

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Кафедра Електроенергетики, електротехніки та електромеханіки

**«Електричні машини»**

**частина I**

Навчально-методичний посібник для проведення практичних, лабораторних та самостійних робіт з навчальної дисципліни «Електричні машини» за спеціальністю 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»



Ярошенко Л.В., Штуць А. А., Колісник М.А.

**Вінниця – 2021**

Ярошенко Л.В., Штуць А. А., Колісник М.А.

Навчально-методичний посібник для проведення практичних, лабораторних та самостійних робіт з навчальної дисципліни «Електричні машини» за спеціальністю 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» Вінниця.: РВВ ВНАУ. 2021. – 129.с.

**Рецензенти:**

**Рубаненко О.Є.**, к.т.н., доцент кафедри електричних станцій і систем, Вінницького національного технічного університету

**Висловська Н.Р.**, д.т.н., професор кафедри машин та обладнання сільськогосподарського виробництва Вінницького національного аграрного університету

**Рекомендовано до видання** науково-методичною комісією Вінницького національного аграрного університету, протокол №\_\_від \_\_\_\_\_2021 року.

## Зміст

<b>ВСТУП</b> .....	4
<b>ПРАКТИЧНА РОБОТА №1</b>	
ДОСЛІДЖЕННЯ ОДНОФАЗНОГО ДВООБМОТКОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА .....	13
<b>ПРАКТИЧНА РОБОТА №2</b>	
ДОСЛІДНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ГРУП З'ЄДНАННЯ ОБМОТОК ТРИФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА.....	32
<b>ПРАКТИЧНА РОБОТА № 3</b>	
ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАЛЕЛЬНОЇ РОБОТИ ТРИФАЗНИХ ДВООБМОТКОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ .....	43
<b>ПРАКТИЧНА РОБОТА №4</b>	
ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИОБМОТКОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА.....	51
<b>ПРАКТИЧНА РОБОТА № 5</b>	
ДОСЛІДЖЕННЯ ОБЕРТОВОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ АМ. ВИЗНАЧЕННЯ ВТРАТ ТА ККД АД .....	63
<b>ПРАКТИЧНА РОБОТА №6</b>	
ВИЗНАЧЕННЯ РОБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК АД ПО КРУГОВІЙ ДІАГРАМІ ТА ЇХ ПОРІВНЯННЯ З ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИМИ .....	81
<b>ПРАКТИЧНА РОБОТА №7</b>	
ДОСЛІДЖЕННЯ СПОСОБІВ ПУСКУ ТРИФАЗНИХ АД.....	93
<b>ПРАКТИЧНА РОБОТА №8</b>	
ПОРІВНЯННЯ РОБОЧИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ АД В ТРИФАЗНОМУ Й ОДНОФАЗНОМУ РЕЖИМАХ.....	102
<b>СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ</b> .....	113
<b>ДОДАТКИ</b> .....	114

## Вступ

Сучасна енергетика являє собою складну багаторівневу ієрархічну структуру, призначену забезпечити комфортні умови проживання населення, а також нормальне функціонування промислових підприємств, виробництв і закладів. Лише на основі надійної та ефективної системи забезпечення споживачів різного рівня потрібною енергією та енергетичними ресурсами можливі їх нормальне функціонування і розвиток. Політична та економічна незалежність і безпека держави багато в чому визначаються виробництвом енергетичних ресурсів, їх кількістю та якістю.

Електрична машина – головний елемент будьякої енергетичної установки, тому для спеціалістів, що працюють в сфері виробництва або експлуатації електричних машин, необхідні знання не тільки теорії і розуміння фізичної сутності електромагнітних, механічних та теплових процесів, що протікають в електричних машинах. Не менш важливим є вміння розбиратися в різноманітних конструктивних формах та виконаннях електричних машин, навички розрахунку необхідної потужності і вибору типорозміру електричної машини з урахуванням її технічних даних і конструктивного виконання за ступенем захисту та способом охолодження, виду монтажу, а також кліматичних умов експлуатації.

Електричні машини – це основний елемент електроенергетичного устаткування і обладнання. Вони використовуються для виробництва електричної енергії (генератори), її перетворення з метою передачі і подальшого застосування (трансформатори) та приведення в дію робочих машин і механізмів (двигуни).

## Загальна частина

### **Організація підготовки і виконання практичних та лабораторних робіт**

Для виконання практичних та лабораторних робіт за індивідуальним графіком комплектуються бригади із 3-5 студентів. Одержавши графік виконання робіт, студент повинен самостійно підготуватись до кожної з них, вивчаючи лекційний матеріал чи відповідні розділи підручників, перелік яких розміщений у кінці інструкції до кожної лабораторної роботи, а також наведені у названих інструкціях короткі теоретичні пояснення.

