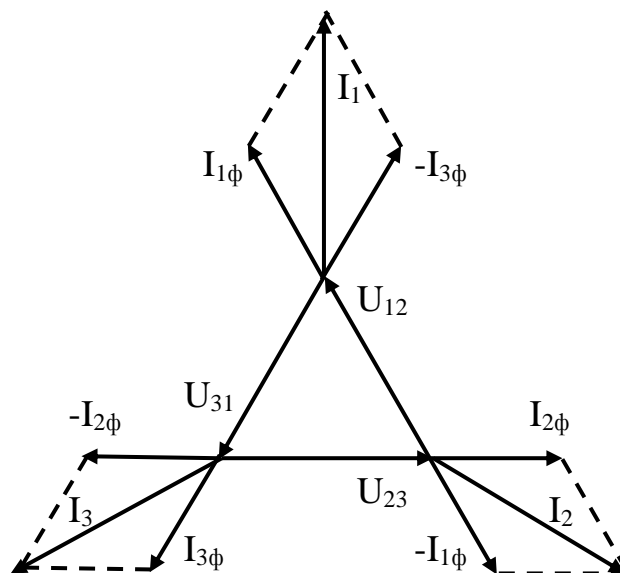


При активному симетричному навантаженні фазові струми співпадають по фазі з фазовими (лінійними) напругами, а лінійні струми більші фазових і відстають від них по фазі на кут  $30^\circ$ . Для симетричного навантаження векторну діаграму для напруг і струмів показано на мал. 3, а на мал. 4 – топографічну, на якій побудовано векторне співвідношення:  $I_1 = I_{1\phi} - I_{3\phi}$ ;  $I_2 = I_{2\phi} - I_{1\phi}$ ;  $I_3 = I_{3\phi} - I_{2\phi}$

Схему для досліду подано на мал. 4.



Мал. 3

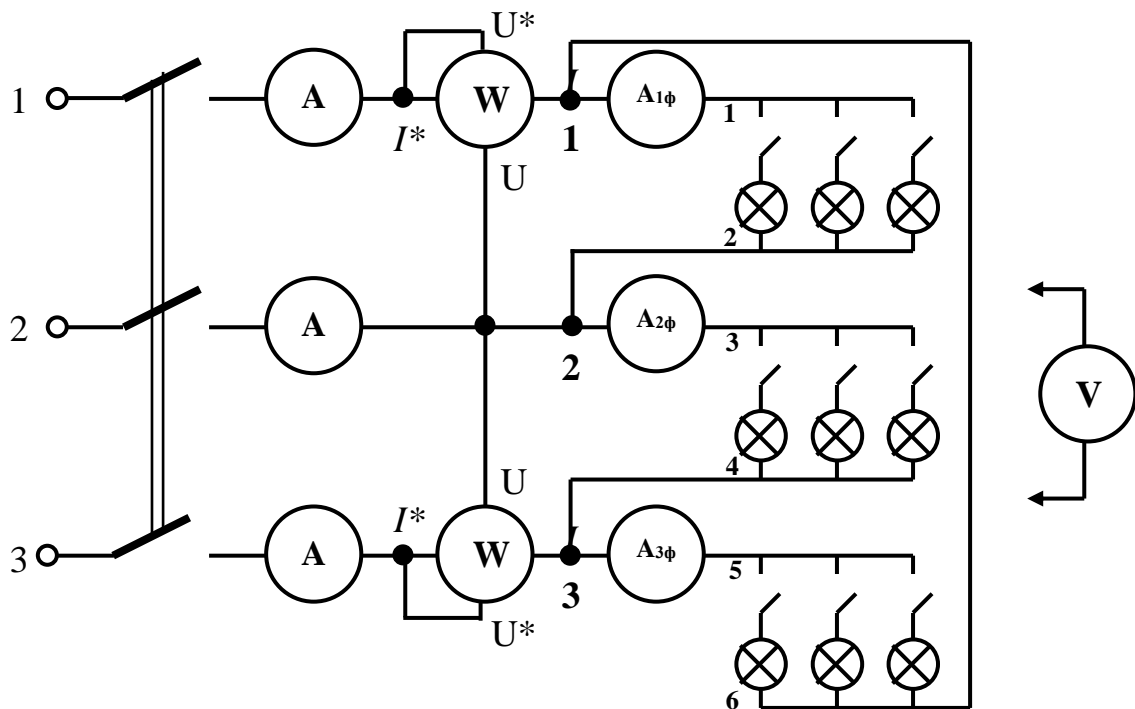


Мал. 4

Загальна потужність вимірюється за допомогою двох ватметрів, які з'єднані “зіркою”.  $P = P_1 + P_2$ . Амперметри  $A_1, A_2, A_3$  показують лінійні струми, амперметри  $A_{1\phi}, A_{2\phi}, A_{3\phi}$  – фазові. Лінійні і фазові напруги вимірюються за допомогою одного вольтметра.

## Виконання роботи:

1. Зібрати коло за схемою на мал. 5.



Мал. 5

2. Прослідкувати зміну потужності, лінійних і фазових значень напруг і струмів трифазної системи при включенні споживачів “трикутником” для таких випадків розподілу навантаження:

- а) симетричне активне навантаження всіх трьох фаз;
- б) несиметричне активне навантаження всіх трьох фаз;
- в) розвантаження однієї фази;
- г) обрив провода другої фази при несиметричному активному навантаженні всіх трьох фаз;
- д) розвантаження двох фаз.

3. Побудувати діаграми струму і напруг для всіх випадків.

4. Обчислити потужність окремих фаз за показами амперметра і вольтметра.

Прівняти з показампи ватметра  $P_{\phi_i} = U_{\phi_i} \cdot I_{\phi_i}$ .

### Результати вимірювань та обчислень

Навантаження	$U_{1-2},$ В	$U_{2-3},$ В	$U_{3-1},$ В	$I_{1\phi},$ А	$I_{2\phi},$ А	$I_{3\phi},$ А	$I_1, А$	$I_2, А$	$I_3, А$	$P_{\Phi 1},$ Вт	$P_{\Phi 2},$ Вт	$P_{\Phi 3},$ Вт	$\Sigma P,$ Вт	$P,$ Вт
а) симетричне активне навантаження всіх														
б) розвантаження однієї фази;														
в) розвантаження двох фаз;														
г) несиметричне активне навантаження всіх трьох фаз.														
д). обрив проводу другої фази при несиметричному активному навантаженні всіх														

$P$  – сума двох ватметрів.

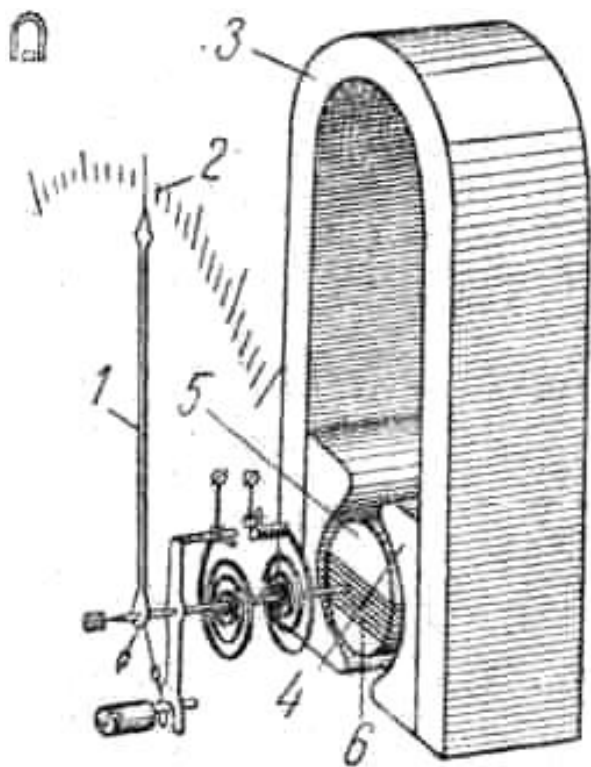
## Лабораторна робота №5

### Вивчення електровимірювальних приладів.

**Мета роботи:** 1. Ознайомитись з класифікацією, будовою та принципом дії електровимірювальних приладів різних систем. Навчитись шунтувати прилади, а також підраховувати опір додаткових опорів до вольтметрів.

**Обладнання:** мегомметр, місток Уінстона, тестер (авометр), частотомір, шкільний гальванометр, магазин опорів, джерело струму, з'єднувальні проводи, резистори, випрямляючі діоди.

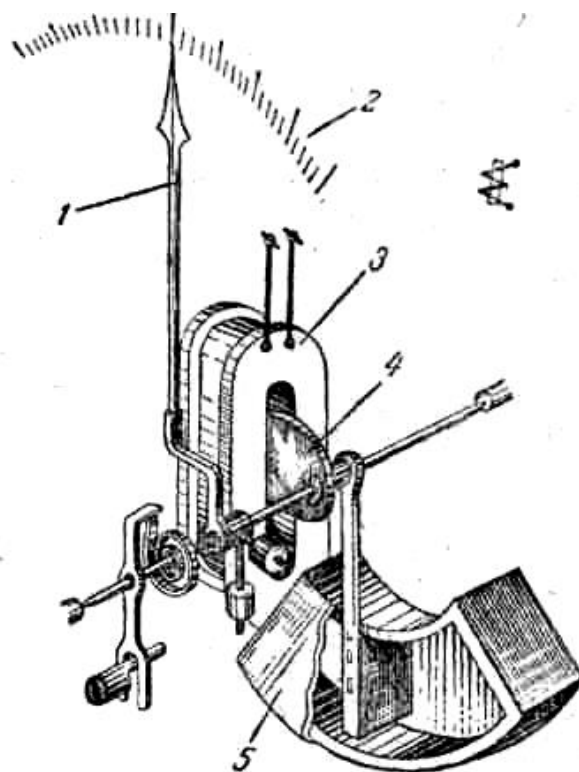
#### Теоретичні відомості:



Мал. 1.

**Будова магнітоелектричного приладу і його умовне позначення.**

1 — стрілка; 2 — рівномірна шкала; 3 — магніт; 4 — полюсні наконечники; 5 — нерухомий сердечник; 6 — катушка, що обертається (рамка).



Мал. 2.

**Будова електромагнітного приладу і його умовне позначення**

1 — стрілка; 2 — нерівномірна шкала; 3 — нерухома катушка; 4 — якір з м'якої сталі; 5 — повітряний заспокоювач.

**Магнітоелектрична система.** Це — основний тип приладу постійного струму, а в поєднанні з відповідними випрямлячами (детекторними або ламповими) — і високоякісний прилад змінного струму.

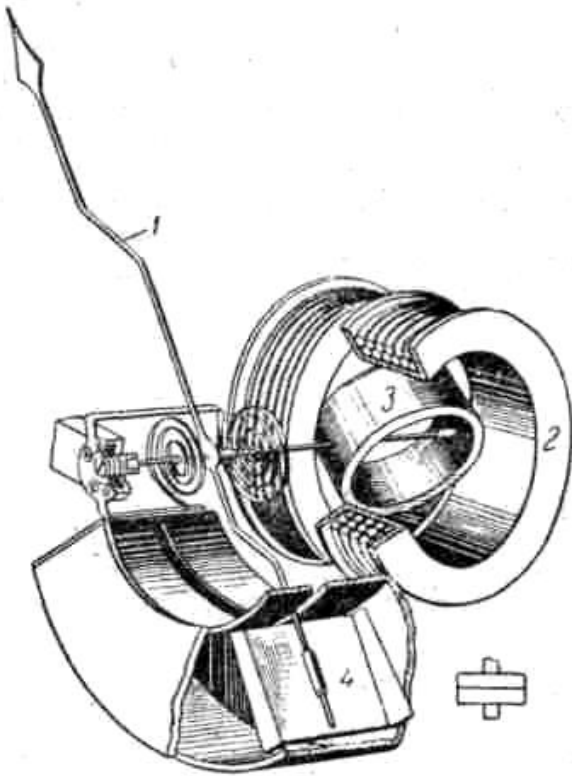
Магнітоелектричний механізм складається (мал. 1) з котушки, закріпленої на осі і що обертається в зазорі сильного підковоподібного магніту. Спиральні пружини ставлять котушку в нульове положення і в той же час використовуються для підведення до неї струму.

Коли в катушці протікає струм, то внаслідок його взаємодії з магнітним полем магнітакатушка обертається і займає разом з прикріпленою до неї стрілкою, що рухається по шкалі, певне положення, яке відповідає рівності обертаючої сили і протидіючої сили пружин. Обертаюча сила наростає прямолінійно із струмом, так що поділки на шкалі наносяться абсолютно рівномірно.

Приєднуючи до кола прилад, треба стежити за правильною полярністю з'єднань, оскільки при зворотному напрямі струму в катушці вона обертається у зворотний бік. Це використовується в магнітоелектричних приладах з нулем посередині шкали.

**Електромагнітна система** (мал. 2) може працювати і при постійному і при низькочастотному змінному струмі. Принцип її дії полягає в наступному. Закріплена на осі стрелки пластинка з м'якої сталі (якір) втягується всередину нерухомого електромагніту, по обмотці якого проходить струм, що вимірюється. Пластинка повертається разом із стрілкою, поки обертаюче зусилля не зрівноважиться протидіючою силою спіральної пружини. Шкала електромагнітного приладу нерівномірна (поділки спочатку розташовані тісніше).

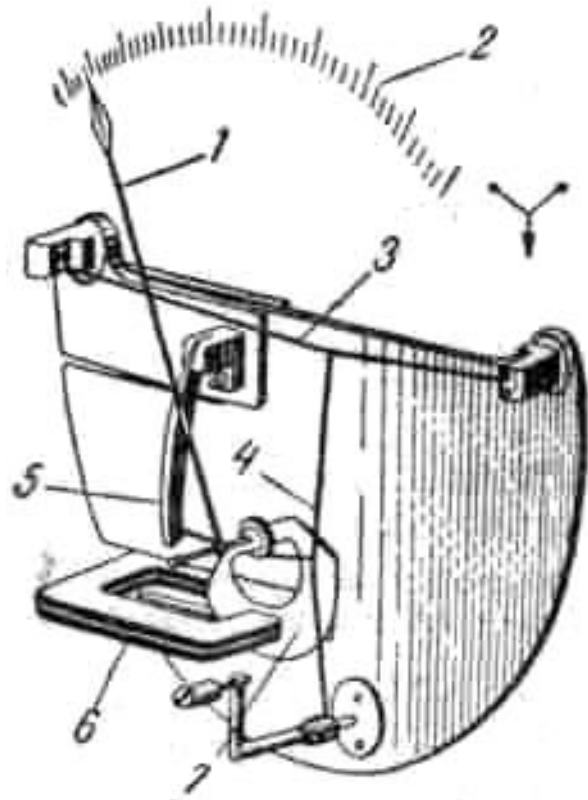
**Електродинамічна система** (мал. 3). Прилади цього роду переважно призначені для вимірювання потужності в колах постійного і змінного струму, тобто є ватметрами. Всі електродинамічні ватметри засновані на взаємодії двох магнітних полів, що створюються двома катушками, до однієї з яких (рухомої) прикріплена стрілка. В одній катушці протікає струм кола, що вимірюється, а до іншої прикладається напруга того ж кола. В зв'язку з цим відхилення стрілки пропорційне як струму, так і напрузі, тобто потужності.



Мал. 3.

**Будова електродинамічного приладу і його умовне позначення.**

1 — стрілка; 2 — нерухома катушка; 3 — катушка, що обертається; 4 — повітряний заспокоювач.

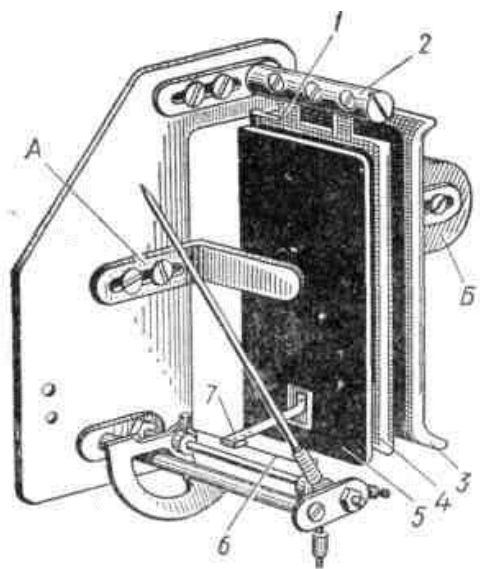


**Мал. 4. Будова теплового приладу і його умовне позначення.**

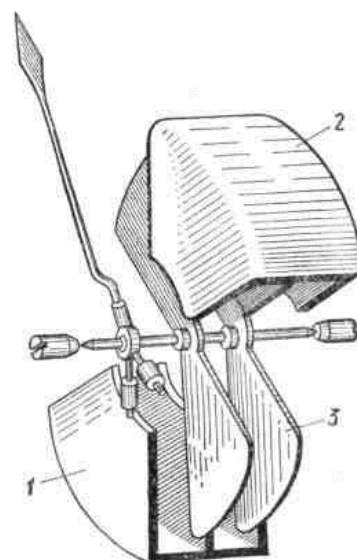
1 — стрілка; 2 — нерівномірна шкала; 3 — платино-іридієва нитка; 4 — допоміжна нитка; 5 — пружина; 6 — заспокійливий магніт; 7 — алюмінієва пластинка, в якій виникають гальмуючі струми.

**Теплова система** (мал. 4). Дія теплового приладу заснована на тепловому розширенні платино-іридієвого дроту, по якому проходить струм, що вимірюється. Оскільки тепла дія струму не залежить від його частоти, то ці прилади зручні при високочастотних вимірюваннях. Теплові прилади розраховані лише на відносно великі струми, які спричиняють достатню для видовження дроту теплову дію. Тому вони застосовуються в основному як амперметри; як вольтметри такі прилади неекономічні і не можуть порівнюватись із забезпеченими діодами або термоелементами магнітоелектричними приладами. Шкала теплового приладу нерівномірна.

**Прилади електростатичної системи.** Механізми приладів електростатичної системи бувають двох конструкцій. У першій на ізоляційній основі змонтовано дві прямокутні металеві паралельні пластини 3 і 5 (мал. 5), з'єднані з затискачами А і Б приладу. Між цими пластинами, що утворюють повітряний конденсатор, на кронштейні 2 за допомогою тонких бронзових смужок 1 підвішено тоненьку алюмінієву пластину 4, яку кронштейн 2 з'єднує з пластиною 5. Другим кінцем через тягу 7 вона з'єднана з віссю 6, на якій установлено стрілку і сектор магнітоіндукційного заспокоювача.



Мал. 5



Мал. 6

При вмиканні напруги до затискачів А і Б пластини 3, 4 і 5 зарядяться. Пластини 4 і 5, заряджені однойменним зарядом, відштовхуватимуться, і разом з цим пластина 4 притягуватиметься до пластини 3, зарядженої протилежним зарядом. Пластина 4, відхиляючись від положення рівноваги, передаватиме рух на вісь 6, тому стрілка відхилитиметься. Відхилення пластини зрівноважується протидіючим моментом спіральної пружини, встановленої на осі.

Друга конструкція механізму (мал. 6) складається з нерухомих 1 і 2 та рухомих 3 пластин, закріплених на осі із стрілкою і протидіючою спіральною пружиною та заспокоювачем. Вимірювану напругу підводять до нерухомих і рухомих пластин. У результаті взаємодії зарядів на пластинах рухомі пластини втягуються між нерухомі, від чого ємність утворюваного ними конденсатора зростає, тобто енергія заряду конденсатора змінюється за законом

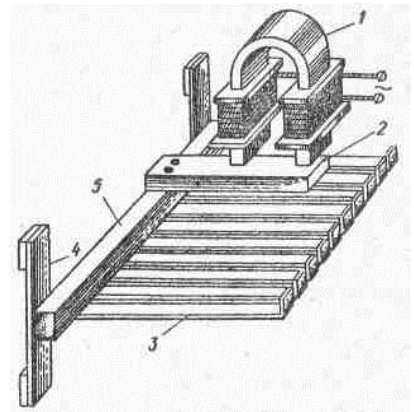
$$W_c = CU^2/2.$$

Прилади електростатичної системи мають великі переваги над приладами інших систем, а саме:

1. Під час вимірювання напруги в колах постійного струму власна споживана потужність дорівнює нулю і дуже мала в колах змінного струму, оскільки ємність системи при нарузі до 3000 В не перевищує 10 пФ, а до 30 кВ — 12 пФ. У зв'язку з цим прилади електростатичної системи можна використовувати для вимірювань у колах дуже високої частоти — аж до 40 МГц.

2. За допомогою цих приладів можна вимірювати дуже високі напруги в колах змінного струму, не застосовуючи занадто дорогих для такої напруги трансформаторів, які замінюють ємнісними подільниками напруги.

Прилади **вібраційної системи** призначаються для вимірювання частоти змінного струму. Дія вібраційних приладів ґрунтується на використанні явищ електромагнетизму й механічного резонансу. Кожна механічна система, яка здатна виконувати коливальні рухи, має певну частоту власних коливань, яка обумовлюється масою тіла та пружністю системи. У разі резонансу, тобто коли збігаються частоти власних коливань системи і коливань зовнішнього джерела, амплітуда коливань даної механічної системи різко збільшується. Ця властивість використовується у вимірювальних приладах вібраційної системи.