Для оформлення звітів із виконаних лабораторних робіт і підготовки до наступної лабораторної роботи кожен студент повинен мати підписаний робочий зошит. На кожне лабораторне заняття студент повинен приходити підготовленим із необхідними записами у робочому зошиті. Перед практичним виконанням лабораторної роботи у робочому зошиті студента повинні бути такі записи: назва та мета роботи, конспективно, найважливіші теоретичні пояснення (обов'язково наводяться необхідні для розрахунків формули), вказівки щодо виконання роботи, необхідні таблиці та електричні схеми. Детальніше необхідний обсяг записів у робочому зошиті наведено у кінці кожної інструкції до лабораторної роботи.

Перед початком занять викладач перевіряє якість підготовки студентів до проведення лабораторної роботи. Не підготовлені студенти до роботи у лабораторії не допускаються. Уся експериментальна частина робіт виконується студентами відповідно до методичних вказівок та інструкцій до лабораторних робіт під керівництвом викладача, із дотриманням правил техніки безпеки.

Отримані експериментальні дані студенти заносять до робочого зошита, обробляють і закінчують оформляти звіт із виконаної лабораторної роботи, у якому, окрім підготовчих записів повинні бути такі: заповнені таблиці експериментальних та розрахункових даних, графіки (за необхідності), висновки

студента про виконану роботу, де необхідно коротко проаналізувати отримані результати.

Усі електричні схеми і графіки необхідно виконувати акуратно, з використанням необхідних креслярських інструментів та дотриманням вимог стандартів на оформлення технічної документації. Графіки краще виконувати на міліметровому папері, приймаючи довжину його координатних осей не менше 100 мм із нанесенням на них шкал, де вказують також їх позначення та одиниці вимірювання.

Маючи оформлений звіт, кожен студент захищає роботу під час занять або у визначений викладачем час. Після захисту лабораторних робіт або в кінці навчального семестру звіти з лабораторних робіт обов'язково здаються викладачеві.

На практичних заняттях студенти набувають навиків з дослідження та налагодження різних установок, (приладів) а також поповнюють, поглиблюють і закріплюють теоретичні знання.

У практичних заняттях можна виділити чотири основні етапи: підготовчий, відтворення процесу, що вивчається, вимірювання характерних показників його проходження, аналіз та узагальнення отриманих результатів. Виконання кожного етапу потребує серйозної підготовки і свідомого ставлення до роботи.

Готуватись до кожної практичної роботи студент повинен завчасно, вивчаючи відповідні розділи навчального посібника або підручника, конспекту лекцій та практичних занять, методичні вказівки, наведені в цьому практикумі, а також ознайомитися з паспортами обладнання, яке буде досліджуватися.

Студенти повинні добре засвоїти мету, зміст роботи, фізичну суть процесів, що вивчаються, та методику виконання практичної роботи. Після цього розглядається план-схема, заготовлюються форми таблиць для запису

результатів, виконуються необхідні попередні розрахунки. Всі ці матеріали записуються у журнал спостережень (робочий зошит). Форма журналу може бути довільною, але в ньому повинні бути обов'язково відображені:

- 1) тема практичної роботи;
- 2) прізвища виконавців,
- 3) дата виконання,
- 4) план- схема,
- 5) технічні дані досліджуваної установки, засоби вимірювання,
- 6) таблиці для запису результатів дослідів і розрахунків з обов'язковим зазначенням одиниць вимірювання величин,
- 7) графи для відмітки про допуск до виконання практичної роботи та прийнятності отриманих результатів.

На початку практичного заняття студенти ознайомлюються з обладнанням робочого місця і після перевірки викладачем ступеня підготовки до занять допускаються до виконання лабораторної роботи.

Складання електричної схеми виконується одним членом бригади, але перевірити правильність складання повинен кожний студент бригади. За вказівкою викладача складання силових кіл і кіл керування виконується різними членами бригади.

Електричні схеми для проведення досліджень складаються частинами.

Спочатку складають головні (силові) кола, потім кола керування, сигналізації та вимірювання. Під час складання схем спочатку складаються послідовні (струмові) кола, а потім приєднуються паралельні (вольтметри, обмотки напруг ватметрів і лічильників електричної енергії, кола керування, сигналізації тощо). При цьому кола напруги повинні підключатись без проміжних електричних зв'язків. Це полегшує перевірку схеми членами бригади та викладачем. Під час складання і перевірки схеми особливу увагу слід приділити відповідності вимірювальних приладів роду струму та

границям вимірювання, правильній полярності підключення, цілісності і надійності контактів з'єднувальних провідників. Після закінчення складання схеми і перевірки її членами бригади викладач приймає схему і дає дозвіл на вмикання установки, що випробовується, та проведення дослідів.

Під час проведення досліду необхідно фіксувати всі характеристики досліджуваного процесу. У першу чергу записують ті параметри, які під час досліду змінюються найшвидше, не допускаючи суб'єктивного впливу на результат вимірювань. Неуважність часто призводить до викривлень і помилок. У разі отримання в одному статичному ряді величин, що сильно різняться між собою, слід записати всі дані, а потім, якщо необхідно, повторити дослід і вказати обставини, які супроводжують зазначене вимірювання. Це дозволить встановити причину викривлень і кваліфікувати вимірювання як відповідне реальному ходу процесу або як похибку (грубу помилку).

Під час експерименту необхідно робити попередню обробку результатів та їх аналіз для того, щоб бути впевненим у правильності проведення досліду і скоротити час на оформлення звіту.

Виконувати практичну роботу необхідно в певній послідовності згідно з програмою роботи, методичними вказівками та рекомендаціями керівника занять. У випадку виникнення непорозумінь під час виконання роботи необхідно звернутися до керівника занять.

Експериментальна частина роботи вважається виконаною лише після перевірки і затвердження результатів дослідів викладачем. Схему дослідження до цього моменту розбирати не можна, оскільки, якщо результати дослідів будуть визнані незадовільними, то досліди необхідно буде повторити.

Після закінчення виконання експериментальної частини роботи з дозволу викладача необхідно розібрати схему, покласти на місце вимірювальні



прилади, з'єднувальні провідники та інше обладнання, здати викладачу або лаборанту видані прилади, привести в порядок робоче місце.

Результати вимірювань та спостережень, отримані в процесі виконання практичної роботи, частково опрацьовують на поточному занятті, а остаточно – на аудиторних самостійних заняттях під керівництвом викладача. Тому, студенти при собі повинні мати обчислювальну техніку, засоби для креслення електричних схем і побудови графіків тощо. На заключному етапі складається звіт про виконану практичну роботу.

### **Правила з техніки безпеки під час виконання практичних, лабораторних робіт у лабораторіях**

Під час виконання практичних робіт необхідно точно виконувати правила техніки безпеки. На першому практичному занятті викладач проводить інструктаж з техніки безпеки, під час якого в загальних рисах характеризує основне обладнання лабораторії і більш докладно – об'єкти, які являють собою велику небезпеку. Увага студентів звертається на те, що багато електронагрівальних установок є небезпечними не тільки через можливість ураження електричним струмом, але й отримання променевих та контактних опіків.

Електротехнічні лабораторії інститутів належать до категорії приміщень із підвищеною небезпекою, оскільки у них людина може одночасно доторкнутись до металевих конструкцій будівель, технологічних апаратів та механізмів, які з'єднані із землею та до металевих корпусів і струмоведучих частин обладнання. Тому до роботи у лабораторії допускаються тільки ті студенти, які пройшли інструктаж із техніки безпеки. Під час роботи в лабораторії необхідно дотримуватись таких правил техніки безпеки:

1. Не ходити по лабораторії і не торкатись жодного обладнання, окрім того, що призначене для виконання заданої лабораторної роботи.

2. Перед початком роботи в лабораторії студент повинен ознайомитись із схемою електричного живлення лабораторії і робочих місць, з'ясувати, де розташовані апарати для вимикання і вмикання живлення всієї лабораторії.

3. Перед тим, як розпочати збирання електричної схеми на стенді, необхідно переконатись, що він не знаходиться під напругою, перевірити, чи вимкнений автоматичний вимикач, встановлений на вертикальній панелі робочого стола. Для цього потрібно натиснути на червону кнопку, а біла чи чорна кнопки повинні знаходитись у не зануреному стані, або опустити важіль автоматичного вимикача у нижнє положення, при цьому також не повинні горіти сигнальні лампочки чи світлодіоди, які розміщені поруч із вимикачем.

4. Починати складання електричної схеми, слід зі збирання послідовного кола, а потім підключати вольтметри, паралельні обмотки ватметрів і лічильників. При складанні схеми необхідно слідкувати за тим, щоб з'єднання були щільними, провідники не перетинали проходів і не потрапляли на рухомі частини машин і механізмів. Після складання схеми потрібно прибрати всі зайві провідники, прилади тощо.

5. Забороняється користуватися несправними приладами, апаратами та електричними машинами.

6. Зібрану схему перевіряють усі члени бригади, а потім викладач чи лаборант.

7. Вмикати електричну схему можна тільки з дозволу викладача, попередивши перед цим товаришів по роботі, і переконавшись, що ніхто із присутніх не торкається до струмоведучих частин обладнання чи частин обладнання, що обертаються.