Мал. 7.

### Будова частотоміра вібраційної системи

Вібраційний частотомір (мал.7) складається з електромагніту 1, сталевого якоря 2, закріпленого на бруску 5 та кількох вібраторів 3 зрізною довжиною або масою. Кінці вібраторів відігнуті під прямим кутом і розміщені горизонтально в щілині на шкалі частотоміра. Брусок 5 прикріплений до пластинчастих пружин 4 і це забезпечує певну рухомість механічної системи.

Якщо по обмотці електромагніту пропустити змінний струм, то якорь 2 дуже притягуватиметься до полюсів у ті моменти, коли сила струму буде найбільшою, тобто два рази за період. Коливання якоря передаються вібраторам. З найбільшою амплітудою коливатиметься вібратор, власна частота коливань якого збігається з



частотою коливань якоря. Цифра, яка знаходиться на шкалі напроти вібратора, що коливається з найбільшою амплітудою, покаже частоту струму в мережі.

Більшість частотомірів вібраційної системи призначені для вимірювання частот 45...55 Гц. Проте є й частотоміри, розраховані на вимірювання більш високих частот (1550...1650 Гц).

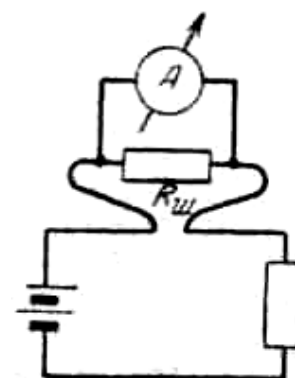
Перевагою приладів вібраційної системи є незалежність показів від напруги в мережі. Недоліки цих приладів полягають у залежності показів від механічних вібрацій, неможливість вимірювання високих частот і переривність шкали, внаслідок чого утруднюються вимірювання на проміжних частотах, коли одночасно коливаються кілька вібраторів.

### Схеми включення електровимірювальних приладів

**Схема амперметра.** Амперметром називається прилад для вимірювання струму. Зрозуміло, що для цього він повинен включатися в розрив кола струму, що вимірюється, тобто вводиться в ланцюг послідовно.

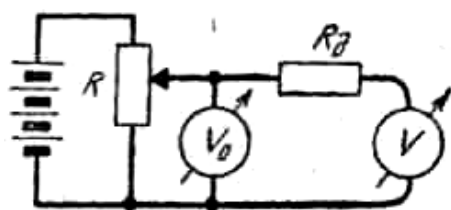
Якщо необхідно виміряти струми більше, ніж ті, на які розрахований прилад, то він повинен шунтуватися відповідним опором, з тим щоб прийняти на себе тільки частину струму, що вимірюється (мал. 9). Розрахунок

опору шунта проводиться за формулою  $R_{ш} = \frac{r}{n-1}$



Мал. 9.

**Включення амперметра з шунтом**



Мал. 10.

**Схема для підгонки додаткового опору.**

$V_0$  — зразковий вольтметр;

$V$  — прилад, до якого підбирається додатковий опір  $R_д$ .

де  $R_{ш}$  — опір шунта;

$r$  — опір катушки приладу;

$n$  — число, що показує, в скільки разів треба збільшити межі вимірювання.

Шунт не повинен нагріватися струмом, який протікає в ньому.

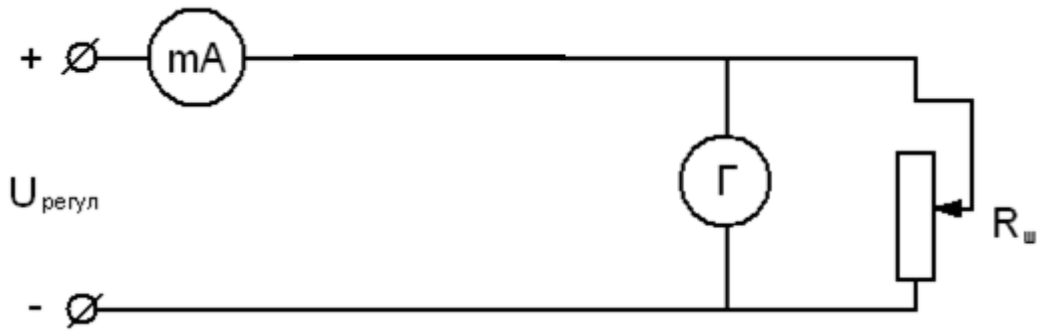
**Розрахунок додаткових опорів.** Більшість приладів для використання їх як вольтметрів вимагають включення додаткових опорів. Якщо струм, що викликає повне відхилення стрілки приладу, дорівнює  $I$ , а опір самого приладу  $r$ , то

величина додаткового опору для шкали з максимальною напругою  $U$  визначається за формулою  $R_{д} = \frac{U}{I} - r$

Якщо треба розширити межі вимірювання вольтметра, який вже має додатковий опір, то при повному його опорі (між затискачами), що дорівнює  $R$ , додатковий опір знаходиться за формулою  $R_{д} = R \cdot (n - 1)$ , де  $n$  — коефіцієнт розширення шкали.

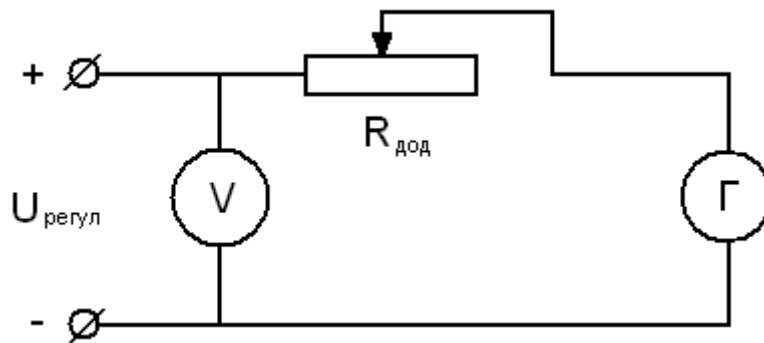
### Виконання роботи:

1. Виміряти за допомогою мегометра значення великого опору. Для цього приєднати до клем приладу резистор великого опору. Обертаючи ручку мегометра зі швидкістю не менше, ніж 120 обертів за звилину, зняти покази приладу.
2. Виміряти за допомогою містка Уінстона значення малого опору. Для цього приєднати до клем приладу резистор малого опору. Натиснути на кнопку вимірювання. В залежності від того, в яку сторону відхилиться стрілка “много” чи “мало” змінити значення множників: першого – в діапазонах 1000...0,1, другого – в діапазоні 0,5...50. Коли стрілка зупиниться на поділці 0, записати значення добутку в Омах.
3. Навчитись користуватись універсальним вимірювальним приладом (типу авометр), цифровим вольтметром.
4. Виміряти, користуючись частотоміром вібраційної системи частоту змінного струму в мережі 220 В.
5. Розрахувати, знаючи чутливість і внутрішній опір шкільного гальванометра, опір шунта, який перетворює гальванометр в амперметр із шкільною межею вимірювань – 100 мА.
6. Зібрати схему, показану на мал. 11 і переконатись в правильності розрахованого шунта.



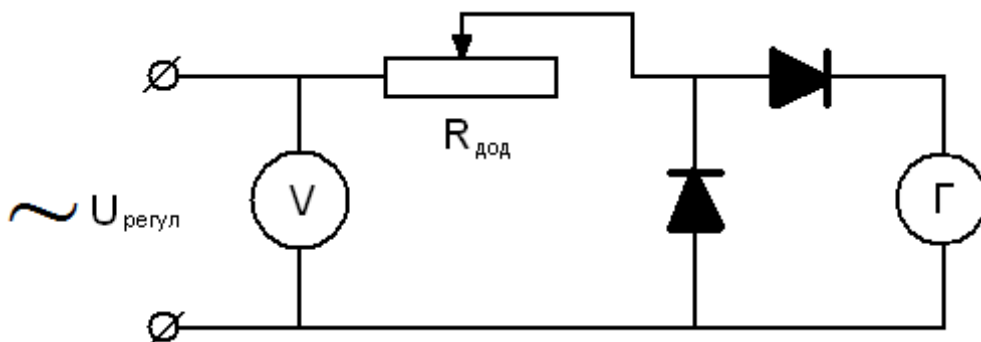
Мал. 11

7. Розрахувати до шкільного гальванометра величину додаткового опору, який перетворює гальванометр в вольтметр із межею вимірювань 10 В.
8. Збирають схему (мал. 12) і перевіряють правильність розрахованого додаткового опору.



Мал. 12

9. За формулою  $R_{\text{дод}} = \frac{U - I_{\text{нр}} \cdot r_{\text{нр}}}{2,2 \cdot I_{\text{нр}}}$  розрахувати додатковий опір до вольтметра змінного струму із шкалою  $U = 10\text{В}$ .
10. Зібрати схему (мал. 13) та перевірити вірність зроблених розрахунків.



Мал. 13

11. Проградувати одержаний вольтметр змінного струму та побудувати графік залежності:  $U = f(n)$ , де  $n$  – поділки шкали гальванометра.

### Контрольні запитання:

1. Як одержати формулу, за якою підраховують опір шунта до амперметра?
2. Як одержати формулу для обчислення величини додаткового опору до вольтметра?
3. Чому шкала вольтметра змінного струму нелінійна?
4. Що таке чутливість вимірювального приладу?

### Результати вимірювань

$R_{x1}, \text{ Ом}$	$R_{x2}, \text{ Ом}$	$\nu_{220}, \text{ Гц}$	$R_{ш}, \text{ Ом}$	$R_{д}, \text{ Ом}$	$R_{д\sim}, \text{ Ом}$

## *Лабораторна робота №6*

### **Вивчення індукційного лічильника електричної енергії та перевірка його роботи.**

- Мета роботи:** 1. Ознайомитись з будовою і принципом дії однофазного лічильника індукційної системи, а також з особливостями перевірки та регулювання лічильника.
2. Навчитись будувати графіки перевірки лічильника.

#### **Теоретичні відомості.**

Безпосереднє вимірювання роботи електричного струму проводиться за допомогою лічильників. Широкого поширення набув індукційний однофазний лічильник змінного струму, зображений на мал. 1.

На мал. 2 у схематичному вигляді подано тільки ті деталі, які необхідні для з'ясування принципу дії лічильника.

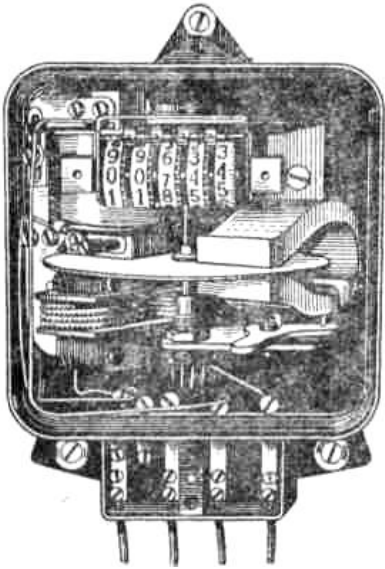
Лічильник має наступну будову. Легкий алюмінієвий диск одним краєм поміщений у вузькому зазорі між сердечниками двох обмоток. Обмотка А має велике число витків тонкого дроту і включена паралельно навантаженню (як вольтметр). Вона утворює магнітний потік  $B_A$ , пропорційний напрузі джерела струму.

Обмотка Б складається з декількох витків товстого дроту і включена послідовно з навантаженням (як амперметр). Вона утворює потік індукції  $B_B$ , пропорційний величині струму в навантаженні.

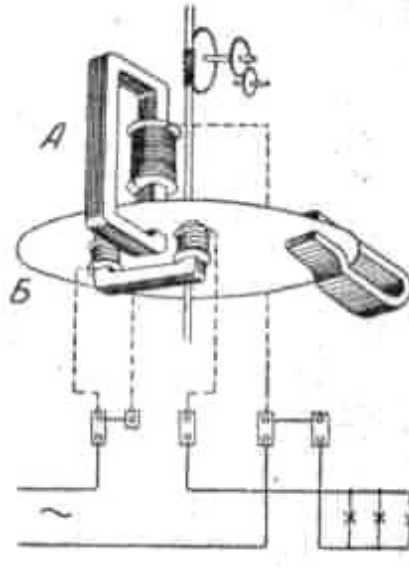
Завдяки великій індуктивності першої котушки між струмами в котушках створюється зсув фаз, близький до  $90^\circ$ , а в зазорі, де поміщений диск, утворюється біжуче магнітне поле, що захоплює за собою диск.

Включення в мережу змінного струму проводиться по схемі, зображеній на мал.

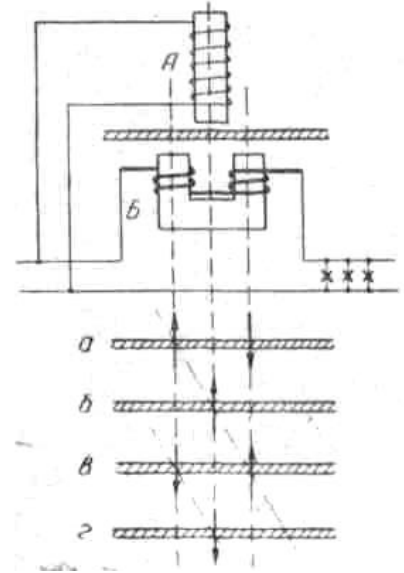
3. При включенні навантаження диск починає обертатися.



Мал. 1



Мал. 2



Мал. 3

Утворення біжучого поля можна пояснити так. Нехай в деякий момент струм в обмотці Б (мал. 3) досяг максимуму і має такий напрям, що його магнітне поле пронизує диск, як показано на мал. 3,а. Через  $\frac{1}{4}$  періоду струм в обмотці Б зменшиться до нуля, а в обмотці А досягне максимуму, і магнітне поле пронизуватиме диск, як показано на мал. 3,б. В наступні моменти поля розташуються, як показано на мал. 3,в і г. При цьому можна помітити, що магнітний потік переміщується вправо.

Переміщення магнітного поля викликає появу в диску вихрових струмів. Обертовий момент з'являється завдяки взаємодії біжучого магнітного поля і магнітного поля вихрових струмів в диску.  $M_{об} = K_1 U_2 I_1 \cos \varphi = K_1 P$ , де  $I_1$  – струм навантаження,  $U_1$  – напруга в навантаженні,  $\varphi$  – зсув фаз між струмом і напругою,  $K_1$  – коефіцієнт пропорційності,  $P$  – середня потужність.

Протилежна сторона диска знаходиться між двома полюсами сильного постійного магніта і при своєму русі зазнає гальмування, яке посилюється у міру збільшення швидкості обертання диска. Гальмівний момент пропорційний числу обертів диска за одиницю часу:  $M_2 = K_2 \cdot n$ .

При збільшенні струму або напруги (потужності) в колі швидкість обертання диска збільшується, поки обертовий момент не буде зрівноважений моментом гальмуючої сили. Якщо не враховувати тертя, то рівномірний рух встановиться тоді, коли  $M_{об} = M_2$ . При подальшому збільшенні потужності знову збільшується обертовий момент, внаслідок цього зростає швидкість обертання, поки гальмуючий

момент не досягне величини обертаючого моменту. Після цього швидкість буде постійною.

Таким чином швидкість обертання диска пропорційна струму і напрузі, а число обертів, яке здійснює диск за певний проміжок часу, — пропорційне швидкості його обертання і часу. Отже, про роботу струму або споживання електричної енергії на даній ділянці кола можна судити по числу обертів диска.

З останнього рівняння знаходимо кількість обертів за одиницю часу:

$$n = \frac{K_1}{K_2} \cdot P = K \cdot P, \text{ де } K - \text{ стала лічильника, що залежить від його конструкції.}$$

За час  $t$  диск зробить  $N$  обертів:  $N = \int_0^t n dt = K \int_0^t P dt = K \cdot W$ , де  $W$  — енергія, що виділилась за час навантаження. Стала лічильника  $\epsilon$  в його паспорті. Або визначається  $N = KW = KPt$ ;  $K = \frac{N}{Pt}$ .



Мал. 4

На таблиці лічильника звичайно вказується, скільком оборотам диска відповідає споживання енергії 1 квт-год. На мал. 4 подано табличку лічильника, на якій подано деякі відомості про лічильник і є ряд маленьких вікон з цифрами. Дві цифри, обведені справа червоною рамкою, показують десяті і соті частки кіловат-години. Тисячні частки кіловат-години (вати-година) рахують

по поділках, нанесених на краю барабана, які видно в крайньому правому вікні.

Для обліку електроенергії треба зняти початкові покази лічильника і кінцеві. Різниця показів визначає кількість витраченої електричної енергії.

Покази лічильника будуть максимальними, коли у всіх вікнах з'явиться цифра 9 і далі у всіх вікнах з'являться нулі, що відповідатиме 1000,00. Після цього рахунок почнеться з одиниці в правому вікні.

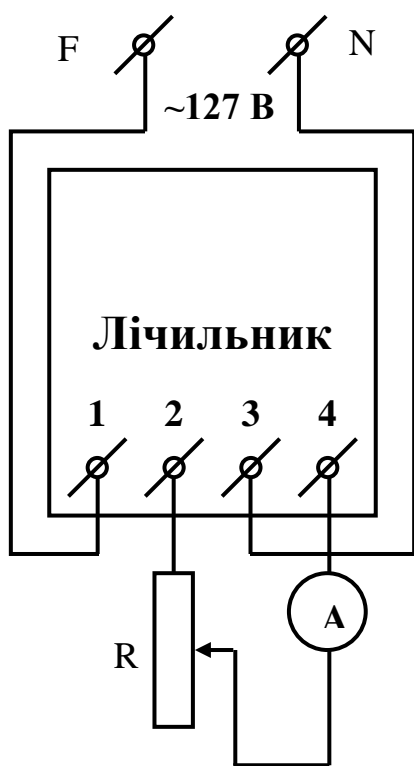
Початкові покази лічильника можуть бути більшими від кінцевих. Наприклад, початкові покази 796,24 квт-год, а кінцеві — 34,18 квт-год. Зрозуміло, що в цьому

випадку рахунок перейшов через тисячу. Тоді кількість витраченої електричної енергії треба підраховувати так:  $1000 - 796,24 + 34,18 = 237,94$  квт-год.

Однофазні лічильники випускаються промисловістю на номінальні напруги 127 В, 220 В і струми 5 А, 10 А.

### Виконання роботи:

1. Вивчити будову і розташування окремих деталей електричного лічильника, звернути увагу на включення його в коло.
2. Визначити сталу лічильника. Зібрати схему для визначення сталої лічильника за допомогою амперметра (мал. 5). Після перевірки схеми керівником визначити сталу лічильника при номінальній напрузі і шести різних значеннях струмів в навантаженні. Для кожного навантаження дослід необхідно повторити двічі і взяти середнє арифметичне з двох вимірів. Результати запишіть у таблицю:



Мал. 5

3. Побудувати графік залежності  $K = f(I)$

4. Зробити висновок про придатність лічильника.

Примітка: в формулі  $K = \frac{N}{Pt}$  кількість обертів N рахуємо на лічильнику, час t в годинах вимірюємо секундоміром.  $P = UI$ . Рахувати час 20 обертів.

### Контрольні питання:

1. Що таке самохід лічильника і як його позбутись?
2. Як відбувається компенсація моменту тертя в лічильнику?
3. Чому при включенні лічильника до першої клеми приєднується фазовий провід, а до третьої – нульовий?



№ п/п	t, (год)	N, об	I, A	U, В	P, кВт	K, $\frac{об}{кВт \cdot год}$
1.				127		
2.						
3.						
4.						
5.						
6.						

## Лабораторна робота №7

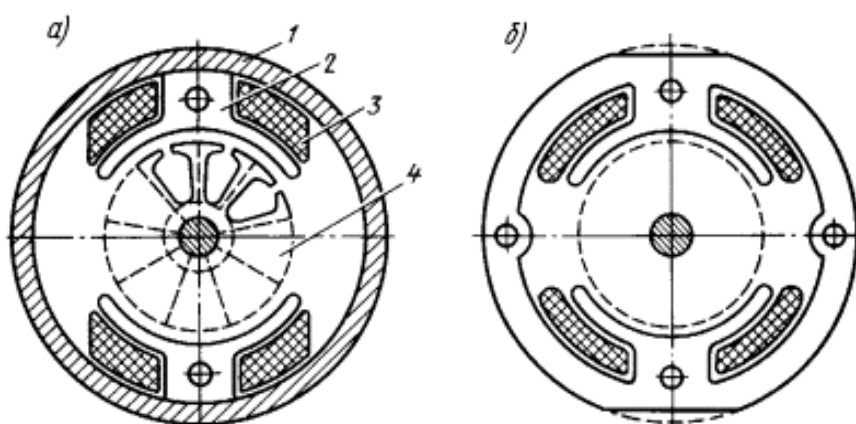
### Дослідження роботи колекторного електродвигуна на змінному струмі.