8. Під час дослідів стежать за показами приладів і режимами роботи всього обладнання. Відліки за приладами ведуть в одному, заздалегідь встановленому порядку, записуючи в першу чергу параметри, які при роботі змінюються найшвидше. При проведенні дослідів усі дані випробувань та технічні дані обладнання акуратно записуються у спеціальний зошит.

9. Виконуючи роботу, не слід підходити до пристроїв, що не призначені для виконання даної лабораторної роботи, і торкатися до струмоведучих частин лабораторного обладнання. Забороняється користуватися обладнанням і приладами, що призначені для іншої мети, з'єднувати їх елементи, натискати кнопки, перемикачі вимикачі і т. д.

10. Забороняється лишати ввімкнутий лабораторний стенд без нагляду.

11. Якщо в машині є відкриті частини, що обертаються, то не обхідно перевірити, чи надійно вони закріплені; також перевірити надійність кріплення машини в цілому. Перед вмиканням стенда та під час проведення дослідів необхідно слідкувати, щоб до рухомих частин машин не могли потрапити кінці одягу, волосся та ін.

12. Категорично забороняється вносити будь-які зміни до електричного кола під напругою. При потребі таких змін необхідно за допомогою автоматичного вимикача вимкнути лабораторний стенд. Після внесення необхідних змін в електричну схему стенда його повторне включення можливе тільки з дозволу викладача і після попередження про це присутніх.

13. У разі припинення постачання електроенергії, необхідно вимкнути лабораторний стенд шляхом вимикання автоматичного вимикача, що знаходиться на стенді.

14. Виконання лабораторної роботи однією людиною забороняється.

15. Розбирати електричну схему можна тільки при вимкненій напрузі, після перевірки викладачем результатів виконаної роботи, якщо вони будуть визнані незадовільними, то експеримент слід повторити.

16. Стенд необхідно терміново відключати у таких випадках:

- при попаданні людини під напругу;
- при появі запаху горілого, диму чи вогню з обладнання або приладів;
- при порушенні нормальної роботи схеми та “зашкалюванні” стрілок приладів;
- при порушенні нормальної роботи електричної машини (сторонні шуми, тріск, стукіт і т. п.);

- при обриві проводів та пошкодженні їх ізоляції.

17. Після закінчення роботи необхідно розібрати електричну схему, акуратно скласти провідники і прибрати робоче місце.

18. За псування лабораторного обладнання, що викликане неохайним користуванням або невиконанням правил техніки безпеки, студенти несуть відповідальність і не допускаються до занять.

Студенти повинні бути ознайомлені зі схемою електроживлення робочих місць, розміщенням апаратури для відключення живлення всієї лабораторії, місцями знаходження вогнегасників і засобів виклику 101 і 103. Крім того, студенти мають дотримуватись основних правил з техніки безпеки під час експлуатації електроустановок:

1) вмикати складну схему установки, яка підлягає випробуванню, можна лише після дозволу керівника занять і переконавшись у тому, що жоден з оточуючих не може потрапити під напругу;

2) при кожному вмиканні установки під напругу попереджувати оточуючих словом “подаю напругу”;

3). забороняється виконувати будь-які зміни в електричних колах установки під напругою, якщо це не передбачено програмою роботи;

4). при появі будь-яких ознак ненормальної роботи обладнання (дим, запах гару, іскріння, підвищений шум тощо) слід негайно вимкнути живлення установки і повідомити про це керівника занять. Без дозволу викладача повторне вмикання установки не дозволяється.

Після проведення інструктажу всі студенти розписуються в спеціальному журналі і після цього несуть особисту відповідальність за дотримання правил з техніки безпеки та збереження обладнання лабораторії.

# Практична робота №1

## ДОСЛІДЖЕННЯ ОДНОФАЗНОГО ДВООБМОТКОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

**Мета роботи.** Ознайомитись з будовою однофазного та трифазного двообмоткових трансформаторів, дослідити їх в режимах холостого ходу і короткого замикання; використовуючи результати проведених дослідів, розрахунковим шляхом отримати характеристики трансформаторів в режимі навантаження й порівняти їх із дослідними; проаналізувати вплив схем з'єднання обмоток трансформатора на величину і форму кривих його струму намагнічування, фазних і лінійних напруг обмоток.

### 1.1 Програма виконання практичної роботи

#### 1.1.1 Розрахункова частина

1. За даними дослідів холостого ходу при номінальній напрузі трансформатора розрахувати:

- коефіцієнт потужності  $\cos\varphi_0$ ;
- коефіцієнт трансформації  $k$ ;
- параметри вітки намагнічування електричної схеми заміщення.

Для трифазного трансформатора крім того розрахувати:

- магнітні втрати  $\Delta p_m$ ;
- струм холостого ходу  $I_0$  у відсотках від номінального та його активну і реактивну складові.