**Мета роботи:** Ознайомитись з будовою двигуна змінного струму; ознайомитись з методикою дослідження двигуна змінного струму за допомогою механічного гальмування; дослідити механічну і робочу характеристики двигуна і визначити номінальні величини, що характеризують його роботу; ознайомитись з методикою покращення коефіцієнта потужності установки.

#### Теоретичні відомості:

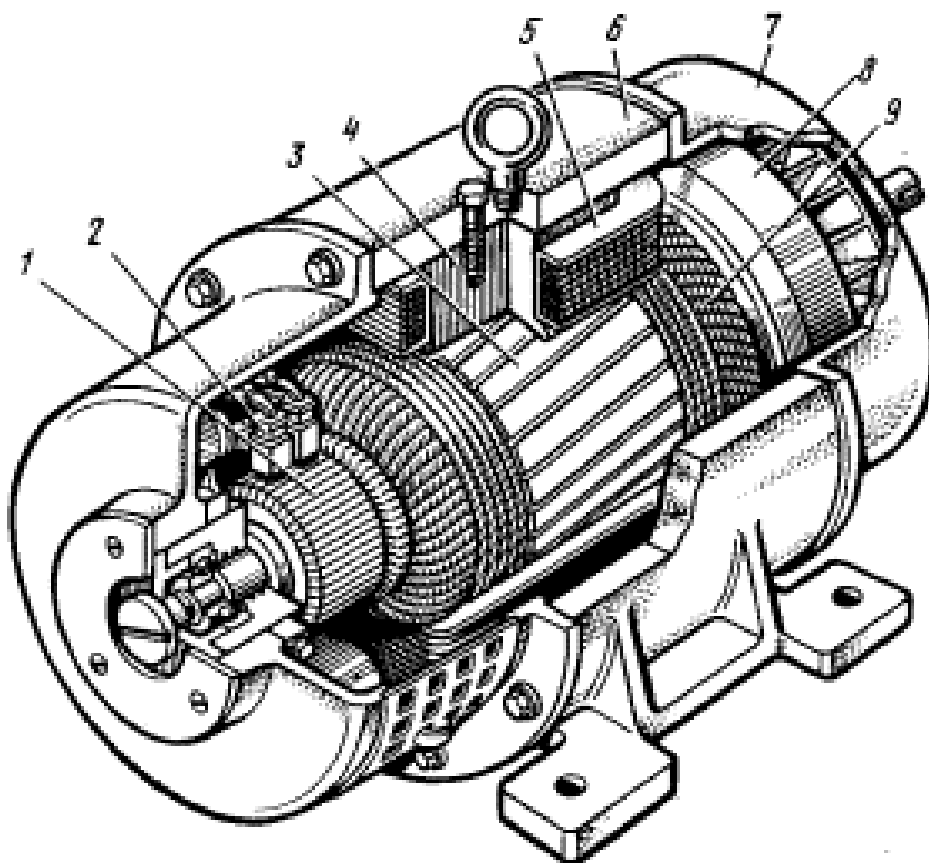
##### Будова колекторних електричних машин

Електрична машина постійного струму складається з нерухомого статора і якоря, що обертається. Статор включає станину і головні полюси з полюсними котушками. Як правило, в колекторних двигунах малої потужності з електромагнітним збудженням використовують двохполюсні статори двох конструкцій – збірний і суцільний шихтований. Станина збірного статора (мал. 1, а) являє собою суцільну трубу 1, до внутрішньої поверхні якої гвинтами кріпляться полюси. Осердя 2 головних полюсів виготовляють у вигляді сталю бруска або набирають з штампованих сталю пластин. Кожний головний полюс на стороні, що обернена до якоря 4, має полюсний наконечник, що забезпечує необхідне розподілення магнітної індукції в повітряному проміжку. Полюсні котушки 3 з'єднуються послідовно і утворюють обмотку збудження, при ввімкненні якої до джерела постійного струму в магнітній системі двигуна створюється магнітне поле.



Мал. 1. Статори колекторних двигунів: а – збірний, б – шихтований

На мал. 2 зображено будову колекторного двигуна постійного струму з самовентиляцією. Статор має збірну конструкцію і складається з станини 6, головних полюсів 4 з полюсними котушками 5 каркасного типу, тобто намотані на каркас з ізоляційного матеріалу. Якір двигуна включає осердя, обмотку якоря, колектор і вал.



**Мал. 2. Будова двигуна постійного струму**

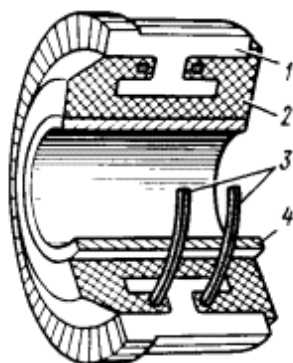


**Мал.3. Лист сердечника якоря**

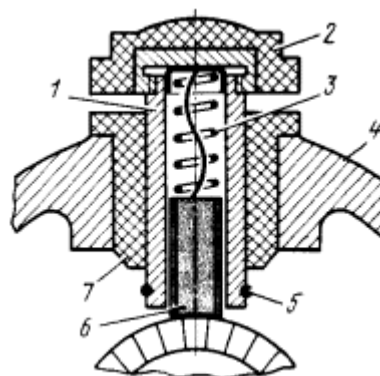
Осердя якоря 3 – це циліндр, набраний з штампованих листів електротехнічної сталі (мал.3). Перед збіркою ці листи покривають спеціальним ізоляційним лаком. Така конструкція осердя якоря дозволяє значно послабити вихрові струми, що виникають в ньому при його перемагнічуванні в процесі обертання в магнітному полі. В повздовжні пази сердечника якоря укладені пазові сторони секцій обмотки якоря. Часто пази якоря роблять з нахилом, що послаблює пульсацію в повітряному проміжку і зменшує вібрації і шум, що супроводжують роботу двигуна.

Обмотка якоря 9 (мал. 2) складається з секцій (катушок), виконаних мідним ізолюваним проводом, як правило, круглого перерізу. Пазові сторони секцій закріплюють в пазах осердя якоря. З двох сторін осердя якоря розташовані лобові частини обмотки якоря. З боку колектора вони підключаються до його пластин, а з боку, протилежного колектору, з'єднують пазові сторони секцій.

Колектор 1 двигуна (мал. 2) має циліндричну форму і складається з мідних пластин, ізолюваних одна від одної. В колекторних двигунах малої потужності використовують колектори на пластмасі (мал. 4). Основа колектора – стальна втулка 4, запресована на вал двигуна. В двигунах з підвищеною частотою обертання для надання колектору великої міцності в колекторі використовують армуючі кільця 3. Щітки 2 (мал. 2) розташовані в щіткотримачах і прижимаються до колектору пружинами.



**Мал. 4 Будова колектора**



**Мал. 5 Будова щіткотримача**

Передній (з боку колектора) і задній 7 (з боку виступаючого кінця валу) підшипникові щити двигуна (мал. 2) прикріплюються гвинтами до станини. В центральній частині щитів зроблені отвори під підшипники. В двигунах малої потужності використовують шарикові підшипники кочення. В передньому підшипниковому щиті зроблені вікна, що прикриваються сталюю пластинною або стрічкою. Через вікна можна періодично розглядати колектор і щітки, не розбираючи двигун.

Для підключення двигуна до мережі живлення і з'єднання регулюючої апаратури є коробка виводів, розташована на боковій або верхній поверхні станини. В двигунах малої потужності замість коробки виводів на корпусі або на одному з

підшипникових щитів закріплюють клемну панель або виводять з середини марковані проводи.

Двигун (мал. 2) має центробіжний вентилятор 8, завдяки якому повітря проходить через внутрішню порожнину двигуна, де охолоджує обмотки і осердя. Двигун має гвинт заземлення для забезпечення електробезпеки при обслуговуванні.

Крім двигунів з електромагнітним збудженням в пристроях автоматики використовуються двигуни малої потужності зі збудженням постійними магнітами. Потужність цих двигунів, як правило, не перевищує декількох десятків ват. Відсутність обмотки збудження спрощує конструкцію двигунів і сприяє підвищенню їх ККД і надійності.

Двигуни з постійними магнітами мають недоліки, що обмежують в ряді випадків їх використання: а) неможливість регулювати частоту обертання двигуна зміною магнітного потоку збудження; б) при потужності, що перевищує 40-50 Вт, їх габаритні розміри і вага виявляються більші, ніж у двигунах з електромагнітним збудженням; в) матеріали для виготовлення постійних магнітів дефіцитні і дорогі.

### **Магнітне поле машини. Реакція якоря**

Магнітним колом називається сукупність частин машини, по яким проходить головний магнітний потік (мал. 6). Магнітне коло машини постійного струму складається з п'яти ділянок: осердя головних полюсів, повітряного проміжку, зубчатого шару якоря, основи якоря і основи статора (станина). Кожна з цих ділянок створює опір магнітному потоку. Для подолання магнітних опорів необхідна магніторушійна сила (МРС), що створюється постійним струмом, який протікає по обмотці збудження. Щоб знайти потрібне значення МРС, розраховують магнітне коло, визначаючи МРС, необхідну для підтримання заданих значень магнітної індукції на кожній з ділянок магнітного кола. МРС окремих ділянок кола додають і отримують повну МРС обмотки збудження на пару полюсів  $F_z$ , необхідну для створення потрібного робочомагнітного потоку.



**Рис. 6. Магнітне коло колекторної електричної машини**

Отримане значення МРС дозволяє визначити кількість витків в котушках кожного з полюсів обмотки збудження:

$$w_3 = F_3 / (2I_3),$$

де  $I_3$  – величина струму в обмотці збудження.

Якщо обмотка збудження вмикається паралельно обмотці якоря, то струм  $I_3$  приймається рівним 2,5 % від номінального струму в машинах великої і середньої потужності і до 30% в машинах малої потужності. Якщо обмотка збудження

ввімкнена послідовно з обмоткою якоря, то струм збудження рівний струмові якоря.

**Магнітне поле машини.** При роботі машини кожна з обмоток створює своє магнітне поле. Результуюче поле машини, таким чином, можна розглядати як суму двох магнітних полів.

При ідеальному холостому ході машини постійного струму, коли струм в обмотці якоря відсутній, в машині діє тільки МРС обмотки збудження  $F_3$ , яка і створює магнітне поле, симетрично розподілене відносно вісей полюсів.

З появою навантаження в обмотці якоря виникає струм, що створює МРС якоря  $F_a$ , нерухому в просторі і напрямлену по вісі щіток. МРС якоря створює магнітне поле якоря.

Якір машини постійного струму створений так, що по одну сторону від ліній щіток струм по обмотці якоря протікає в одному напрямку, а по іншу сторону – в іншому напрямку. Якір, таким чином, можна розглядати як котушку з зігнутим каркасом і віссю, що співпадає з лінією щіток. МРС якоря завжди напрямлена по вісі щіток. Якщо щітки розташовані на геометричній нейтралі, то  $F_a$  співпадає з геометричною нейтраллю, тобто напрямлена по поперечній вісі машини.

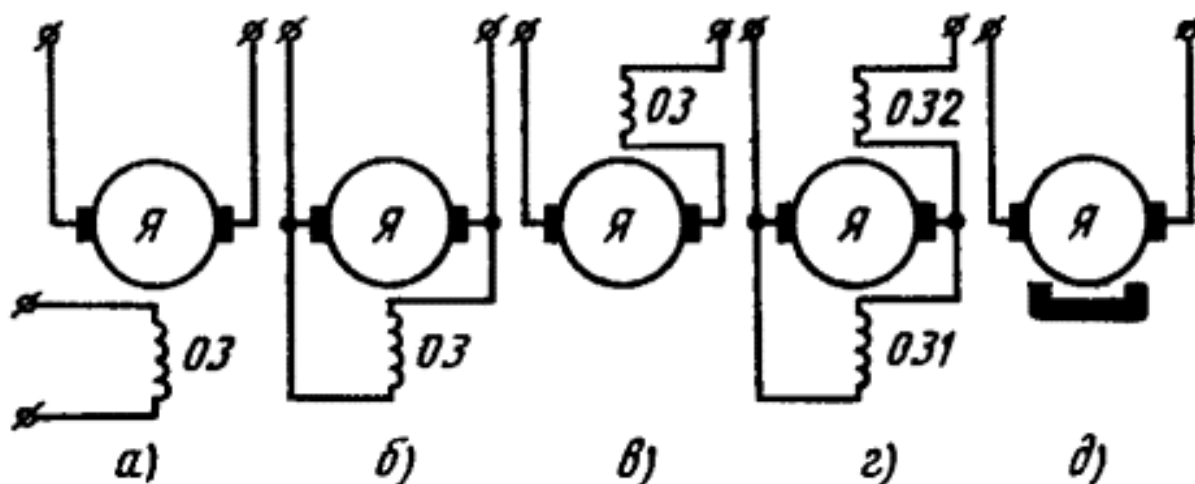
### **Способи збудження колекторних електричних машин**

Для роботи електричної машини необхідна наявність магнітного поля. В більшості машин постійного струму це поле створюється обмоткою збудження, що живиться постійним струмом. Властивості електричних машин постійного струму в

значній мірі визначаються способом ввімкнення обмотки збудження або, як прийнято говорити, способом збудження.

За способами збудження електричні машини можна класифікувати наступним чином:

- а. машини незалежного збудження, в яких обмотка збудження ОЗ живиться постійним струмом від джерела, електрично не пов'язаного з обмоткою якоря Я (мал.7,а);
- б. машини паралельного збудження, в яких обмотка збудження і обмотка якоря з'єднанні паралельно (мал.7, б);
- в. машини послідовного збудження, в яких обмотка збудження і обмотка якоря з'єднанні послідовно (мал.7, в);
- г. машини змішаного збудження, в яких є дві обмотки збудження: одна з них – ОЗ1 – ввімкнена паралельно, а друга – ОЗ2 – послідовно з обмоткою якоря (мал.7,г).



Мал. 7. Способи збудження колекторних електричних машин

Всі вказані машини відносяться до машин з електромагнітним збудженням, так як магнітне поле в них створюється завдяки електричному струмові обмотки збудження. В останній час досить широке розповсюдження отримали машини зі збудженням постійними магнітами (мал.7,д).

**Універсальний колекторний двигун (УКД)** — різновид колекторної машини постійного струму, яка може працювати як на постійному, так і на змінному струмі.

Найчастіше використовується в ручному електроінструменті та в деяких побутових приладах через малі розміри, малу вагу, простоту в регулюванні обертів, відносно малу вартість.

### **Особливості конструкції.**

Універсальний колекторний двигун є колекторним електродвигуном постійного струму з послідовно включеними обмотками збудження (статора), оптимізованим для роботи на змінному струмі побутової електричної мережі. Такий тип двигуна незалежно від полярності напруги, що подається, обертається в один бік, оскільки за рахунок послідовного з'єднання обмоток статора і ротора зміна полюсів їх магнітних полів відбувається одночасно і результируючий момент залишається спрямованим в один бік.

Для можливості роботи на змінному струмі застосовується статор з магнітно-м'якого матеріалу, що має малий гістерезис (опір перемагнічуванню). Для зменшення втрат на вихрові струми статор виконують набірним з ізольованих пластин.

Особливістю роботи такого двигуна саме на змінному струмі (а не на постійному такої ж напруги) є те, що в режимі малих оборотів (пуск і перевантаження) індуктивний опір обмоток статора обмежує споживаний струм і відповідно максимальний момент двигуна. Для зближення механічних характеристик у двигунів загального призначення може застосовуватися секціонування обмоток статора — окремі виводи (і менше число витків обмотки статора) для підключення змінного струму.

Реверсування УКД здійснюється перемиканням полярності включення обмоток тільки статора або тільки ротора.

### **Переваги і недоліки**

Порівняння приведені для випадку підключення до побутової однофазної електричної мережі 220 вольт і однакової потужності двигунів. Різниця в механічних характеристиках двигунів ("м'якість-жорсткість", максимальний момент) може бути як перевагою, так і недоліком залежно від вимог до двигуна.

### **Переваги порівняно з колекторним двигуном постійного струму:**



- Пряме включення в мережу, без додаткових компонентів (для двигуна постійного струму потрібно, як мінімум, випрямлення).
- Менший пусковий струм, що прийнятніше для побутових приладів.

#### **Недоліки порівняно з колекторним двигуном постійного струму:**

- Менший загальний ККД через втрати на індуктивність і перемагнічування статора.
- Менший максимальний момент.

#### **Переваги в порівнянні з асинхронним двигуном:**

- Швидкохідність і відсутність прив'язки до частоти мережі.
- Компактність.
- Більший пусковий момент.
- Автоматичне пропорційне зниження оборотів (практично до нуля) і збільшення моменту при збільшенні навантаження (при незмінній напрузі живлення) – "м'яка" характеристика.
- Можливість плавного регулювання оборотів (моменту) в дуже широкому діапазоні – від нуля до номінального значення – зміною напруги живлення.

#### **Недоліки порівняно з асинхронним двигуном:**

- Нестабільність оборотів при зміні навантаження (де це має значення).
- Наявність щітково-колекторного вузла і у зв'язку з цим:
- Відносно мала надійність (термін служби);
- Сильне іскріння на колекторі із-за комутації змінного струму і пов'язані з цим радіоперешкоди;
- Високий рівень шуму;
- Відносно велике число деталей колектора (і відповідно двигуна).

Слід зазначити, що в сучасних побутових пристроях ресурс електродвигуна (щітково-колекторного вузла) порівнянний з ресурсом робочих органів і механічних передач.

#### **Порівняння з асинхронним двигуном**

Двигуни (УКД і асинхронний) однієї і тієї ж потужності, незалежно від номінальної частоти асинхронного двигуна, мають різну механічну характеристику:

УКД – "м'яка" характеристика, момент прямо, а обороти обернено пропорційні до навантаження на валу (споживаній потужності) –практично лінійно – відрежиму холостого ходу до режиму повного гальмування. Номінальний момент вибирається приблизно в 3-5 разів меншим максимального. Обороти холостого ходу обмежуються тільки втратами в двигуні і можуть зруйнувати потужний двигун при включенні його без навантаження.

Асинхронний двигун – "жорстка" характеристика – двигун підтримує близьку до номінальної частоту обертання, різко (десятки відсотків) збільшуючи момент при незначному зниженні оборотів (одиниці відсотків). При значному зниженні оборотів (до повного гальмування) момент двигуна не росте, а навіть падає, що викликає повну зупинку. Обороти холостого ходу постійні і на трохи перевищують номінальні.

Механічна характеристика в першу чергу і обумовлює різні сфери застосування цих типів двигунів.

Через малі оберти, обмежені частотою мережі змінного струму, асинхронні двигуни тієї ж потужності мають значно більші вагу і розміри, ніж УКД. Якщо асинхронний двигун живиться від перетворювача (інвертора) з високою частотою, то вага і розміри обох машин стають схожими. При цьому залишається жорсткість механічної характеристики, додаються втрати на перетворення струму і, як наслідок збільшення частоти, підвищуються індуктивні і магнітні втрати (знижується загальний ККД).

### **Аналоги без колекторного вузла**

Найближчим аналогом УКД за механічною характеристикою є безколекторний електродвигун (вентильний електродвигун, в якому електронним аналогом щітково-колекторного вузла є інвертор з датчиком положення ротора (ДПР).

Електронним аналогом універсального колекторного двигуна є система: випрямляч (міст), синхронний електродвигун з датчиком кутового положення ротора (датчик кута) і інвертором (іншими словами – вентильний електродвигун з випрямлячем).

Проте, через застосування постійних магнітів в роторі, максимальний момент вентильного двигуна такогорозміру буде меншим.

### **Робочі властивості колекторного двигуна.**

Робочі властивості колекторного двигуна змінного струму характеризуються механічною характеристикою  $M = f(P_2)$ , а також робочими характеристиками:  $n = f(P_2)$ ,  $\cos \varphi = f(P_2)$ ,  $\eta = f(P_2)$

де  $M$  – корисний момент на валу двигуна;

$n$  – кількість оборотів двигуна за одиницю часу;

$P_2$  – механічна потужність на валу;

$\cos \varphi$  – коефіцієнт потужності двигуна;

$\eta$  – ККД двигуна;

Корисну потужність на валу двигуна, а також обертовий момент двигуна можна визначити методом механічного гальмування за допомогою стрічкового гальма.

Корисний момент на валу двигуна і механічна потужність можуть бути розраховані за формулами:  $M = R(F_1 - F_2)$ ;  $P_2 = 2\pi n(F_1 - F_2)R$ ,

де  $n$  – кількість обертів двигуна за секунду;

$R$  – радіус шківів в метрах;

$F_1 - F_2$  – різниця показів динамометра в кілограмах.

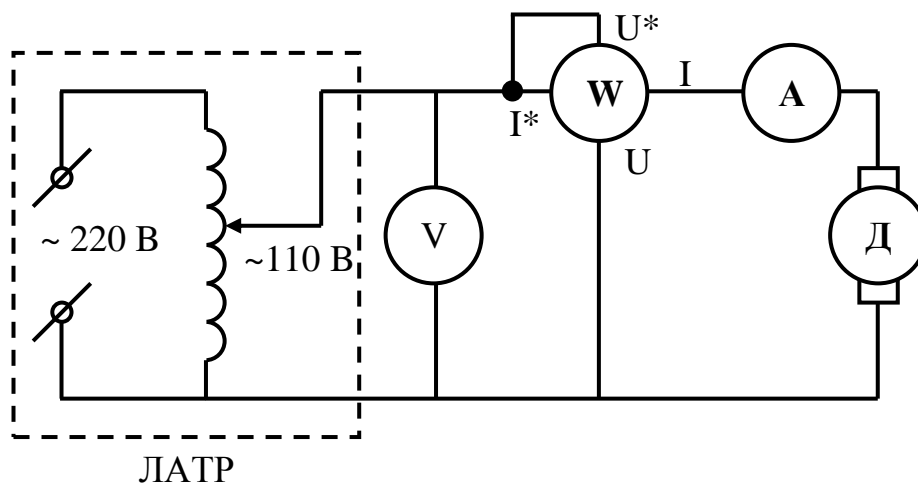
Коефіцієнт потужності і ККД двигуна знаходимо за формулами:  $\cos \varphi = \frac{P_2}{P_1}$ ;

$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\%$ , де  $P_1$  – електрична потужність, що споживає двигун,  $I$  – струм, що

споживає двигун.

### Виконання роботи:

- Для дослідження характеристик двигуна зберіть коло за схемою на мал. 8.



Мал. 8

2. Після перевірки кола керівником, зробіть відліки на приладах при різному навантаженні на валу двигуна. При цьому необхідно зробити 10 вимірів при різному навантаженні. Виміри роботи, починаючи від повного гальмування, поступово збільшуючи швидкість обертання, зменшенням навантаження до 4000 обертів за хвилину. Змінюючи навантаження встановлювати струм в межах 325 мА ... 200 мА через кожні 25 мА.

3. Результати вимірів і обчислень занесіть у таблицю:

№	$F_1 - F_2,$ Н	М, Н	t, с	n, об/с	$P_2,$ Вт	U, В	I, А	$P_1,$ Вт	$\eta,$ %	cos $\varphi$
1.										
2.										
3.										
4.										
5.										
6.										
7.										
8.										
9.										
10.										

4. Побудувати в одній системі координат графіки характеристик двигуна.

Користуючись характеристиками, вибрати номінальний режим роботи двигуна.

5. Розрахувати величину ємності конденсатора, який необхідно під'єднати паралельно клемам двигуна, щоб при номінальному режимі роботи, його коефіцієнт потужності дорівнював 1. Підключіть такий конденсатор до клем двигуна і визначіть, на скільки покращився коефіцієнт потужності двигуна.

## Лабораторна робота №8

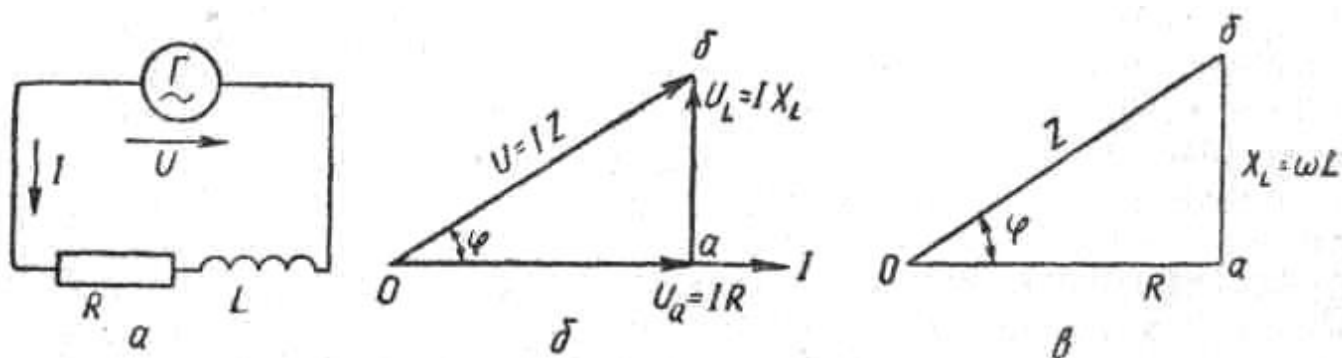
### Дослідження нерозгалуженого кола змінного струму з індуктивністю і активним опором, з ємністю та активним опором.

**Мета роботи:** навчитись визначати параметри кіл змінного струму і будувати векторні діаграми.

#### Теоретичні відомості

##### Коло змінного струму з активним та індуктивним опорами

Електричне коло з самим лише індуктивним опором в дійсності неможливе, бо будь-яка обмотка, крім індуктивного опору, має й активний опір. Тому розглянемо випадок, коли приймач, ввімкнений в коло змінного струму, має активний опір  $R$  та індуктивність  $L$ , тобто індуктивний опір (мал. 1, а).



Мал. 1. Коло змінного струму з активним опором та котушкою індуктивності:  
а — схема; б — векторна діаграма; в — трикутник опорів.

Припустимо, що по колу проходить змінний струм частотою, що відповідає кутовій частоті  $\omega = 2\pi f$ ; діюче значення сили струму —  $I$ , а початкова фаза її дорівнює нулеві; сила струму зображується вектором  $I$ , розташованим горизонтально (мал. 1, б). Струм силою  $I$ , проходячи через активний опір  $R$ , утворює спад напруги  $U_a = IR$ . Напруга на активному опорі збігається за фазою з силою струму. Тому вектор напруги  $U_a$  на діаграмі побудовано за напрямком вектора сили струму  $I$ . Напруга  $U_a$  називається активним спадом напруги. Через те що в даному колі є й котушка індуктивності, для подолання ЕРС самоіндукції потрібна напруга  $U_L = IX_L$ , яка називається індуктивним спадом напруги. Напруга на котушці індуктивності випереджає за фазою силу

струмуна кут  $90^\circ$ . Тому вектор напруги  $U_L$  побудовано під кутом  $90^\circ$  в бік випередження (проти годинникової стрілки).

Отже, напруга на затискачах кола дорівнює геометричній сумі векторів  $U_a = IR$  та  $U_L = IX_L$ . Додавши ці вектори геометрично, матимемо вектор напруги  $U$ , який визначає своїм напрямком і величиною діюче значення напруги генератора в колі.

Вектор  $I$  відстає від вектора  $U$  на певний кут  $\varphi$ . Крім того, вектор  $U$  є гіпотенузою прямокутного трикутника  $Oab$  (рис. 38, б), який називається трикутником напруги. Катет трикутника  $Oa = U_a$ , а катет  $ab = U_L$ . Тому можна записати:  $U^2 = U_a^2 + U_L^2$  або  $U^2 = (IR)^2 + (IX_L)^2 = I^2(R^2 + X_L^2)$ . Добуваючи квадратний корінь з обох частин останньої рівності, дістаємо  $U = I\sqrt{R^2 + X_L^2}$ , звідки  $I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}$ . Ця формула виражає собою

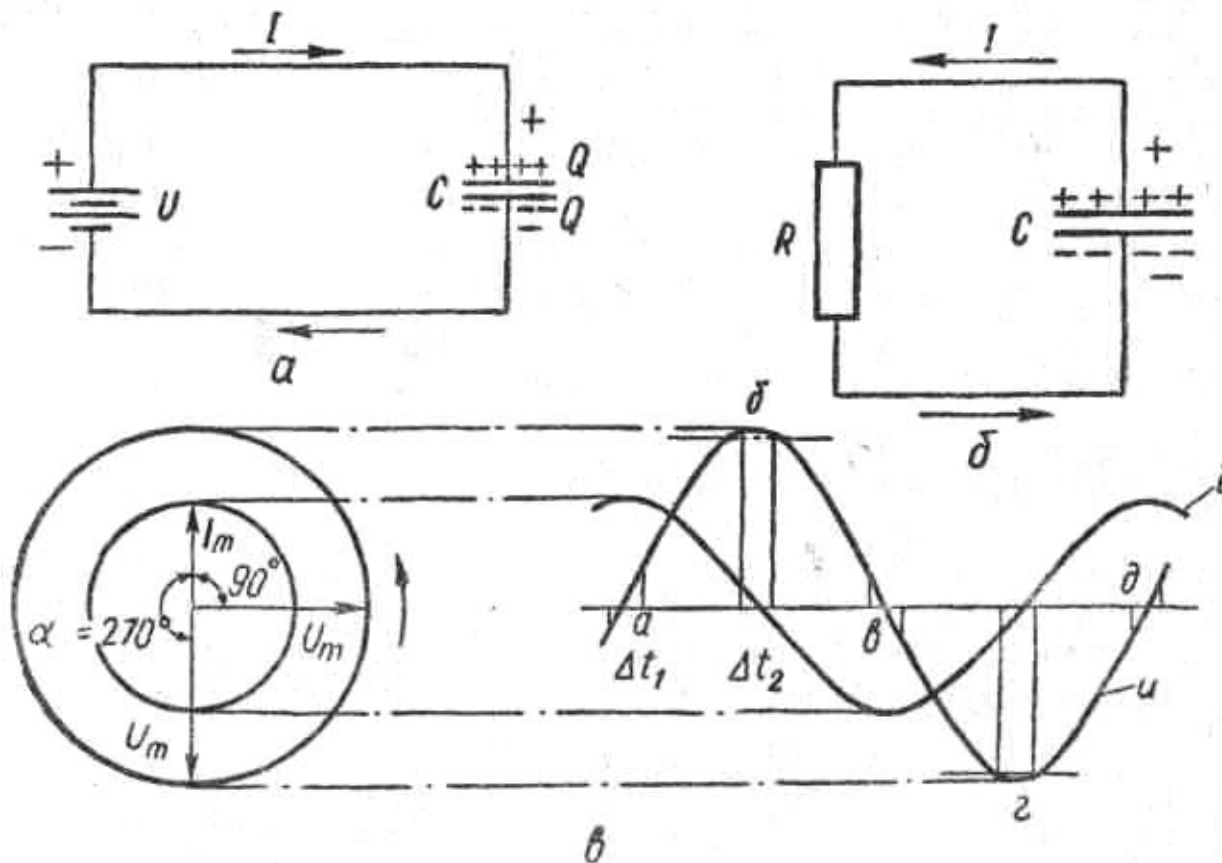
закон Ома для кола змінного струму з активним та індуктивним опорами. Знаменник у цьому виразі позначається літерою  $Z$  і називається повним опором кола:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$$

Грунтуючись на цій рівності, можемо побудувати прямокутний трикутник (мал. 1, в) з катетами  $R$  та  $X_L = \omega L$  гіпотенузою  $Z$ , який називається трикутником опорів кола з активним та індуктивним опорами. З трикутника опорів можна визначити кут зсуву фаз  $\varphi$  між напругою, прикладеною до кола, та силою струму в ньому:  $\cos\varphi = R/Z$ . Знаючи  $R$  і  $Z$ , неважко за  $\cos\varphi$  визначити кут  $\varphi$ .

### **Конденсатор у колі змінного струму**

З увімкненням конденсатора ємністю  $C$  (мал. 2, а) під постійну напругу  $U$  він заряджається і на його обкладках накопичуються однакові, але протилежні за знаком кількості зарядів  $Q = CU$ . Якщо заряджений конденсатор від'єднати від джерела струму, то він, зберігаючи заряд, матиме деяку напругу  $U_C$ . З'єднавши обкладки зарядженого конденсатора між собою через якийсь опір  $R$  (мал. 2, б), можна переконатися (за допомогою вимірювального приладу) в тому, що конденсатор, розряджаючись, дає короткочасний струм через опір  $R$ . Напрямок струму в колі під час розрядження конденсатора протилежний до напрямку під час заряджання.



Мал. 2. Електричне коло з конденсатором:

*a* — зарядження конденсатора; *b* — розрядження конденсатора; *v* — векторна та часова діаграми напруги та сили струму.

Якщо розглядати процеси, які відбуваються в колі з конденсатором та джерелом змінного струму з синусоїдною напругою  $u = U_m \sin \omega t$ , то неважко помітити, що ці процеси зводяться до періодичного зарядження та розрядження конденсатора.

Припустимо, що генератор змінного струму замкнений на конденсатор. Зобразимо зміну напруги на затискачах генератора на часовій діаграмі (мал. 2, *v*) у вигляді синусоїдної кривої *abed*, а вектор напруги  $U_m$  на векторній діаграмі розмістимо горизонтально. Звернемося до формули  $Q = CU$  застосуємо її до випадку зарядження конденсатора змінним струмом. Очевидно, що за дуже короткий проміжок часу  $\Delta t$  напруга на затискачах генератора зміниться незначною мірою — на  $\Delta u$ . За цей же проміжок часу  $\Delta t$  генератор віддасть конденсатору кількість зарядів  $\Delta Q$ . Отже, ця формула для дуже малого проміжку часу  $\Delta t$  матиме вигляд  $\Delta Q = C \Delta u$ . Поділивши обидві частини рівності на  $\Delta t$ , дістанемо  $\Delta Q / \Delta t = C \Delta u / \Delta t$ . Ліва частина цієї рівності являє собою відношення кількості зарядів  $\Delta Q$ , що перейшли від генератора

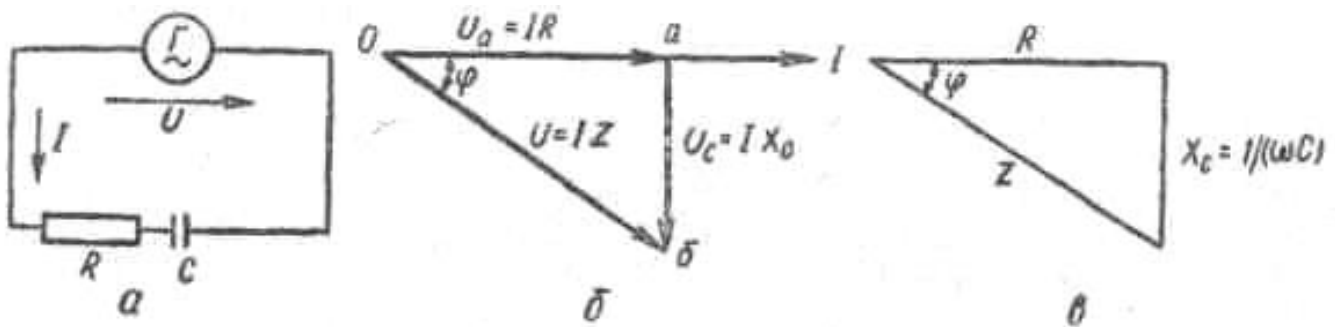
до конденсатора протягом часу  $\Delta t$ , до цього проміжку часу. Якщо  $\Delta Q$  виразити в кулонах, а  $\Delta t$  — в секундах, то відношення  $\Delta Q/\Delta t$  являтиме собою кількість зарядів у кулонах, перенесених за одну секунду, тобто буде миттєвим значенням струму  $i$  в амперах. Отже, останню рівність можна записати у вигляді  $i = C\Delta u/\Delta t$ .

Якщо напруга синусоїдна ( $u = U_m \sin \omega t$ ), то за час  $\Delta t$  вона зміниться на  $\Delta u = U_m [\sin \omega(t + \Delta t) - \sin \omega t]$ . У цьому виразі  $\sin \omega(t + \Delta t) = \sin \omega t \cos \omega \Delta t + \sin \omega \Delta t \cos \omega t$ , і оскільки кут  $\omega \Delta t$  дуже малий, то його синус дорівнює дузі, а косинус — одиниці ( $\sin \omega \Delta t = \omega \Delta t$ ;  $\cos \omega \Delta t = 1$ ), на основі чого  $\Delta u = U_m (\sin \omega t + \omega \Delta t \cos \omega t - \sin \omega t)$  і  $\Delta u/\Delta t = U_m \omega \cos \omega t$ . Отже, через конденсатор протікає змінний струм  $i = C\Delta u/\Delta t = U_m \omega C \cos \omega t = U_m \omega C \sin (\omega t + \pi/2)$ , тобто струм синусоїдний і випереджає за фазою прикладену напругу на чверть періоду ( $\pi/2 = 90^\circ$ ).

Максимальне значення сили змінного струму, що протікає через конденсатор,  $I_m = U_m \omega C$ , діюче значення сили струму в колі з конденсатором  $I = \omega C U_m / \sqrt{2} = \omega C U = U/[1/(\omega C)]$ .

Ця формула виражає закон Ома для кола змінного струму з конденсатором. Відношення  $1/(\omega C)$  називається ємнісним опором, позначається  $X_C$  і вимірюється в омах;  $X_C = 1/(\omega C)$ .

### Коло змінного струму з активним і ємнісним опорами



Мал. 3. Активний опір і конденсатор у колі змінного струму:

***a* — схема; *б* — векторна діаграма напруги й сили струму; *в* — трикутник опорів.**

Припустимо, що в колі (мал. 3, *a*) з активним опором  $R$  та конденсатором ємністю  $C$  протікає змінний струм з кутовою частотою  $\omega$  і діючою силою  $I$ . Нехай початкова фаза сили струму дорівнює нулеві і сила струму зображується вектором  $I$  (мал. 3, *б*), розміщеним горизонтально. Струм силою  $I$ , проходячи через активний опір



$R$ , утворює спад напруги  $U_a = IR$  яка збігається за фазою з силою струму. Вектор напруги  $U_a$ , як відомо, називається активним спадом напруги.

Оскільки дане коло, крім активного опору, має ще й ємнісний опір  $X_C = 1/(\omega C)$ , то струм силою  $I$ , проходячи через конденсатор з опором  $X_C$ , створює ще напругу  $U_C = IX_C$ , яка називається ємнісним спадом напруги. Як відомо, напруга на конденсаторі відстає за фазою від сили струму на кут  $90^\circ$ . Тому на векторній діаграмі вектор напруги  $U_C$  побудований під кутом  $90^\circ$  у бік відставання (за годинниковою стрілкою). Отже, напруга на затискачах кола має дорівнювати геометричній сумі векторів  $U_a$  та  $U_C$ . В результаті геометричного додавання цих векторів матимемо вектор  $U$ , який своєю величиною та напрямком визначає діюче значення напруги.

Вектор  $I$  випереджає вектор  $U$  на певний кут  $\varphi$ . Крім того, вектор  $U$  є гіпотенузою прямокутного трикутника  $Oab$ , який називається трикутником напруг. Катет трикутника  $Oa = U_a = IR$ , а катет  $ab = U_C = IX_C$ , тобто  $U^2 = U_a^2 + U_C^2$  або  $U^2 = (IR)^2 + (IX_C)^2 = I^2 (R^2 + X_C^2)$ . Добуваючи квадратний корінь з обох частин останнього рівняння, дістаємо  $U = I\sqrt{R^2 + X_C^2}$ , звідки  $I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_C^2}}$ .

Остання формула виражає закон Ома для кола змінного струму з активним та ємнісним опором. Знаменник цього виразу, позначений літерою  $Z$ , називається повним опором кола:

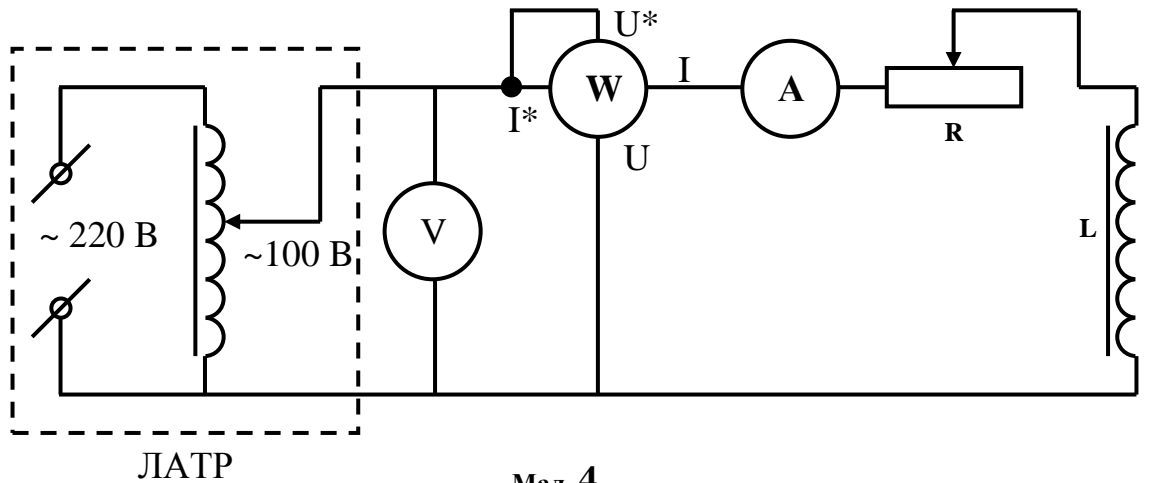
$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}$$

Грунтуючись на цьому рівнянні, можемо побудувати прямокутний трикутник (мал. 3, в) з катетами  $R$  та  $X_C = 1/(\omega C)$  і гіпотенузою  $Z$ , який називається трикутником опорів кола з активним та ємнісним опором. З трикутника опорів можна визначити кут зсуву фаз  $\varphi$  між силою струму в колі та напругою, прикладеною до нього:

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}}$$

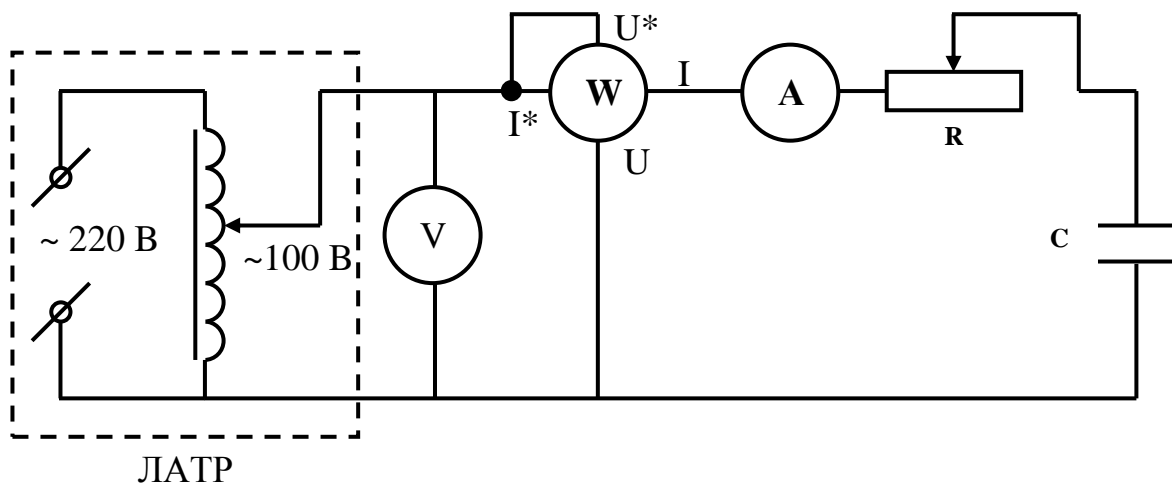
### Виконання роботи:

1. Зберіть послідовне коло з активним опором і індуктивністю (мал. 1). Роль індуктивності відіграє дросельна котушка на 2400 витків. Сердечник в котушці замкнений.