2. За даними дослідів короткого замикання при номінальному струмі трансформатора розрахувати:

- параметри обмоток  $R_1, R'_2, X_1, X'_2$ ;
- напругу короткого замикання  $U_{к.ном} \%$  у відсотках від номінальної первинної напруги та її активну  $U_{к.а.ном} \%$  і реактивну  $U_{к.р.ном} \%$  складові;
- зовнішні характеристики трансформатора при активному, індуктивному та ємнісному навантаженнях.

3. За даними дослідів холостого ходу та короткого замикання розрахувати залежність ККД трансформатора від навантаження при  $\cos\varphi_2 = 1$ .

### 1.1.2 Графічна частина

1. За дослідними і розрахунковими даними побудувати:

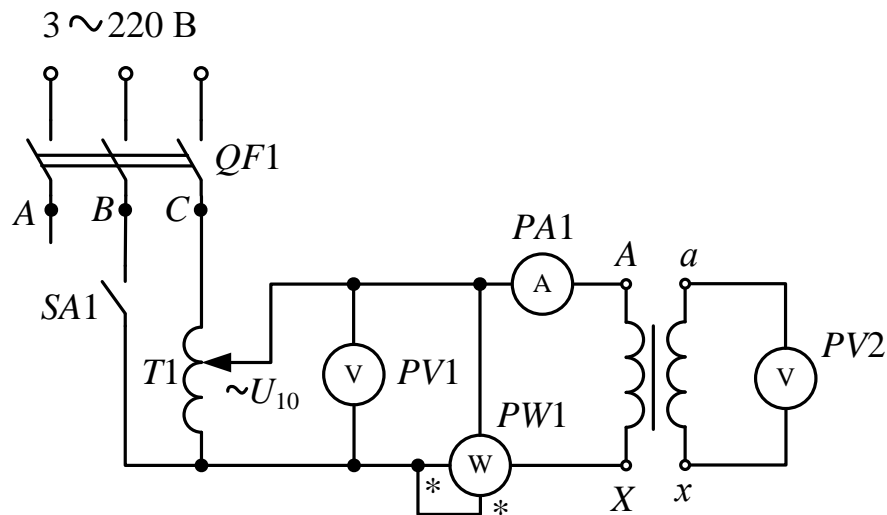
- графіки залежностей  $I_0, P_0, \cos\varphi_0 = f(U_{10})$ ;
- графіки залежностей  $I_{1\kappa}, P_{1\kappa}; \cos\varphi_\kappa = f(U_\kappa)$ ;
- графіки залежностей  $\Delta U_{2\%} = f(\beta)$  при  $\varphi_2 = 0^\circ, +90^\circ, -90^\circ$ ;
- зовнішні характеристики  $U_2 = f(\beta)$  при  $\varphi_2 = 0^\circ, +90^\circ, -90^\circ$ ; на цих графіках для порівняння нанести дослідні зовнішні характеристики;
- графік залежності  $\eta = f(\beta)$  при  $\cos\varphi_2 = 1$ ; для порівняння побудувати відповідну дослідну залежність.

2. Зобразити електричну схему заміщення трансформатора та позначити на ній всі її параметри.