Мал. 4

2. Після перевірки схеми влючіть живлення. На ЛАТРІ встановіть напругу 100 В. Зніміть покази приладів і запишіть їх у таблицю.
3. Визначіть повний опір кола:  $Z = \frac{U}{I}$ , де  $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$ . Визначіть активний опір кола:  $R = \frac{P}{I^2}$ , а також  $\cos \varphi = \frac{R}{Z}$ . Визначіть індуктивність котушки  $L = \frac{1}{\omega} \sqrt{Z^2 - R^2}$  (індуктивністю послідовної обмотки ватметра і амперметра знехтуйте). Обчисліть напруги на активному опорі і на індуктивності:  $U_a = IR$ ,  $U_p = I\omega L$ , де  $\omega = 2\pi f$ ,  $f = 50 \text{ Гц}$ . Побудуйте в масштабі векторні діаграми напруг і опорів для даного досліду.
4. Розімкніть сердечник і виконайте всі виміри і обчислення, що перераховані в попередньому досліді.
5. Зберіть послідовне коло з ємністю і активним опором (мал. 5). На ЛАТРІ встановіть напругу 100 В.



Мал. 2

6. Зніміть покази приладів для трьох значень ємностей 1, 2, 4 мкФ. Обчисліть повний опір кола:  $Z = \frac{U}{I}$ , активний опір кола:  $R = \frac{P}{I^2}$ .
7. Використавши закон Ома для змінного струму, знайдіть ємності. Прівняйте обчислену ємність із заданою. Обчисліть  $\cos \varphi = \frac{R}{Z}$ .
8. Побудуйте в масштабі векторні діаграми напруг і опорів.

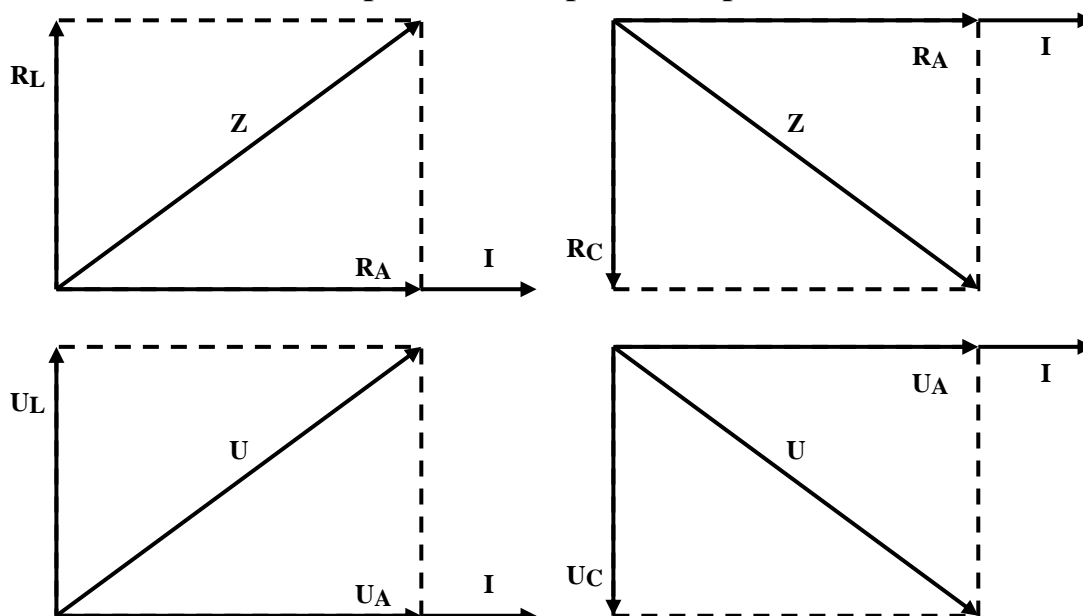
### Таблиця вимірів та обчислень.

№ п/п	Виміри			Обчислення				
	U, В	I, А	P, Вт	R, Ом	Z, Ом	C <sub>обч.</sub>	C <sub>задана</sub>	cos φ
1.								
2.								
3.								
4.								
5.								

### Контрольні запитання:

- Показати, що напруга на індуктивності випереджає струм на  $90^\circ$  (письмово).
- Показати, що напруга на ємності відстає від струму на  $90^\circ$  (письмово).
- Окремим вольтметром із щупами заміряти напругу на ємності та на активному опорі і порівняти її з вихідною напругою. Переконатись, що  $U = \sqrt{U_a^2 - U_p^2}$

### Зразки векторних діаграм



## Лабораторна робота №9

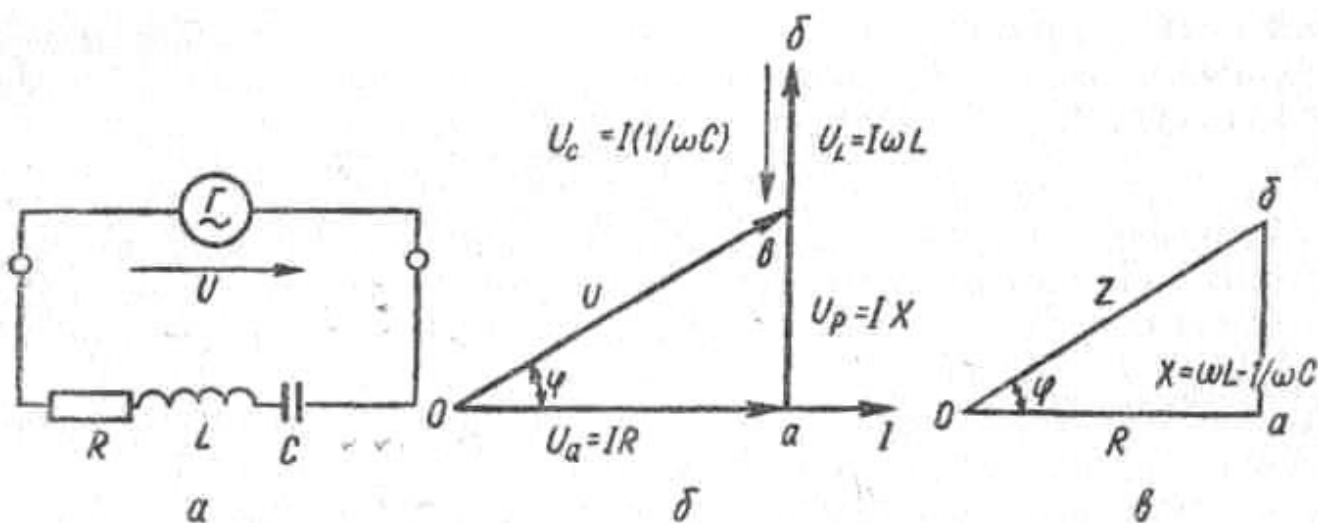
### Дослідження нерозгалуженого кола змінного струму з індуктивністю, ємністю та активним опором (резонанс напруг).

**Мета роботи:** вивчити закон Ома для кола змінного струму. Вивчити явище резонансу напруг в послідовному контурі.

#### Теоретичні відомості:

#### Коло змінного струму з активним, індуктивним та ємнісним опорами

Розглянемо коло змінного струму, що складається із з'єднаних послідовно активного опору  $R$ , котушки індуктивності  $L$  та конденсатора ємністю  $C$  (мал. 1, *a*). Під дією прикладеної напруги  $U$  протікає струм силою  $I$ . Напруга  $U$  має компенсувати спад напруги на активному опорі  $U_a = IR$ , на індуктивному опорі  $U_L = I\omega L$  та ємнісному опорі  $U_C = I(1/\omega C)$ .



Мал. 1. Активний опір, котушка індуктивності та конденсатор у колі змінного струму: *a* – схема; *б* – векторна діаграма; *в* – трикутник опорів.

Побудуємо векторну діаграму для цих напруг (мал. 1, *б*). Відкладемо силу струму  $I$  у вигляді горизонтального відрізка і за його напрямком відкладемо активну складову напруги  $U_a = IR$ , маючи на увазі, що вона збігається за фазою з силою струму. Оскільки індуктивна складова напруги  $U_L$  випереджає силу струму  $I$  за фазою на кут  $90^\circ$ , поставимо до напрямку сили струму перпендикуляр і відкладемо на ньому індуктивний спад напруги  $U_L = I\omega L$  у вигляді відрізка  $ab$ . Ємнісний спад напруги  $U_C$

відстає від сили струму  $I$  за фазою на кут  $90^\circ$ , тому з кінця відрізка  $ab$  (з точки  $b$ ) опустимо до напрямку сили струму перпендикуляр і на ньому відкладемо  $U_C = I(1/\omega C)$  у вигляді відрізка  $bv$ . Тепер, з'єднавши точки  $O$  та  $v$ , матимемо сумарний вектор  $Ov$ , який своєю величиною й напрямком визначить напругу  $U$ , прикладену до кінців даного кола.

Прямокутний трикутник  $Oav$  називається трикутником напруги для кола з послідовно з'єднаними активним, індуктивним та ємнісним опорами. Катет  $av$  являє собою різницю між індуктивним  $U_L$  та ємнісним  $U_C$  спадами напруг. Отже, можемо

записати рівність  $U^2 = U_a^2 + (U_L - U_C)^2 = I^2 \left[ R^2 + \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2 \right]$ , звідки

$$U = I \sqrt{R^2 + \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}, \quad I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}}.$$

Остання формула виражає закон Ома для кола змінного струму з активним, індуктивним та ємнісним опорами. Знаменник у ній позначається літерою  $Z$  і називається повним опором кола:

$$Z = \sqrt{R^2 + \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}.$$

Грунтуючись на цьому рівнянні, побудуємо прямокутний трикутник  $Oab$  (мал. 1, в) з катетами  $R$  та  $\omega L - 1/\omega C$  і гіпотенузою  $Z$ , який називається трикутником опорів кола з активним, індуктивним та ємнісним опорами. З трикутника опорів можна визначити кут зсуву фаз між напругою й силою струму в колі:

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}}.$$

Розглянемо окремий випадок послідовного з'єднання активного, індуктивного та ємнісного опорів, коли різниця між індуктивним та ємнісним опорами дорівнює нулю, тобто  $X_L - X_C = \omega L - 1/\omega C = 0$  або  $\omega L = 1/\omega C$ .

Розв'язавши рівняння відносно кутової частоти  $\omega$ , яку для цього випадку позначимо  $\omega_0$ , дістанемо  $\omega_0^2 LC = 1$  або  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ . Кутова частота  $\omega_0$  називається резонансною кутовою частотою. За цієї частоти сила струму в колі обумовлюється

самим лише активним опором  $R$ , тобто  $I = U/R$  досягає найбільшого значення. Кут зсуву фаз між напругою та силою струму при резонансі дорівнює нулю, оскільки  $\cos \varphi = 1$ , а саме  $\cos \varphi = R/R = 1$ .

Розглянутий нами випадок називається резонансом напруг, бо при цьому напруги на затискачах конденсатора  $U_C$  та індуктивного опору  $U_L$  можуть значно перевищувати напругу, прикладену до кола. Напруги  $U_L$  та  $U_C$  однакові і зсунуті за фазою на половину періоду, тобто в будь-який момент часу вони однакові і протилежні за знаком. Отже, в будь-який момент часу миттєві потужності в реактивних ділянках однакові і протилежні за знаком, тобто збільшення енергії магнітного поля в котушці індуктивності відбувається внаслідок зменшення електричної енергії, що є в конденсаторі, а генератор витрачає енергію на активний опір.

При послідовному з'єднанні активних опорів напруга і струм знаходяться в одній фазі; загальна напруга, як і в колі постійного струму, дорівнює сумі напруг на окремих опорах, тобто  $U = U_1 + U_2$ .

При послідовному з'єднанні активного і індуктивного опорів напруга на активному опорі знаходиться в фазі з струмом, а на активно-індуктивному опорі випереджає струм на кут  $\varphi$ , тому  $\bar{U} = \bar{U}_C + \bar{U}_L$ , потужність  $P = UI \cos \varphi$ . При резонансі напруг струм в колі має найбільше значення. Напруга на котушці і конденсаторі залежить від їх опору і може бути значно більшою, ніж загальна напруга. Амплітудне (максимальне) значення змінного струму визначається за законом Ома:

$$I_0 = \frac{U_0}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}}, \text{ або } I_0 = \frac{U_0}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} \quad (1)$$

З формули 1 випливає, що  $I_0$  досягне свого максимального значення при  $\omega L = \frac{1}{\omega C}$ , що виконується при  $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ . Струм досягатиме тут такого ж значення, як і в колі постійного струму, якщо напруга, яка подається, дорівнює  $U_0$ , а ємнісний опір  $X_C$  і індуктивний  $X_L$  будуть відсутні. Максимальне значення струму відповідає резонансу напруг. Падіння напруги на омичному опорі  $U_R = IR = RI_0 \sin(\omega t - \varphi)$ ,

$$\text{на індуктивному } U_L = L \frac{dI}{dt} = I_0 \omega L \cos(\omega t - \varphi) \quad (2)$$

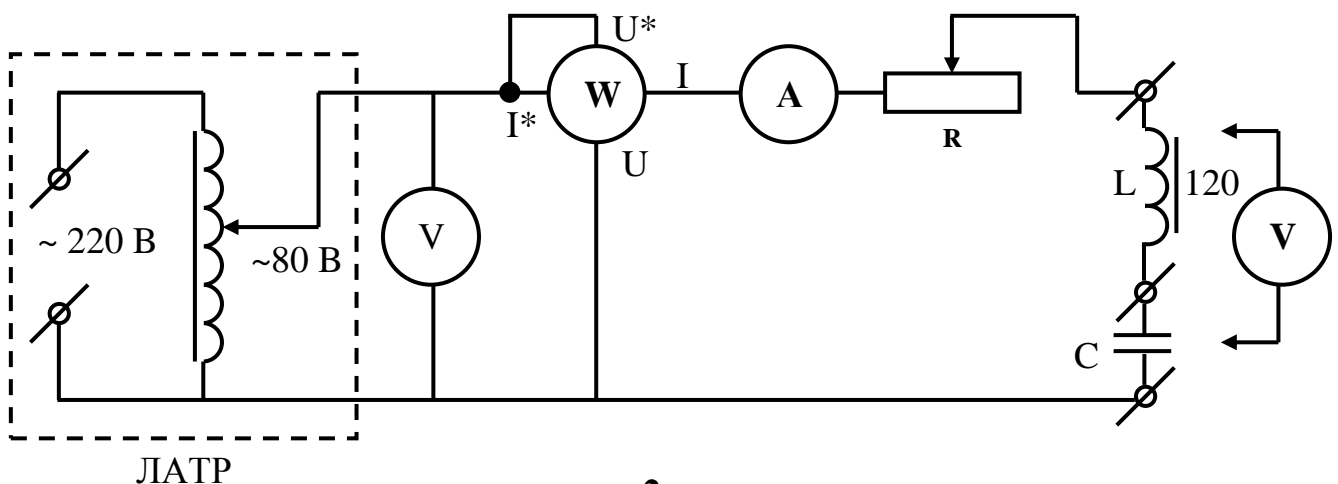
$$\text{на ємнісному } U_c = \frac{q}{C} = \frac{I_0}{\omega C} \cos[(\omega t - \varphi) + \pi] \quad (3)$$

Із 2 і 3 випливає, що амплітудні значення напруг на індуктивності і ємності будуть відповідно рівні:  $U_{0L} = \frac{\omega L}{R} U_0$ ;  $U_{0C} = \frac{1}{\omega CR} U_0$ .

Так як умовою резонансу є рівність  $\omega L = \frac{1}{\omega C}$ , то  $U_{0L} = U_{0C}$ , тобто напруги на індуктивності і ємності однакові за величиною, але знаходяться в протилежних фазах,  $U_{0L} \pm U_{0C} = 0$ . Активний опір котушки знаходимо за показами приладів (амперметра і ватметра)  $R_a = \frac{P}{I^2}$ , а повний опір всього кола  $Z = \frac{U}{I}$  і  $\cos \varphi = \frac{R}{Z}$ .

### Виконання роботи:

1. Скласти коло за схемою на мал. 2 і дослідити резонанс напруг при послідовному з'єднанні індуктивного і ємнісного опорів. На вхід подати 50 В і підтримувати



напругу сталю.

2. Результати вимірювань занести в таблицю, змінюючи ємність від 1 до 20 мкФ, через 1 мкФ.
3. Обчислити активний опір за формулою:  $R_a = \frac{P}{I^2}$ .
4. Побудувати графіки залежностей  $U_L = f(C)$ ;  $U_C = f(C)$ ;  $I = f(C)$ ;  $Z = f(C)$  і векторну діаграму для випадку резонансу в одній системі координат.
5. Обчислити  $\cos \varphi$ .
6. Обчислити індуктивність котушки за формулою  $\omega L = \frac{1}{\omega C}$ , яка справджується при резонансі напруг.

**Примітка:** напруги  $U_L$  та  $U_C$  вимірювати за допомогою вольтметра по черзі щупами.

Виміри							Обчислення			
№ п/п	U, В	$U_L$ , В	$U_C$ , В	I, А	C, мкФ	P, Вт	R, Ом	L, Гн	Z, Ом	$\cos\varphi$
1.					1					
2.					2					
3.					3					
4.					4					
5.					5					
6.					6					
7.					7					
8.					8					
9.					9					
10.					10					
11.					11					
12.					12					
13.					13					
14.					14					
15.					15					
16.					16					
17.					17					
18.					18					
19.					19					
20.					20					



## Лабораторна робота №10

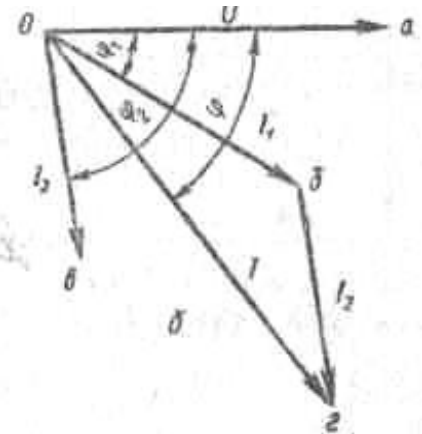
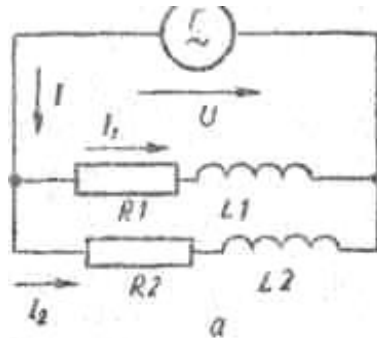
### Дослідження кола змінного струму при паралельному з'єднанні індуктивності і ємності (резонанс струмів).

**Мета роботи:** перевірити дослідним шляхом перший закон Кірхгофа і закон Ома для паралельного кола змінного струму, складеного з активного опору, індуктивності і ємності.

#### Теоретичні відомості:

##### Паралельне з'єднання реактивних опорів. Резонанс струмів

Припустимо, що два паралельні відгалуження приєднані до затискачів генератора змінного струму (мал. 1, а) з напругою  $U$ . Одне відгалуження має активний опір  $R_1$  та індуктивність  $L_1$  друге — відповідно  $R_2$  та  $L_2$ .



Мал. 1. Паралельне з'єднання опорів: а – схема; б – векторна діаграма.