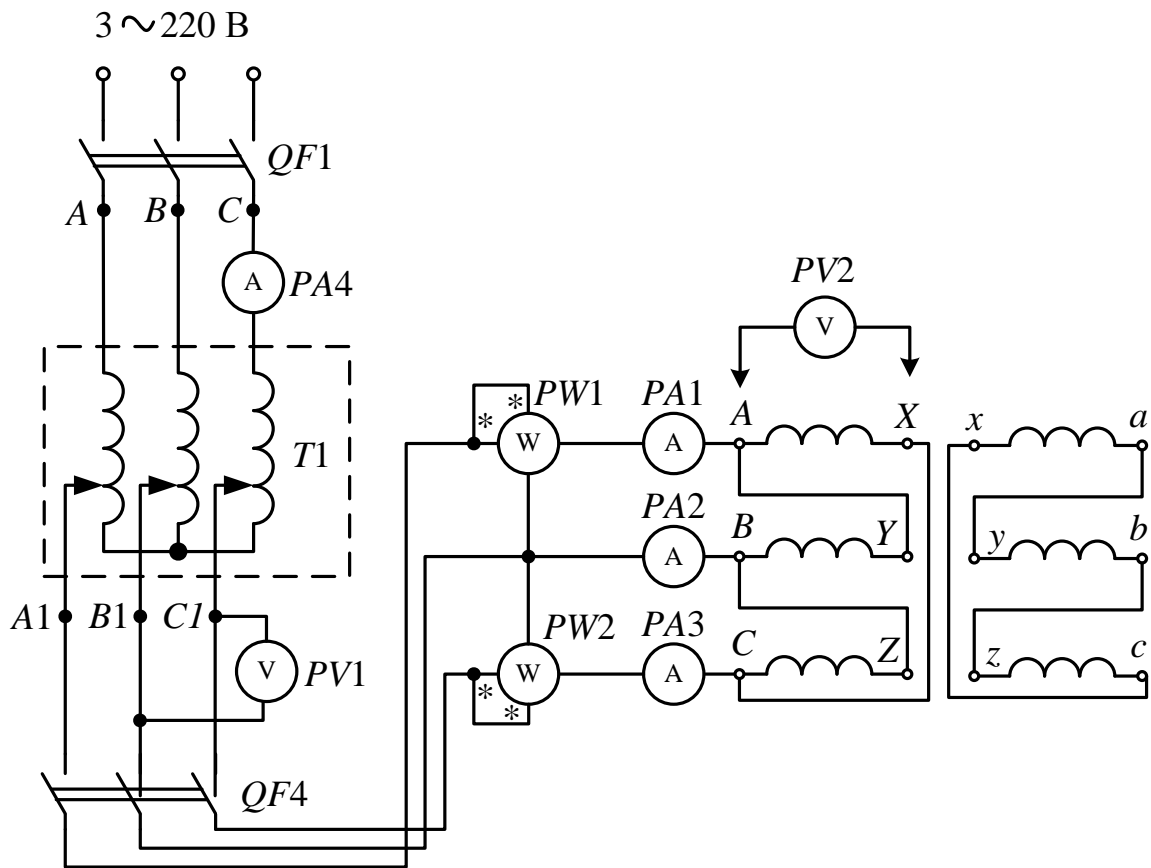
## 1.2 Методичні вказівки до виконання практичної роботи

### 1.2.1 Виконавча частина

1. Для проведення досліду холостого ходу необхідно зібрати схему, подану: для однофазного трансформатора – на рис. 1.1, для трифазного – на рис. 1.1.



**Рис. 1.1. Схема електрична принципова досліду холостого ходу однофазного трансформатора**



**Рис. 1.2. Схема електрична принципова дослідження холостого ходу трифазного трансформатора**

Дослід холостого ходу виконується при розімкненому колі навантаження, тобто при  $Z_H = \infty$  і  $I_2 = 0$ . За допомогою ЛАТРа Т1 підводиться до трансформатора напруга, яка повинна змінюватись у діапазоні  $(0,4 \div 1,1)U_{1ном}$ . В межах зазначеного діапазону провести вимірювання напруги, струмів та потужностей в 6 – 8 точках. Результати вимірювань занести до табл. 1.1 для однофазного трансформатора і до табл. 1.2 для трифазного трансформатора.

**Таблиця 1.1. Дані дослідження холостого ходу однофазного трансформатора**

№ досл.	Дослід				Розрахунок	
	$I_0$ , А	$U_{10}$ , В	$P_0$ , Вт	$U_{20}$ , В	$\cos\varphi_0$ , в.о.	$k$ , в.о.
1						
2						
⋮						

Розрахункові величини табл. 1.1:  $\cos\varphi_0$  визначають за формулою

$$\cos\varphi_0 = \frac{P_0}{U_{10}I_0},$$

а  $k$  – за формулою

$$k = \frac{U_{10}}{U_{20}}.$$

Розрахункові величини табл. 1.2:  $I_0$  визначається за формулою

$$I_0 = \frac{I_{0A} + I_{0B} + I_{0C}}{3};$$

$P_0$  – за формулою

$$P_0 = P'_0 \pm P''_0,$$

$\cos\varphi_0$  – за формулою

$$\cos\varphi_0 = \frac{P'_0 + P''_0}{\sqrt{3}U_{10}I_0} = \frac{P_0}{\sqrt{3}U_{10}I_0}.$$

$k$  – за формулою

$$k = \frac{U_{10}}{U_{20}}.$$

$$U_{10} = \frac{U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}}{3}, \quad (1.1)$$

де  $U_{AB}$ ,  $U_{BC}$ ,  $U_{CA}$  – лінійна напруга між відповідними фазами  $A$  і  $B$ ,  $B$  і  $C$  та  $C$  і  $A$  первинної обмотки трансформатора;