Якщо кутова частота генератора  $\omega = 2\pi f$ , то повні опори  $Z_1$  і  $Z_2$  першого та другого відгалужень дорівнюють:

$$Z_1 = \sqrt{R_1^2 + (\omega L_1)^2}; \quad Z_2 = \sqrt{R_2^2 + (\omega L_2)^2}.$$

Сили струмів  $I_1$  та  $I_2$  відповідно до закону Ома визначаються з виразів:

$$I_1 = \frac{U}{\sqrt{R_1^2 + (\omega L_1)^2}}; \quad I_2 = \frac{U}{\sqrt{R_2^2 + (\omega L_2)^2}}.$$

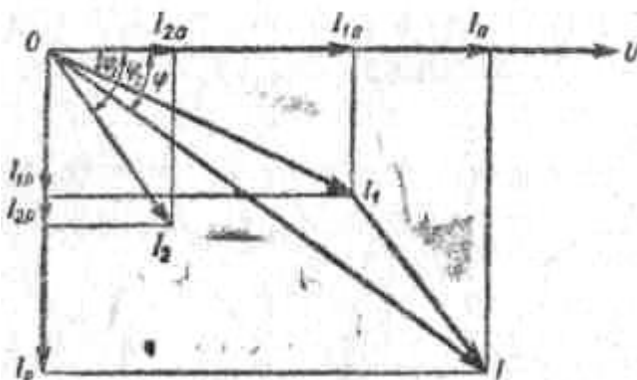
Оскільки в кожному відгалуженні, крім активних опорів, є й індуктивні, то сили струмів у відгалуженнях відстають за фазою від напруги  $U$  на кути  $\varphi_1$  та  $\varphi_2$ , які визначаються з рівностей  $\cos\varphi_1 = R_1/Z_1$  та  $\cos\varphi_2 = R_2/Z_2$ .

Відповідно до цього на рис. 1, б побудовано векторну діаграму, на якій напругу  $U$  показано у вигляді відрізка  $Oa$ , а сили струмів  $I_1$  та  $I_2$  — у вигляді відрізків  $Ob$  та  $Oв$ .

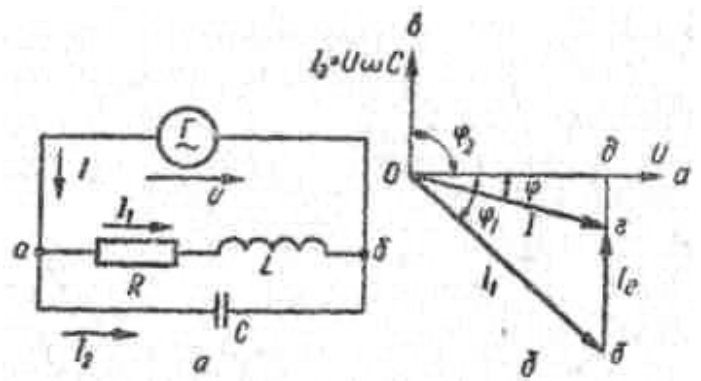
Сила струму в нерозгалуженій частині кола являє собою геометричну суму сил струмів  $I_1$  та  $I_2$ . Тому для визначення сили струму  $I$  на діаграмі сили струмів  $I_1$  та  $I_2$  додані геометрично. В результаті додавання одержали вектор сили струму у вигляді відрізка  $O_2$ , який своєю величиною й напрямком обумовлює величину й напрямок струму  $I$  в нерозгалуженій частині кола. Кут  $\varphi$  є кутом зсуву фаз між напругою  $U$  та силою струму  $I$ .

Силу струму  $I$  та кут зсуву фаз  $\varphi$  можна вирахувати. Для цього кожен силу струму  $I_1$  та  $I_2$  розкладають на дві складові, одна з яких спрямована за вектором напруги  $U$  (мал. 2), а друга — перпендикулярно до першої. Першу складову називають активною складовою сили струму, другу — реактивною складовою сили струму. Позначивши складові сили струму  $I_1$  активну  $I_{1a}$  та реактивну  $I_{1p}$  а складові сили струму  $I_2$  — активну  $I_{2a}$  та реактивну  $I_{2p}$ , запишемо:  $I_{1a} = I_1 \cos \varphi_1$ ;  $I_{1p} = I_1 \sin \varphi_1$ ;  $I_{2a} = I_2 \cos \varphi_2$ ;  $I_{2p} = I_2 \sin \varphi_2$ .

Сила струму в нерозгалуженій частині кола  $I = \sqrt{(I_{1a} + I_{2a})^2 + (I_{1p} + I_{2p})^2} = \sqrt{I_a^2 + I_p^2}$  де  $I_a = I_{1a} + I_{2a}$ ;  $I_p = I_{1p} + I_{2p}$ ;  $I_a$  та  $I_p$  — відповідно активна та реактивна складові сили струму  $I$  в нерозгалуженій частині кола.



Мал. 2. Активні та реактивні складові сили струму.



Мал. 3. Паралельне з'єднання котушки індуктивності та конденсатора: *a* — схема; *б* — векторна діаграма.

Косинус кута зсуву фаз  $\varphi$  між напругою  $U$  та силою струму  $I$  визначається з рівності  $\cos \varphi = \frac{I_a}{I}$ .

Розглянемо дуже важливий випадок паралельного з'єднання двох відгалужень, коли в одному з них є активний опір  $R$  та котушка індуктивністю  $L$ , а у другому — конденсатор ємністю  $C$  (мал. 3, а). Напруга генератора  $U$ , прикладена до точок  $a$  і  $b$ , дорівнює  $U$  при кутовій частоті  $\omega$ . Очевидно, що у відгалуженні з котушкою індуктивності сила струму  $I_1 = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}$  і відстає за фазою від напруги  $U$  на кут  $\varphi_1$ .

У відгалуженні з конденсатором сила струму  $I_2 = \frac{U}{\frac{1}{\omega C}}$ . Оскільки у відгалуженні з

конденсатором немає активного опору, то сила струму  $I_2$  випереджає напругу  $U$  за фазою на кут  $90^\circ$ , що зображено на векторній діаграмі (мал. 3, б). На горизонтальній осі відкладено напругу у вигляді відрізка  $Oa$ . Під кутом  $\varphi_1$  у бік відставання (за годинниковою стрілкою) від напруги  $U$  побудуємо відрізок  $Ob$ , на якому відкладемо силу струму  $I_1$ . Далі під кутом  $\varphi_2 = 90^\circ$  у бік випередження (проти годинникової стрілки) від напруги  $U$  побудуємо відрізок  $Ov$  і на ньому відкладемо силу струму  $I_2$ . Геометрично додавши вектори сил струму  $I_1$  та  $I_2$ , дістанемо вектор сили струму  $I$  в нерозгалуженій частині кола. Відрізок  $Oz$  визначає силу струму  $I$ , а кут  $\varphi$  — кут зсуву фаз між напругою  $U$  та силою струму  $I$  в нерозгалуженій частині кола.

З цієї діаграми видно, що якби не було відгалуження з конденсатором  $C$ , приєднаного паралельно відгалуженню з активним опором  $R$  та котушкою індуктивності  $L$ , то сила струму в колі дорівнювала б  $I_1$ . Наявність же конденсатора знизила силу струму в нерозгалуженій частині кола до  $I < I_1$ . Якщо підібрати ємність  $C$  так, щоб  $Ov = bd$ , тобто щоб  $U\omega C = I_1 \sin \varphi_1$  то сила струму  $I$  в нерозгалуженій частині кола досягне мінімального значення, а кут  $\varphi$  дорівнюватиме нулю. Такий випадок називається резонансом струмів.

Через те що в разі резонансу струмів у нерозгалуженій частині кола сила струму має мінімальне значення, втрати в з'єднувальних проводах та в обмотках генераторів змінного струму також мінімальні. Приєднання конденсатора паралельно колу з активним та індуктивним опорами підвищує  $\cos \varphi$ .

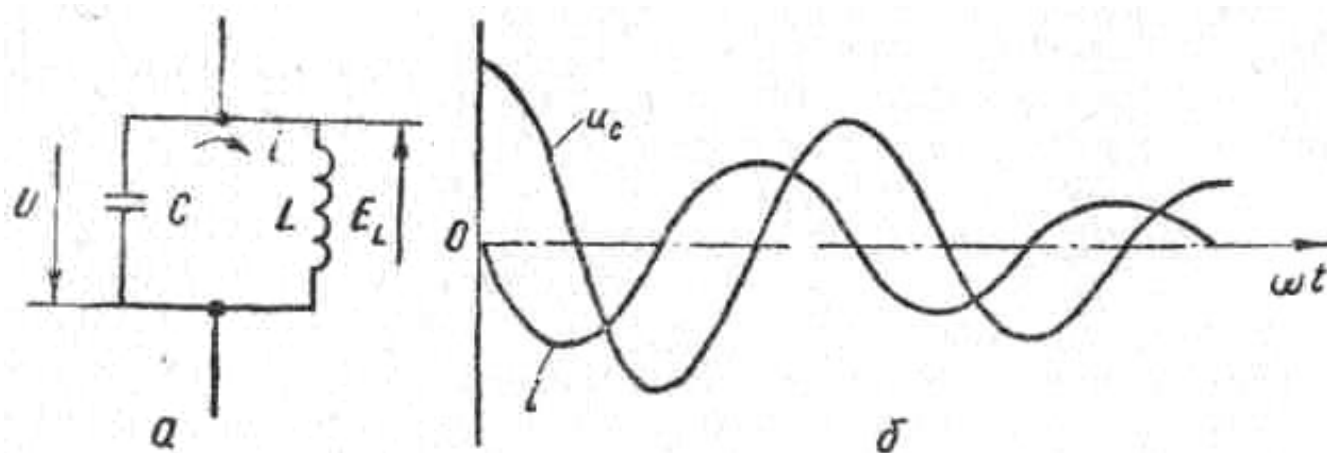
За паралельного з'єднання конденсатора ємністю  $C$  та котушки індуктивністю  $L$  з малим активним опором, яким можна знехтувати ( $R = 0$ ), сили струму у

відгалуженнях визначатимуться за такими формулами: у відгалуженні з індуктивністю —  $I_L = \frac{U}{\omega L}$ ; у відгалуженні з конденсатором —  $I_C = \omega C U$

Підберемо індуктивність  $L$  та ємність  $C$  такими, щоб сили струмів  $I_L$  та  $I_C$  були однакові, тобто щоб  $\frac{U}{\omega L} = U \omega C$ . Звідси визначаємо резонансну кутову частоту

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \text{ і резонансну частоту } f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

У відгалуженні з конденсатором сила струму  $I_C$  випереджає напругу  $U$  за фазою на кут  $90^\circ$ , а у відгалуженні з котушкою індуктивності сила струму  $I_L$  відстає від напруги  $U$  за фазою на кут  $90^\circ$ . Сила струму  $I$  в нерозгалуженій частині кола дорівнює нулеві, оскільки сили струмів  $I_C$  та  $I_L$ , однакові за значенням, спрямовані в протилежних напрямках. За ідеального резонансу сила струму в нерозгалуженій частині кола дорівнює нулеві. У цьому разі вхідний опір кола, що складається з паралельно з'єднаних котушки індуктивності та конденсатора, має безкінечно велике значення.



Мал. 4. Коливальний контур: *a* – схема; *б* – часова діаграма.

Якщо конденсатор зарядити до деякої напруги  $U$  й замкнути на індуктивну котушку (мал. 4, *a*), то у замкненому контурі виникне струм і конденсатор розряджатиметься через котушку. При цьому електрична енергія, що є в запасі у конденсаторі, переходить в енергію магнітного поля котушки. У початковий момент, коли напруга на конденсаторі велика, сила струму й магнітне поле котушки швидко зростають. У котушці виникає ЕРС самоіндукції  $E_L$ , яка зрівноважує напругу  $U$  на конденсаторі. У процесі розрядження конденсатора напруга на ньому знижується

і в момент, коли вона зменшиться до нуля, сила струму в контурі досягне максимального значення, тобто магнітне поле котушки стане найбільшим. Потім сила струму в колі почне зменшуватися й ЕРС самоіндукції, змінивши напрямок, заряджатиме конденсатор (з протилежною полярністю) до найбільшого значення ЕРС самоіндукції, яке відповідає моменту, коли сила струму зменшиться до нуля. При цьому енергія магнітного поля котушки знову повертається конденсатору. Після цього почнеться розрядження конденсатора, але напрямок сили струму розрядження буде протилежний початковому, через те що напруга на конденсаторі змінила полярність.

Отже, в колі відбувається процес періодичної зміни сили струму й напруги з резонансною частотою  $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$  (мал. 4, б). Таке коло називається коливальним контуром.

Сила струму в контурі і напруга на ньому з часом зменшуються, бо крім реактивних опорів у колі є й активний опір проводу, який є обмоткою індуктивної котушки. В активному опорі проводу виділяється енергія, яка перетворюється в теплоту й нагріває провід. Тому енергія, яка є в конденсаторі і переходить в енергію магнітного поля індуктивної котушки, а потім знову в конденсатор, з кожним періодом поступово зменшується, що призводить до затухання коливань.

Схему досліду показано на мал. 5. Як індуктивність використано первинну обмотку котушки розбірного трансформатора (шкільного). Ємність С – батарея конденсаторів, які можна вмикати послідовно і посекційно. Склавши коло і включивши струм, необхідно автотрансформатором встановити напругу 12 В і підтримувати її протягом всього досліду. Відключивши конденсатор “С”, визначаємо параметри котушки індуктивності:

$$Z = \frac{U}{I_2}, R_a = \frac{P_0}{I_2^2}, L = \frac{1}{\omega} \sqrt{Z^2 - R_a^2}, I_{2(a)} = \frac{P_0}{U}, I_{2(p)} = \sqrt{I_2^2 - \left(\frac{P_0}{U}\right)^2}, \cos \varphi_2 = \frac{P_0}{I_2 U},$$

де  $P_0$  – покази ватметра з відімкненим конденсатором;

$R_a$  – активний опір котушки;

$I_2$  – струм, що споживає котушка;

$U$  – напруга на котушці;

$I_{2(a)}, I_{2(p)}$  – активна і реактивна складові струмів, що споживає котушка;

$\varphi_2$  – зсув фаз між напругою і струмом в котушці.

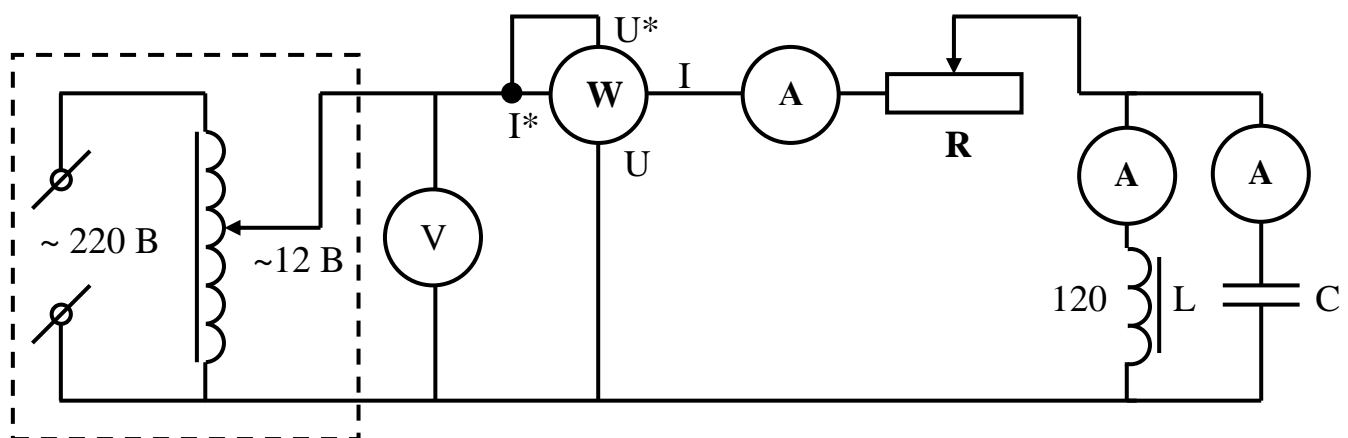
Протягом всього досліджу всі параметри котушки не змінюються. Визначивши параметри котушки, змінюємо ємність батареї конденсаторів від мінімального значення до максимального, записуючи покази приладів. На основі результатів досліджу обчислюємо:

$$I_{1(a)} = \frac{P}{U}, \quad I_{1(p)} = \sqrt{I_1^2 - I_{1(a)}^2}, \quad I_{3(a)} = I_{1(a)} - I_{2(a)}, \quad I_{3(p)} = I_{2(p)} - I_{1(p)} = I_3,$$

$$\cos \varphi_1 = \frac{P}{I_1 U}, \quad \cos \varphi_3 = \frac{I_{3(a)}}{I_3}, \quad Z_1 = \frac{U}{I_1},$$

де  $I_{1a}, I_{1p}$  – активна і реактивна складові струму в загальному колі,  $\varphi_1$  – зсув фаз між напругою і струмом в загальному колі,  $\varphi_3$  – зсув фаз між напругою і струмом в колі конденсатора,  $Z_1$  – повний опір розгалуженого кола.

### Виконання роботи:



Мал.5

1. Скласти коло за схемою на мал. 5. Визначити параметри котушки індуктивності і занести в таблицю:

№ п/п	U, В	P <sub>0</sub> , Вт	I <sub>2</sub> , А	I <sub>2a</sub> , А	I <sub>2p</sub> , А	L, Гн	R	cos φ <sub>2</sub>

2. На вхід подати напругу 12.
3. Змінюючи ємність батареї конденсаторів від 2 мкФ до 16 мкФ через 1 мкФ, запишіть покази в таблицю:

№ п/п	$I_1, A$	$I_3, A$	$P, Вт$	$U, В$	$I_{1a}, A$	$\cos \varphi_1$	$Z, Ом$	$I_{1p}, A$	$C, мкФ$
1.									2
2.									3
3.									4
4.									5
5.									6
6.									7
7.									8
8.									9
9.									10
10.									11
11.									12
12.									13
13.									14
14.									15
15.									16

4. Побудувати в спільній системі координат графіки залежностей:  $Z_1 = f(C)$ ,  $I_1 = f(C)$ ,  $I_3 = f(C)$ ,  $\cos \varphi_1 = f(C)$ .

5. Побудувати векторні діаграми для резонансу і умов, близьких до резонансу.

### Контрольні питання:

1. Проаналізувати результати досліду, розкрити суть резонансу.
2. Обчислити власну частоту контура  $\omega_p$ , при якій спостерігається резонанс струмів.
3. В чому полягає суть компенсації зсуву фаз?

# *Лабораторна робота №11*

## **Дослідження однофазного трансформатора.**

**Мета роботи:** ознайомитись з конструкцією трансформатора, дослідити його основні характеристики.

### **Теоретичні відомості:**

Трансформатором називається статичний електромагнітний апарат, який перетворює змінний струм однієї напруги в змінний струм тієї ж частоти, але іншої напруги.

Трансформатори набули широкого практичного застосування для передачі електричної енергії на великі відстані, для розподілу енергії між її приймачами та в різних випрямних, сигнальних, підсилювальних та інших пристроях.

Дві ізольовані обмотки трансформатора розміщені на сталевому магнітопроводі. Обмотка, ввімкнена в мережу джерела електричної енергії, називається первинною, а обмотка, від якої енергія подається до приймача, — вторинною.

Напруги первинної і вторинної обмоток неоднакові. Якщо первинна напруга менша від вторинної, то трансформатор називається підвищувальним, якщо ж первинна напруга більша за вторинну, то — знижувальним. Будь-який трансформатор можна використати як підвищувальний, так і знижувальний.

### **Принцип дії та будова трансформатора.**

Дія трансформатора ґрунтується на явищі електромагнітної індукції. Якщо первинну обмотку трансформатора ввімкнути в мережу джерела змінного струму, то по ній протікатиме змінний струм, який збудить в осерді трансформатора змінний магнітний потік. Магнітний потік, пронизуючи витки вторинної обмотки трансформатора, індукує в ній ЕРС. Під дією цієї ЕРС по вторинній обмотці і через приймач енергії протікатиме струм. Отже, електрична енергія, трансформуючись, передається з первинного кола у вторинне, але з іншою напругою, на яку розрахований приймач енергії, ввімкнений у вторинне коло.

Щоб поліпшити магнітний зв'язок між первинною та вторинною обмотками, їх розміщують на сталевому магнітопроводі. Для зменшення втрат від вихрових струмів



магнітопроводи трансформаторів складають із тонких пластин трансформаторної сталі з нанесеною ізоляцією (жаростійким лаком).

### **Робочий режим трансформатора**

У разі холостого ходу трансформатора (без навантаження) вторинна обмотка його розімкнена, і струм у цій обмотці не протікає. У первинній обмотці при цьому протікає струм холостого ходу силою  $I_0$ , який набагато менший від сили струму цієї обмотки за номінального навантаження трансформатора. Магніторушійна сила холостого ходу  $I_0\omega_1$  збуджує змінний магнітний потік, який замикається по магнітопроводу й індукуює у первинній та вторинній обмотках електрорушійну силу.