$$U_{20} = \frac{U_{ab} + U_{bc} + U_{ca}}{3}, \quad (1.2)$$

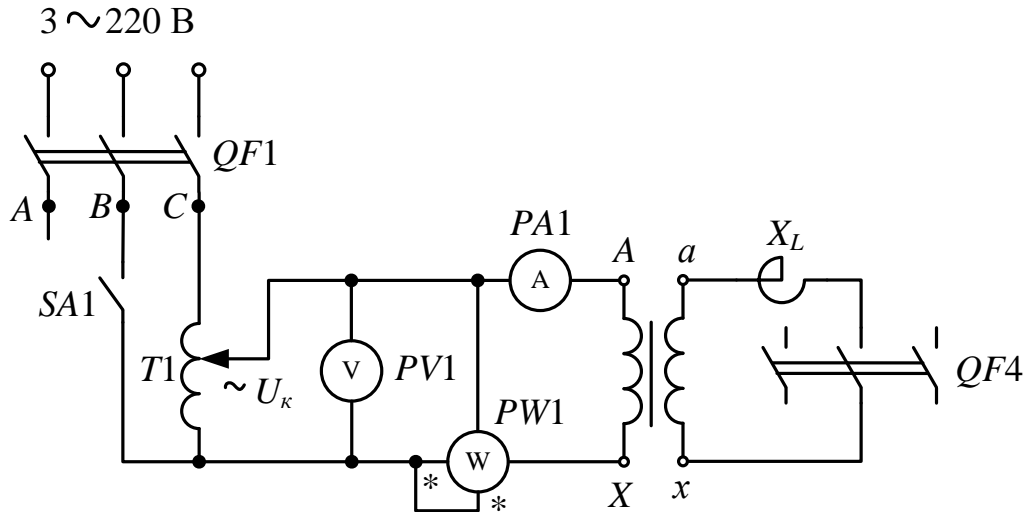
де  $U_{ab}$ ,  $U_{bc}$ ,  $U_{ca}$  – лінійна напруга між відповідними фазами  $a$  і  $b$ ,  $b$  і  $c$  та  $c$  і  $a$  вторинної обмотки трансформатора.



Таблиця 1.2. Дані досліді холостого ходу трифазного трансформатора

№ ДОСЛ.	Дослід												Розрахунок				
	$I_{0A}$ A	$I_{0B}$ A	$I_{0C}$ A	$U_{AB}$ B	$U_{BC}$ B	$U_{CA}$ B	$P'_0$ Вт	$P''_0$ Вт	$U_{ab}$ B	$U_{bc}$ B	$U_{ca}$ B	$I_0$ A	$U_{10}$ В	$P_0$ Вт	$U_{20}$ ВТ	$\cos\varphi_0$ В.О.	$k$ В.О.
1																	
2																	
⋮																	

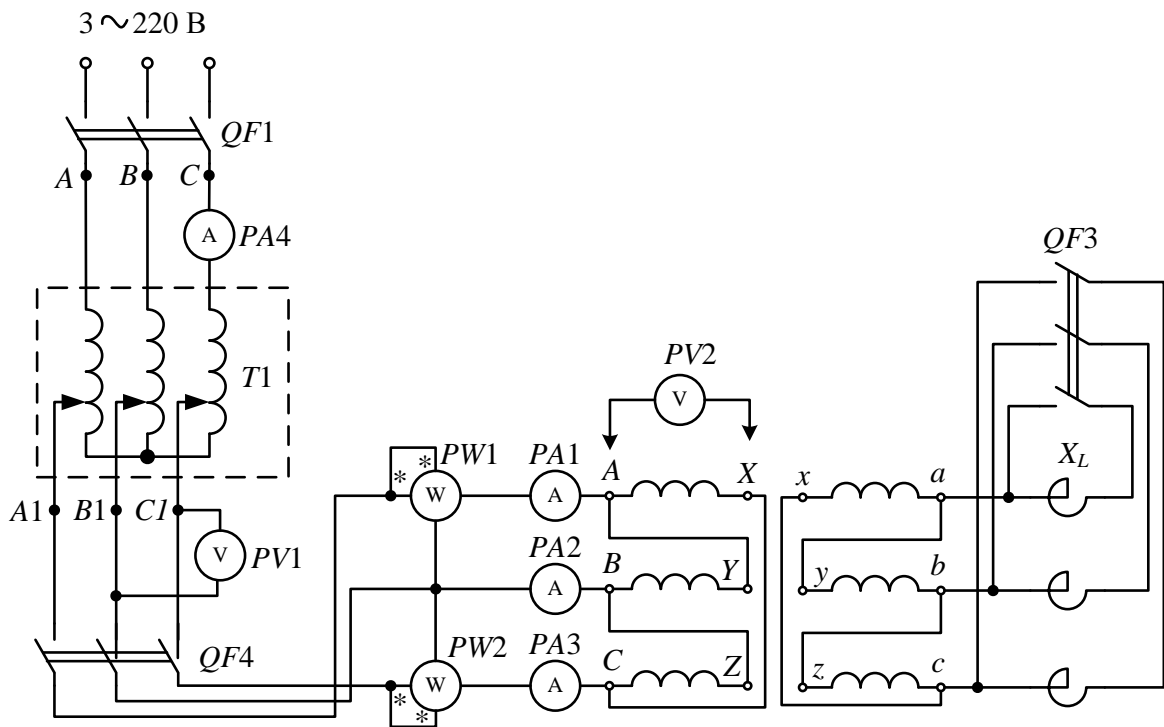
2. Для проведення досліду короткого замикання зібрати схему, подану: для однофазного трансформатора – на рис. 1.3, для трифазного – на рис. 1.4.