Якщо вторинну обмотку трансформатора замкнути на будь-який приймач електричної енергії, то у вторинному колі протікатиме струм силою  $I_2$ , а у первинній обмотці — струм силою  $I_1$ , яку можна подати як геометричну суму сил струмів холостого ходу та навантаження.

Первинна та вторинна обмотки трансформатора електрично не з'єднані. Проте слід мати на увазі, що під дією магнітного зв'язку між цими обмотками зміна сили струму у вторинній обмотці  $I_2$  обумовить відповідну зміну сили струму у первинній обмотці  $I_1$ . Якщо збільшити силу струму у вторинній обмотці, то зросте сила струму і в первинній. Навпаки, зі зменшенням сили струму у вторинній обмотці знизиться сила струму і в первинній. Якщо розімкнути вторинну обмотку, то сила струму в ній дорівнюватиме нулеві, а в первинній обмотці сила струму знизиться до малого значення (сила струму холостого ходу  $I_0$ ).

У первинній і вторинній обмотках при навантаженні протікають струми неоднакової сили. Якщо знехтувати втратами потужності в трансформаторі, то потужність, яку віддає трансформатор приймачеві енергії  $U_2I_2$  дорівнює потужності, яка споживається з мережі джерела енергії  $U_1I_1$ , то  $U_2I_2 = U_1I_1$ ;  $I_2/I_1 = U_1/U_2 = n$ ;  $I_2 = nI_1$ .

У знижувальному трансформаторі напруга первинної обмотки  $U_1$  більша від напруги вторинної обмотки  $U_2$  в  $n$  разів, отже, і сила струму вторинної обмотки  $I_2$  більша від сили струму первинної обмотки  $I_1$  також у  $n$  разів. У підвищувальному трансформаторі існує протилежне співвідношення між напругами обмоток і між силами струмів у них.

Отже, у обмотці з вищою напругою сила струму менша, ніж у обмотці з нижчою напругою. У обмотці з вищою напругою більша кількість витків; її намотують з проводу з меншою площею поперечного перерізу, ніж обмотку з нижчою напругою.

Щоб не встановлювати окремого трансформатора на кожен робочу напругу, доцільно на одному трансформаторі влаштовувати кілька вторинних обмоток з різною кількістю витків. Такі трансформатори, що зветься багатообмотковими, широко застосовують у радіоприймачах, телевізорах, підсилювачах та іншій апаратурі, яка потребує для живлення кілька різних змінних напруг. Співвідношення кількості витків у обмотках обумовлюються їхньою напругою:  $\omega_2/\omega_1 = U_2/U_1$ ;  $\omega_3/\omega_1 = U_3/U_1$  і т. д.

Сила струму в первинній обмотці дорівнює сумарній силі струму всіх вторинних обмоток:  $I_1 = I_2 U_2 / U_1 + I_3 U_3 / U_1 + \dots$

Зміна сили струму у будь-якій вторинній обмотці обумовлює відповідну зміну сили струму первинної обмотки. При цьому дещо змінюються напруги всіх вторинних обмоток трансформатора, тобто напруга будь-якої вторинної обмотки залежить від сили струму як у цій обмотці, так і в будь-якій іншій вторинній обмотці трансформатора.

### **Втрати енергії в трансформаторах.**

У реальних трансформаторах енергія не передається від первинного кола до вторинного без втрат. Існує низка фізичних причин, що їх зумовлюють.

Однією з причин втрат є активний опір обмоток. При протіканні струму через трансформатор, він нагрівається і віддає тепло оточенню. Втрати енергії через нагрівання обмоток називають втратами «в міді».

Ще одна причина втрат – перемагнічування осердя завдяки гістерезису. Ці втрати для конкретної речовини осердя пропорційні частоті й залежать від пікового потоку магнітного поля через осердя.

Інша причина втрат - струми Фуко. Змінне магнітне поле в осерді породжує змінне вихрове електричне поле, яке викликає додаткові вихрові струми, що теж призводять до нагрівання. Для зменшення струмів Фуко осердя виготовляють із тонких пластинок, оскільки втрати, пов'язані зі струмами Фуко, обернено квадратично залежать від товщини матеріалу.

Втрати на перемагнічування та вихрові струми Фуко називають втратами «в сталі».

Частина енергії втрачається на механічні коливання. Феромагнітний матеріал осердя розширюється і стискається у змінному магнітному полі завдяки явищу магнітострикції. Цим пояснюється гудіння трансформатора, що супроводжує його роботу. Додатково, первинна й вторинна обмотка притягаються й відштовхуються у змінному магнітному полі, змушуючи також коливатися і корпус трансформатора.

Загалом, великі трансформатори мають високий коефіцієнт корисної дії, до 98%. Трансформатори з надпровідних матеріалів можуть збільшити цей коефіцієнт до 99,85%.

Втрати у трансформаторах залежать від навантаження. Втрати без навантаження зумовлені в основному опором обмоток, тоді як причиною втрат при повному навантаженні зазвичай є гістерезис та вихрові струми. Втрати при відсутності навантаження можуть бути значними, тому навіть, якщо до вторинної обмотки нічого не підключено, трансформатори повинні задовольняти умовам економної роботи. Конструювання трансформаторів із малими втратами вимагає великого осердя, високоякісної електричної сталі, товстіших провідників, що збільшує початкові затрати, але окупається при експлуатації.

### **Перевірка трансформатора**

Трансформатор перевіряють омметром (авометром) на обрив і коротке замикання обмоток. Якщо обмотки справні, то трансформатор перевіряють напругою, визначаючи коефіцієнт трансформації, величину втрат енергії в осерді та обмотках і ККД при різних навантаженнях у вторинному колі.

Коефіцієнт трансформації визначають, порівнюючи покази вольтметрів, які включені первинне і вторинне коло. При цьому у вторинному колі не має бути споживачів.

Втрати енергії «в сталі» визначають за відсутності навантаження у вторинному колі, тобто при холостому ході трансформатора (мал. 1). Втрати «в сталі» залежать від напруги і не залежать від сили струму в обмотках. При холостому ході напруги на первинній і вторинній обмотках дорівнюють номінальним значенням напруг, при яких працює трансформатор. Сила струму у вторинній обмотці дорівнює нулю, а в

первинній – має дуже мале значення, тобто втратами «в міді» можемо знехтувати (вони прямопропорційні квадрату сили струму). Тому ватметр, включений в первинне коло, показує потужність, яка відповідає втраті енергії «в сталі».

Втрати енергії «в міді» залежать від сили струму і не залежать від напруги на обмотках. Тому втрати "в міді" визначають при номінальному значенні сили струму в обмотках. Для цього напругу на первинній обмотці знижують від номінальної напруги з таким розрахунком, щоб при короткому замиканні вторинної обмотки (дослід короткого замикання) струм в первинній обмотці дорівнював номінальному значенню сили струму (мал. 2). Зниження напруги потрібне для того, щоб зменшити струм короткого замикання трансформатора, що дуже небезпечно для нього, і понизити втрати «в сталі». При дотриманні вказаних вище умов проведення досліду ватметр, включений в первинний ланцюг, показує потужність, що відповідає втратам енергії «в міді».

Для визначення ККД трансформатора при різних навантаженнях у вторинному колі в нього включають споживач, що дозволяє змінювати навантаження (мал. 3). На досліді переконуються, що при зростанні (зниженні) навантаження у вторинному колі збільшується (зменшується) навантаження і в первинному колі (прояв закону збереження енергії). Порівнюючи покази ватметрів, визначають залежність ККД трансформатора від навантаження у вторинному колі.

### **Характеристики трансформатора.**

Залежність  $U_2 = f(I_2)$  при  $U_1 = const$ ,  $v = const$ ,  $\cos \varphi_2 = const$ , де  $\cos \varphi_2$  – коефіцієнт потужності споживачів електричної енергії, є зовнішньою характеристикою трансформатора.  $U_2$  – напруга на клеммах вторинної обмотки, до якої приєднано навантаження.

Експлуатаційні якості трансформатора однофазного струму, який працює на змінному навантаженні, визначають графічними залежностями, які показують зміну вторинної напруги  $U_2 = f(I_2)$ , коефіцієнта потужності  $\cos \varphi_1 = f(I_2)$ , ККД  $\eta = f(I_2)$  при всіх інших постійних величинах ( $U_1$ ,  $\varphi_2$ ,  $v$ ). Всі ці характеристики одержують різними способами на основі експериментальних даних.

Дослідження властивості трансформатора великої потужності, який має малий ККД, можна провести методом безпосереднього навантаження. Для цього на

первинній та вторинній обмотках трансформатора встановлюють електровимірювальні прилади і вимірюють  $U_1$ ,  $I_1$ ,  $P_1$ , та  $I_2$ ,  $U_2$  при змінному навантаженні в колі вторинної обмотки. Тоді

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2 \quad (1)$$

(у нас  $\cos \varphi_2 = 1$ )

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{I_1 U_1} \quad (2)$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2 I_2}{P_1} \quad (3)$$

$$\text{або } \eta = \frac{\alpha \cdot P_n}{\alpha \cdot P_n + P_c + \alpha^2 P_m}, \quad (3a)$$

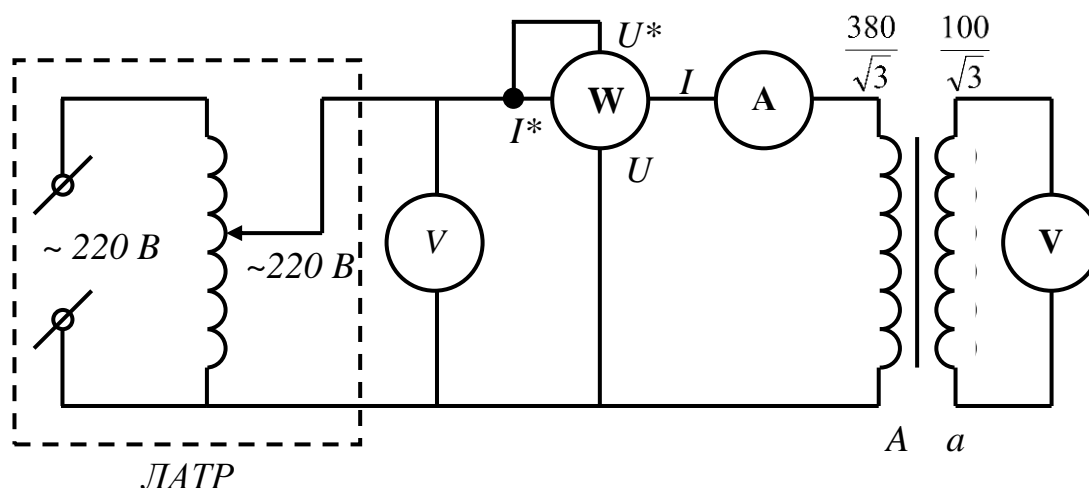
$$\text{де } \alpha = \frac{I_2}{I_{2ном}}, \quad I_{2ном} = \frac{P_n}{U_{2н}}$$

Крім вищезазначених характеристик трансформатора для нього характерною величиною є також коефіцієнт трансформації. Коефіцієнт трансформації визначається з холостого ходу:  $K = \frac{U_{1ном}}{U_{2ном}}$  (4)

Ватметр в колі первинної обмотки покаже втрати в сталі, які є постійними для всіх навантажень (познач.  $P_c$ ). Якщо замкнути вторинну обмотку товстим проводом на коротко і подати, починаючи від нуля, на первинну обмотку таку знижену напругу, при якій в первинній обмотці буде протікати номінальний струм, то ватметр первинної обмотки покаже втрати в міді. Позначається  $P_m$ . Номінальний струм первинної обмотки:  $I_{ном} = \frac{P_{ном}}{U_{ном}}$  (5). У нас  $P_{ном} = 220$  Вт,  $U_{ном} = 220$  В.

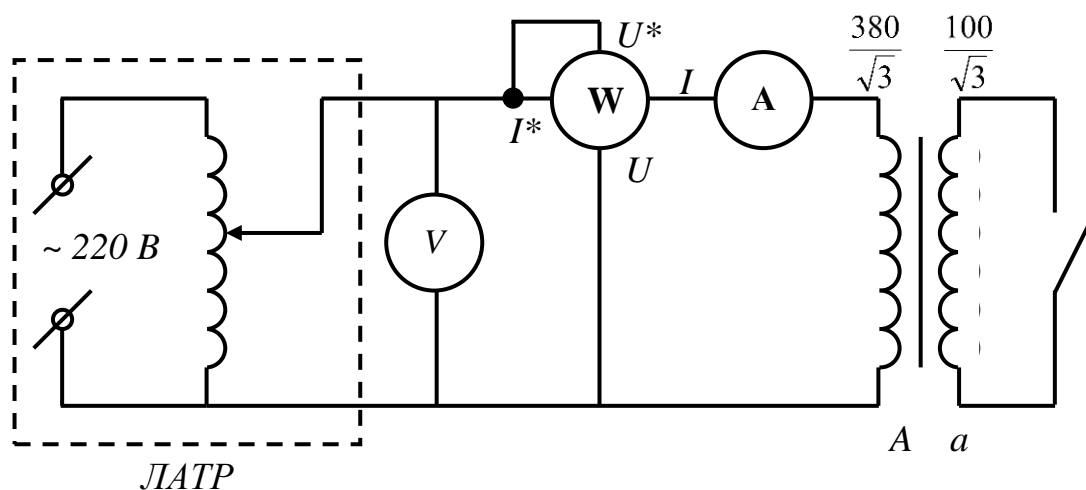
### Виконання роботи:

- Зберіть схему, показану на мал. 1.



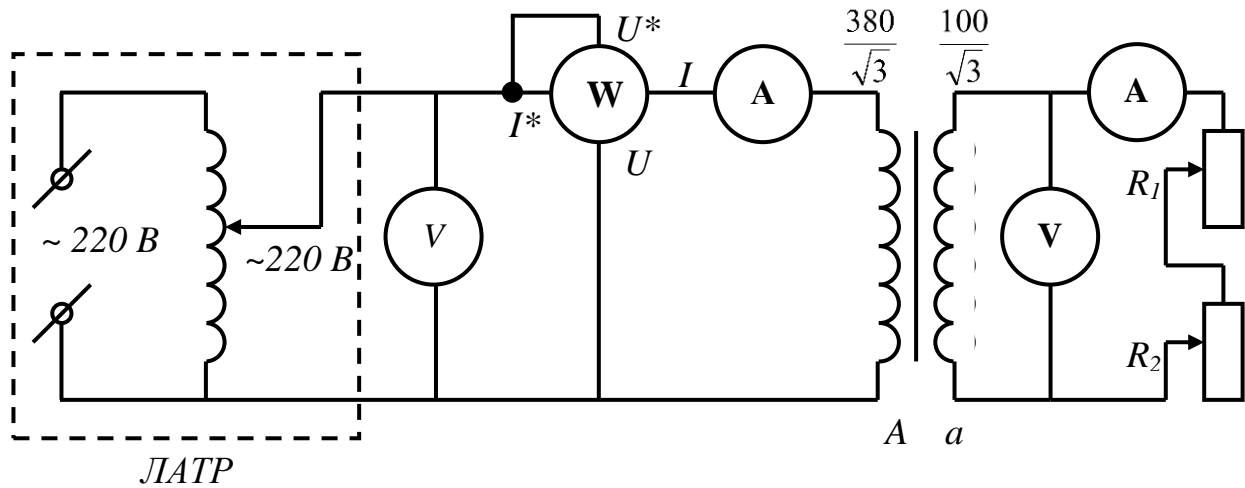
Мал. 1. Схема дослідження холостого ходу трансформатора.

- Встановіть напругу 220 В в первинній обмотці і визначіть коефіцієнт трансформації  $K$ , втрати в сталі  $P_c$  та номінальне значення напруги  $U_{ном}$ .
- Зменшіть напругу на латрі до нуля.** Закоротіть вторинну обмотку (мал. 2) і, **обережно збільшуючи напругу від нуля**, підберіть номінальний струм; визначіть втрати в міді  $P_m$ .



Мал. 2. Схема дослідження короткого замикання.

- Зберіть схему, показану на мал. 3.



**Мал. 3. Схема досліду роботи навантаженого трансформатора.**

5. Зніміть покази приладів при зміні навантаження вторинної обмотки ( $I_2 = 0,5 \text{ A}; 1 \text{ A}; 1,5 \text{ A}; 1,75 \text{ A}; 2 \text{ A}; 2,25 \text{ A}; 2,5 \text{ A}$ ). Дані вимірів і обчислень запишіть до таблиці.
6. Побудуйте графіки зовнішніх характеристик трансформатора  $U_2 = f(I_2)$ ,  $\eta = f(I_2)$ ,  $\cos \varphi_1 = f(I_2)$ .
7. Знайдіть активний опір первинної і вторинної обмоток  $R_1 = \frac{P_m + P_c}{I_{1n}^2}$  (6) і порівняйте його з омичним опором обмоток. Омичний опір обмоток визначити омметром.

### Контрольні запитання:

1. Опишіть будову і принцип дії однофазного трансформатора.
2. Які втрати енергії відбуваються в трансформаторах, як їх визначити?

## Результати вимірювань та обчислень

Втрати «в сталі»  $P_C =$  \_\_\_\_\_

Втрати «в міді»  $P_M =$  \_\_\_\_\_

$K =$  \_\_\_\_\_

$U_{1\text{ ном}} =$  \_\_\_\_\_

$U_{2\text{ ном}} =$  \_\_\_\_\_

№ п/п	Виміри					Обчислення			
	$U_1, \text{В}$	$U_2, \text{В}$	$I_1, \text{А}$	$I_2, \text{А}$	$P_1, \text{Вт}$	$\cos \varphi_1$	$\alpha$	$\eta$	$K$



## *Лабораторна робота №12*

### **Дослідження ферорезонансного стабілізатора напруги**

**Мета роботи:** дослідити ферорезонансний стабілізатор змінної напруги.

#### **Теоретичні відомості:**

Електрична енергія використовується в усіх сферах життєдіяльності людини, вона безпосередньо бере участь у створенні інших видів енергії (механічної, теплової) і має багато інших специфічних властивостей. Електроприлади працюють добре лише тоді, коли параметри електричної енергії (частота, напруга, форма сигналу) перебувають у певних допустимих межах, тому для їх нормальної роботи потрібна “якісна” електрична енергія.

Однією із найпоширеніших причин, що призводить до відмови або виводу з ладу електрообладнання, є нестабільність напруги мережі. Це трапляється, наприклад, через аварії на підстанціях та лініях електропередач, застаріле високовольтне обладнання тощо. У мережах змінного струму часто виникають недопустимі відхилення напруги (перевищення верхньої межі напруги більше ніж 242 В і нижньої менше 187 В), імпульсні перешкоди амплітудою в одиниці кВ. Надійним захистом від неякісного електроживлення зазвичай є стабілізатори напруги – апарати для її автоматичного підтримання. Стабілізатор автоматично підтримує рівень вихідної напруги 220 В при відхиленнях від норми величини вхідної напруги мережі живлення.

#### **Типи стабілізаторів**

*Ферорезонансні* (магніторезонансні) стабілізатори мережевої напруги 220 В створені на основі використання ефекту резонансу напруги у контурі трансформатор – конденсатор, який забезпечує безперервне регулювання вихідної напруги у визначених межах. Характеризуються надійністю, здатністю одночасно стабілізувати лінійну і фазну напруги. Цей тип стабілізаторів функціонує у діапазоні температур від -40 до +40 °С, тому може встановлюватись у неопалюваних приміщеннях. Ферорезонансні стабілізатори мають такі переваги: висока швидкодія, регулювання напруги без розриву фази, відносна простота схеми і, відповідно, висока її надійність, висока точність стабілізації напруги (3%).

*Ступеневі* стабілізатори – найбільш розповсюджений тип стабілізаторів. Вторинна обмотка їх трансформатора має виводи з різними коефіцієнтами трансформації, які перемикаються автоматично при зміні напруги мережі. Схема базується на комутації виводів автотрансформатора за допомогою силових ключів. За типом силових ключів ці стабілізатори поділяються на дві групи: з напівпровідниковими і релейними ключами.

*Електромеханічні* стабілізатори. Основу схеми цих пристроїв складає регульований автотрансформатор, який вмикається у первинну обмотку вольтододавального трансформатора. Вторинна обмотка вмикається у розрив фази мережі. Контроль вхідної напруги відбувається постійно, при відхиленні її від номінального значення змінюється характеристика автотрансформатора. Така схема дозволяє плавно регулювати напругу без переривання фази і без спотворення синусоїди. Цей стабілізатор напруги достатньо компактний і придатний для будь-якого навантаження. Застосовується у силових мережах житлових будівель, банків, промислових об'єктів, медичних закладів. Перевагами цих стабілізаторів є найвищий коефіцієнт віддачі (98-99%), великий робочий ресурс, висока точність утримання вихідної напруги  $220 \pm 1\%$ , відсутність перешкод та спотворень синусоїди, велика навантажувальна здатність, широкий діапазон корекції напруги 140-260 В, відсутність електронних блоків, можливість організації систем з широким діапазоном потужностей від 0.3 кВА до 2 МВА. Недоліками такого типу стабілізаторів є висока вартість, великі масо-габаритні показники порівняно із ступеневими коректорами напруги, обмежена швидкість регулювання.

**Точність стабілізації.** Для вибору точності стабілізації необхідно визначити діапазон напруг, допустимих для живлення електрообладнання. Для живлення складної медичної апаратури і точних вимірювальних приладів бажано встановлювати стабілізатор точністю до 2%. Освітлювальну апаратуру (люстри, прожектори тощо) рекомендується підключати через стабілізатор з точністю, не меншою 3%. Чим вища точність стабілізації, тим менший стрибок вихідної напруги, і відповідно, менша видима інтенсивність світла при різких стрибках вхідної напруги. Електроживлення більшості побутових приладів і апаратів можливо здійснювати напругою  $220 \pm (5-7)\%$ .

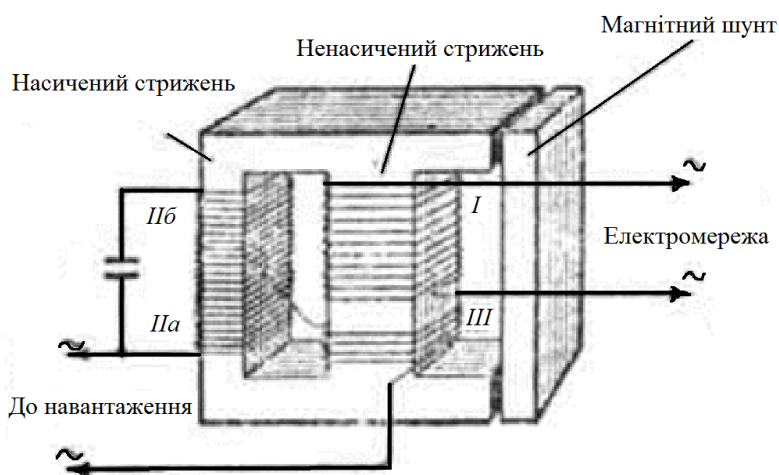
Для вибору стабілізатора напруги необхідно передусім вимірювати фазну та лінійну напругу мережі декілька разів на добу протягом декількох днів (наприклад двох будніх і вихідних). Для вимірювання слід використати прилад, що вимірює діючі значення напруг. За результатами вимірювань можливі такі варіанти:

- якщо за час вимірювань фазна напруга не виходила за межі 205-235 В, то встановлення стабілізатора виправдане лише для живлення відповідальних електроприладів (медичне обладнання, точні вимірювальні прилади тощо), причому використовувати потрібно стабілізатори напруги високої точності, з можливістю регулювання вихідної напруги.
- якщо напруга виходить за межі 205-235 В, відбуваються її різкі зміни, помітне мерехтіння джерел світла, але значення фазної напруги лежать у межах 195-245 В, то у такому випадку встановлення стабілізатора напруги бажане для усіх електроспоживачів, а для джерел світла – обов'язкове;

Якщо у трифазній мережі напруга помітно відрізняється в одній із фаз, і це відбувається постійно, то стабілізатор необхідно встановити тільки на одну фазу.

### Будова і принцип дії ферорезонансного стабілізатора

Основою будь-якого ферорезонансного стабілізатора напруги є трансформатор



Мал. 1.

з осердям особливої конструкції (мал. 1). На середньому стрижні осердя більшого перерізу розміщується первинна обмотка I, до якої підводиться напруга електромережі. На стрижні меншого перерізу розташована вторинна обмотка, з секції IIa якою

знімається стабілізована напруга на навантаження. Послідовно з нею сполучена додаткова обмотка III, розташована на середньому стрижні.

Індуктивність всієї вторинної обмотки (секції IIa і IIb) з конденсатором С утворює резонансний контур, налаштований на частоту електромережі 50 гц.

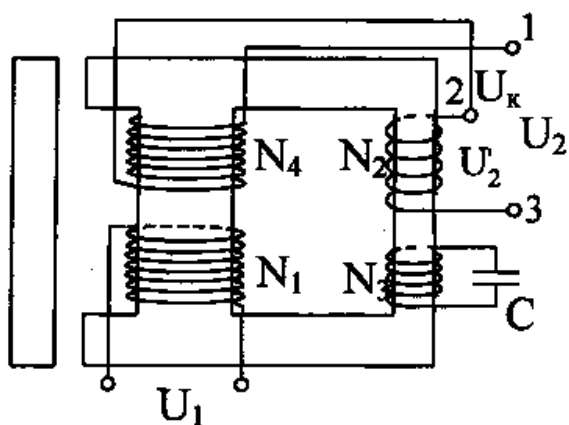
По первинній обмотці протікає струм, що створює насичення магнітними силовими лініями стрижня малого перерізу. Внаслідок цього при зміні струму в первинній обмотці, викликаному зміною напруги мережі живлення, магнітний потік в стрижні з вторинною обмоткою майже не змінюється; тому мало змінюється і напруга на вторинній обмотці. Явище резонансу покращує стабільність, напруги на цій обмотці.

Обмотка III дає на навантаження напругу, протилежну по фазі напрузі, що знімається з секції IIa. В результаті, напруга на навантаженні стабілізатора, дорівнює різниці напруг на секції IIa і обмотці III, тобто змінюється значно менше ніж напруга в електромережі.

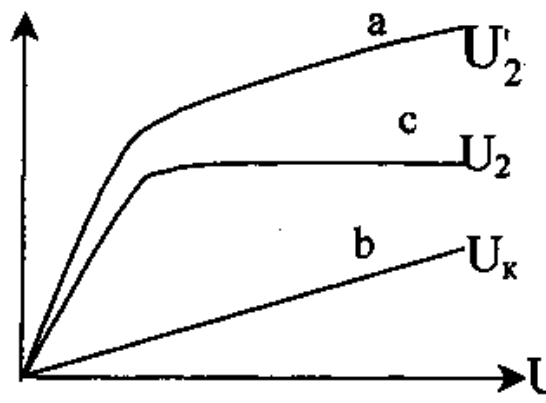
Кращої стабільності напруги на навантаженні досягають зміною зазору між осердям і магнітним шунтом. У такий спосіб регулюють ступінь насичення магнітними силовими лініями стрижня з вторинною обмоткою і налаштовують контур в резонанс з частотою мережі. Це налаштування здійснюють на заводі. При експлуатації стабілізатора ніяких регулювань його робити не потрібно.

Схема, показана на мал. 1, використана в стабілізаторах заводського виробництва. Будова стабілізаторів інших типів може бути дещо іншою, але принцип дії не змінюється.

У всіх практичних конструкціях ферорезонансних стабілізаторів первинна обмотка секційна, що дозволяє включати їх в електромережі з різними номінальними напругами. Число в позначенні типу стабілізатора вказує допустиму потужність його навантаження.



Мал. 2



Мал. 3

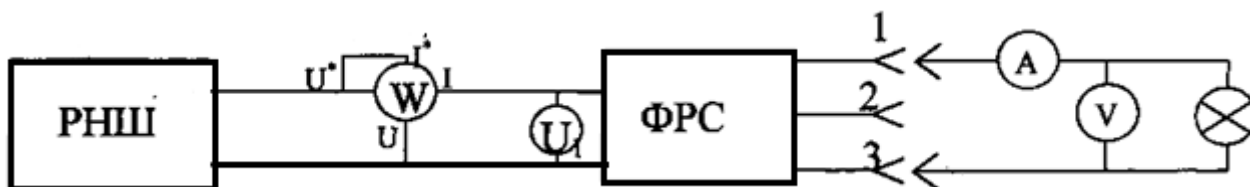
Ферорезонансний стабілізатор напруги конструктивно схожий на однофазний трансформатор (мал. 2). Первинна обмотка  $N_1$  на яку подається напруга живлення  $U_1$  розміщена на ділянці магнітопровода, що має великий поперечний переріз для того, щоб ця частина магнітопровода знаходилась в ненасиченому стані. Вторинна обмотка  $N_2$ , на якій індукується напруга  $U'_2$  розміщена на ділянці магнітопровода, що має малий переріз і працює в режимі насичення.

Обмотка  $N_3$  разом із конденсатором  $C$  становлять паралельний резонансний контур. За рахунок резонансу струмів вдається збільшити коефіцієнт корисної дії стабілізатора. Залежність напруги  $U'_2$  на котушці  $N_2$  від напруги  $U_1$  показана на мал. 2(a).

На ненасиченому сердечнику розміщена компенсаційна обмотка  $N_4$ . Напруга на ній  $U_K$  залежить від напруги  $U_1$  так, як показано на графіку (b). Компенсаційна напруга включена назустріч із напругою  $U_2$ , тому вихідна напруга  $U_2 = U'_2 - U_K$ . Графік залежності напруги  $U_2$  від  $U_1$  показаний на мал. 3

### Виконання роботи:

1. Зберіть схему, показану на мал. 4



Мал. 4

2. Коло навантаження разом з амперметром і вольтметром підключіть до клем 2-3 і, змінюючи напругу  $U_1$  від 0 до 240В через 20В, зніміть залежності  $U'_2 = f(U_1)$ ;  $I'_2 = f(U_1)$ ;  $P = f(U_1)$ .
3. Коло навантаження підключіть до клем 1-2 і зніміть залежність  $U_K = f(U_1)$ .
4. Коло навантаження підключіть до клем 1-3 і зніміть залежності  $U_2 = f(U_1)$ ,  $P_1 = f(U_1)$ ,  $I_2 = f(U_1)$ .
5. Дані вимірів запишіть до таблиці:

Величини  $P'_2$  і  $P_2$  підраховують, враховуючи, що навантаження активне.

Коефіцієнт корисної дії  $\eta$  шукають за формулою:  $\eta = 100\%$

За даними вимірів будують графіки:  $U'_2 = f(U_1)$ ;  $U_K = f(U_1)$ ;  $U_2 = f(U_1)$ .

$U_1, \text{В}$	$U'_2, \text{В}$	$U_K, \text{В}$	$U_2, \text{В}$	$I'_2, \text{А}$	$I_2, \text{А}$	$P'_1, \text{Вт}$	$P_1, \text{Вт}$	$P'_2, \text{Вт}$	$P_2, \text{Вт}$	$\eta, \%$

**Контрольні запитання:**

1. Як впливає насичення сердечника на індуктивність котушки?
2. Для чого в стабілізаторі застосовують резонансний контур?
3. Яку роль відіграє компенсуюча обмотка?

## Лабораторна робота №13

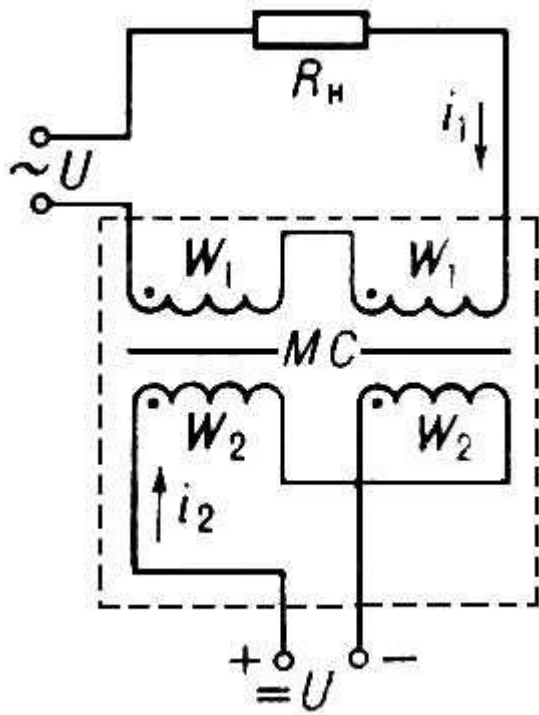
### Вивчення та дослідження магнітного підсилювача струму.

**Мета роботи:** вивчити будову та принцип роботи магнітного підсилювача струму.

#### Теоретичні відомості:

##### Будова і принцип роботи магнітного підсилювача струму.

Магнітний підсилювач – підсилювач електричних сигналів, заснований на використанні властивості феромагнітним матеріалам нелінійної залежності магнітної індукції  $B$  від напруженості магнітного поля  $H$ . Керованими елементами в магнітному підсилювачі є котушки індуктивності з феромагнітними сердечниками, в яких діють два змінних магнітних поля; одне змінюється з частотою джерела живлення, інше – з частотою сигналу, що підсилюється. Простий магнітний підсилювач складається з 2 замкнутих магнітопроводів, обмотки яких  $W1$  включено послідовно і які живляться від джерела змінної напруги  $\sim U$  (мал. 1). Вторинні обмотки  $W2$  включаються послідовно і назустріч один одному, тому замикання обмоток  $W2$  на невеликий опір не викликає якої-небудь зміни сили струму  $I1$  в первинних обмотках. Якщо по обмоткам  $W2$  пропустити постійний струм, то унаслідок нелінійного характеру кривої намагнічення сердечників динамічна магнітна проникність зменшується і відповідно зменшується індуктивність  $L1$  первинних обмоток, при цьому струм в обмотках зростає. Пристрій, зібраний за схемою на малюнку (без опору навантаження  $RH$ ), називається керованим дроселем, який стає підсилювачем, якщо послідовно з його обмотками  $W1$  включити  $RH$ , а замість постійного струму в обмотку  $W2$  подати підсилюваний сигнал постійного або такого, що повільно (в порівнянні з швидкістю зміни напруги) змінюється струму  $I2$ .



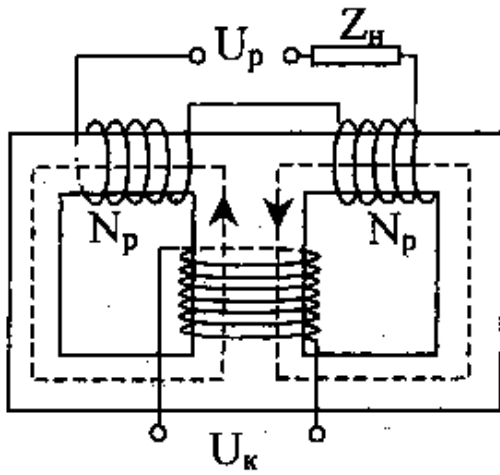
Мал. 1

Існують сотні модифікацій схем і конструкцій магнітних підсилювачів, що відрізняються виглядом характеристики навантаження, способом здійснення зворотного зв'язку, числом і формою сердечників, виглядом підсилюваних сигналів, системою зсуву, режимом роботи. Вибір типу підсилювача залежить від необхідних коефіцієнтів посилення, частоти підсилюваних коливань, області використання. Магнітні підсилювачі мають найрізноманітніше застосування — від точних вимірювальних, приладів до

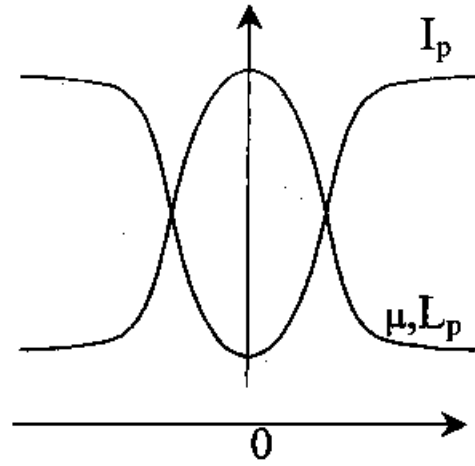
пристроїв автоматичного управління потужними виробничими агрегатами (прокатними станками, екскаваторами і т.п.). Широке застосування підсилювачів обумовлено такими перевагами: великим терміном служби, високою надійністю, простотою обслуговування, значним коефіцієнтом посилення, низьким порогом чутливості для сигналів постійного струму (10 – 19 Вт), широким діапазоном підсилюваних потужностей — від 10 – 16 Вт до декількох десятків і навіть сотень кВт, постійною готовністю до роботи, можливістю сумувати на вході декілька сигналів, які підсилюють, значною перевантажувальною здатністю, пожаро- і вибухобезпечністю, стабільністю характеристик в процесі експлуатації.

Котушки підсилювача розміщують на сердечнику із трансформаторної сталі броньового типу (мал. 2). Робоча обмотка  $N_p$  розділена на дві частини, які включають в мережу послідовно з навантаженням. Частини робочої котушки між собою включають так, щоб створювані ними змінні магнітні потоки в середній частині броньового сердечника були протилежно направлені і не наводили в обмотці керування  $N_k$  змінної ЕРС. До котушки керування прикладають постійну напругу  $U_k$  і постійний струм керування  $I_k$  створює магнітний потік  $\Phi_k$ .





Мал. 1



Мал. 2

Залежність  $\mu$  сердечника, індуктивності робочої котушки, робочого струму показані на мал. 2. Коефіцієнт підсилення магнітного підсилювача дорівнює:  $K =$

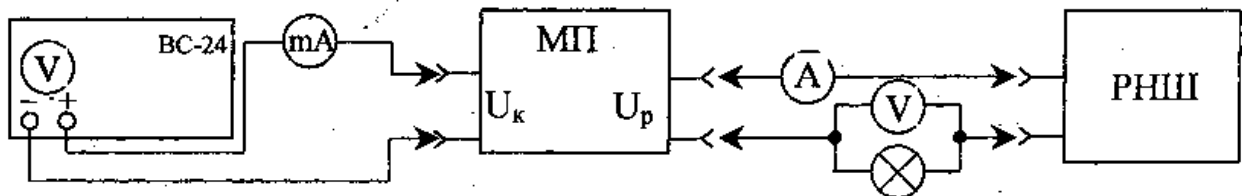
$$\frac{P_H - P_{H0}}{P_K}$$

де  $P_H$  – потужність навантаження при струмі керування  $I_K > 0$

$P_{H0}$  – потужність навантаження при  $I_K = 0$

$P_K$  – потужність, що споживається котушкою керування

### Виконання роботи:



Мал. 3

1. Збирають схему, показану на мал. 3.
2. На РНШ встановлюють напругу 100 В.
3. За допомогою ВС-24 змінюють напругу керування  $U_K$  від  $-50\text{В}$  до  $+50\text{В}$  через кожні 5В і знімають покази всіх приладів.
4. Результати вимірів заносять в таблицю:

$I_K, \text{mA}$	$U_K, \text{B}$	$I_P, \text{A}$	$U_P, \text{B}$

5. Обраховують коефіцієнт підсилення магнітного підсилювача.

6. Будують навантажувальну характеристику  $I_p=f(I_k)$  та графік залежності  $K=f(I_k)$

**Контрольні запитання:**

- 1. Як залежить коефіцієнт підсилення магнітного підсилювача від потужності навантаження.
- 2. Де використовують магнітні підсилювачі струму.

### *Список рекомендованої літератури.*

1. Колонтаєвський Ю.П. Електроніка і мікросхемотехніка: Підручник. – К.: Каравела, 2006. – 384 с.
2. Панчевний Б.І., Свергун Ю.Ф. Загальна електротехніка: теорія і практика. 2-е вид. – К.: Каравела, 2004.- 440 с.
3. Автоматика та електропривод техніки реєстрації інформації [Електронний ресурс] : навчальний посібник / Г. Г. Власюк, В. М. Співак, К. О. Трапезон, В. Б. Швайченко. – Електронні текстові дані (1 файл: 1,73 Мбайт). – Київ: Освіта України, 2010. 159 с. – Назва з екрана.–Доступ:<http://ela.kpi.ua/handle/123456789/19129>.
4. Макаренко, В.В. Цифрова та імпульсна схемотехніка. Моделювання та аналіз [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студентів, які навчаються за напрямом підготовки «Акустотехніка» / В. В. Макаренко, В. М. Співак; НТУУ «КПІ». – Електронні текстові дані (1 файл: 11,12 Мбайт). – Київ : НТУУ КПІ; 2015. – 314 с. : іл. – Назва з екрана. – Доступ: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/19099>
5. Сенько В.І. Електроніка і мікросхемотехніка: Підручник –К.: Обереги, 2000.– 584 с.
6. Основи схемотехніки електронних систем / БОЙКО В.І., ГУРЖІЙ А.М., ЖУЙКОВ В.Я., ЗОРІ А.А., СПІВАК В.М., ТЕРЕЩЕНКО Т.О. ЗАТВЕРДЖЕНО МІНІСТЕРСТВОМ ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ЯК ПІДРУЧНИК ДЛЯ СТУДЕНТІВ ВИЩИХ НАВЧАЛЬНИХ ЗАКЛАДІВ 1-ГО ТА 2-ГО РІВНІВ АКРЕДИТАЦІЇ (*лист МОН України № 1/11 -4043 від 23 вересня 2003 р.*). – К.: Вища школа, 2004. – 527 с.
7. Вартабедян В. А. Загальна електротехніка. -К.: Вища школа. Головне видавництво, 1986.
8. Будіщев М.С. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка. – Львів: Афіша, 2001. – 424 с.
9. Борко П.М.. Електротехніка: лабораторний практикум. - К.: Вища школа, 1977.
10. Гуржій А.М. Електротехніка з основами промислової електроніки: Підруч. для проф.-тех. навч. закладів/ А.М. Гуржій, А.М. Сільвестров, Н.І. Поворознюк. – К.: Форум, 2002. – 382 с.

11. Бушок Г.Ф. Курс фізики. Фізичні основи / Г.Ф. Бушок, В.В. Левандовський, Г.Ф. Півень. – К.: Либідь, 2001. - 448 с.