**Рис. 1.3. Схема електрична принципова досліду короткого замикання однофазного трансформатора**

Необхідно пам'ятати, що в досліді короткого замикання до трансформатора повинна підводитись знижена напруга  $U_k$ , найбільше значення якої повинно бути таким, щоб йому відповідали номінальні струми в обмотках трансформатора  $I_{1ном}$  та  $I_{2ном}$ .

Перед початком досліду за допомогою ЛАТРа Т1 (рис. 1.4.) встановлюють  $U_k = 0$  і тільки після цього вмикають автомат QF4. Потім напруга повинна плавно збільшуватись до значення  $U_k$ , при якому  $I_{1к} = 1,2I_{1ном}$ . В межах зазначеного діапазону вимірюють напруги, струми і потужності в 6 – 8 точках. Результати вимірювань заносять до табл. 1.3. для однофазного трансформатора і до табл. 1.4. для трифазного трансформатора.



**Рис. 1.4. Схема електрична принципова дослідю короткого замикання трифазного трансформатора**

**Таблиця 1.3. Дані дослідю короткого замикання однофазного трансформатора**

№ ДОСЛ.	Дослід			Розрахунок						
	$I_{1к}$ , А	$U_{к}$ , В	$P_{к}$ , Вт	$\cos\varphi_{к}$ , в.о.	$U_{к\%}$ , %	$U_{к.а.}\%$ , %	$U_{к.р.}\%$ , %	$Z_{к}$ , Ом	$R_{к}$ , Ом	$X_{к}$ , Ом
1										
2										
⋮										

Розрахункові величини табл. 1.3:  $\cos\varphi_{к}$  визначають за формулою

$$U_{к} = \frac{U_{кА} + U_{кВ} + U_{кС}}{3};$$

напругу короткого замикання  $U_{к\%}$  – за формулою

$$U_{\kappa \%} = \frac{U_{\kappa}}{U_{1НОМ}} \cdot 100\%, \quad (1.3)$$

активну складову напруги короткого замикання  $U_{\kappa.a. \%}$  – за формулою

$$U_{\kappa.a. \%} = U_{\kappa \%} \cdot \cos \varphi_{\kappa}, \quad (1.4)$$

реактивну складову напруги короткого замикання  $U_{\kappa.p. \%}$  – за формулою

$$U_{\kappa.p. \%} = U_{\kappa \%} \cdot \sin \varphi_{\kappa} = \sqrt{U_{\kappa \%}^2 - U_{\kappa.a. \%}^2}, \quad (1.5)$$

$Z_{\kappa}$  – за формулою

$$\begin{cases} Z_{\kappa} = Z_1 + Z_2' = \frac{U_{1\kappa}}{I_{1\kappa}}; \\ R_{\kappa} = \frac{P_{\kappa}}{I_{1\kappa}^2} = Z_{\kappa} \cos \varphi_{\kappa}; \\ X_{\kappa} = \sqrt{Z_{\kappa}^2 - R_{\kappa}^2}. \end{cases}$$

$R_{\kappa}$  – за формулою

$$R_{\kappa} = \frac{P_{\kappa}}{I_{1\kappa}^2}, \quad (1.5)$$

$X_{\kappa}$  – за формулою

$$X_{\kappa} = Z_{\kappa} \sin \varphi_{\kappa} = \sqrt{Z_{\kappa}^2 - R_{\kappa}^2}. \quad (1.6)$$

Розрахункові величини табл. 1.4:  $I_{1\kappa}$  визначають за формулою

$$I_{1\kappa} = \frac{I_{\kappa A} + I_{\kappa B} + I_{\kappa C}}{3};$$

$U_{\kappa}$  – за формулою

$$U_{\kappa} = \frac{1}{3} \cdot (U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}), \quad (1.7)$$

$P_{\kappa}$  – за формулою

$$P_{\kappa} = P'_{\kappa} + P''_{\kappa},$$

$\cos \varphi_{\kappa}$  – за формулою

$$\cos \varphi_K = \frac{P_K}{\sqrt{3} U_K I_{1K}}.$$

$U_K$  % – за формулою

$$E_j = 4,44 f w_j \Phi,$$

$$j = 1, 2.$$

$U_{к.а.}$  % – за формулою

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{e_1}{e_2} = \frac{w_1}{w_2}.$$

$U_{к.р.}$  % – за формулою

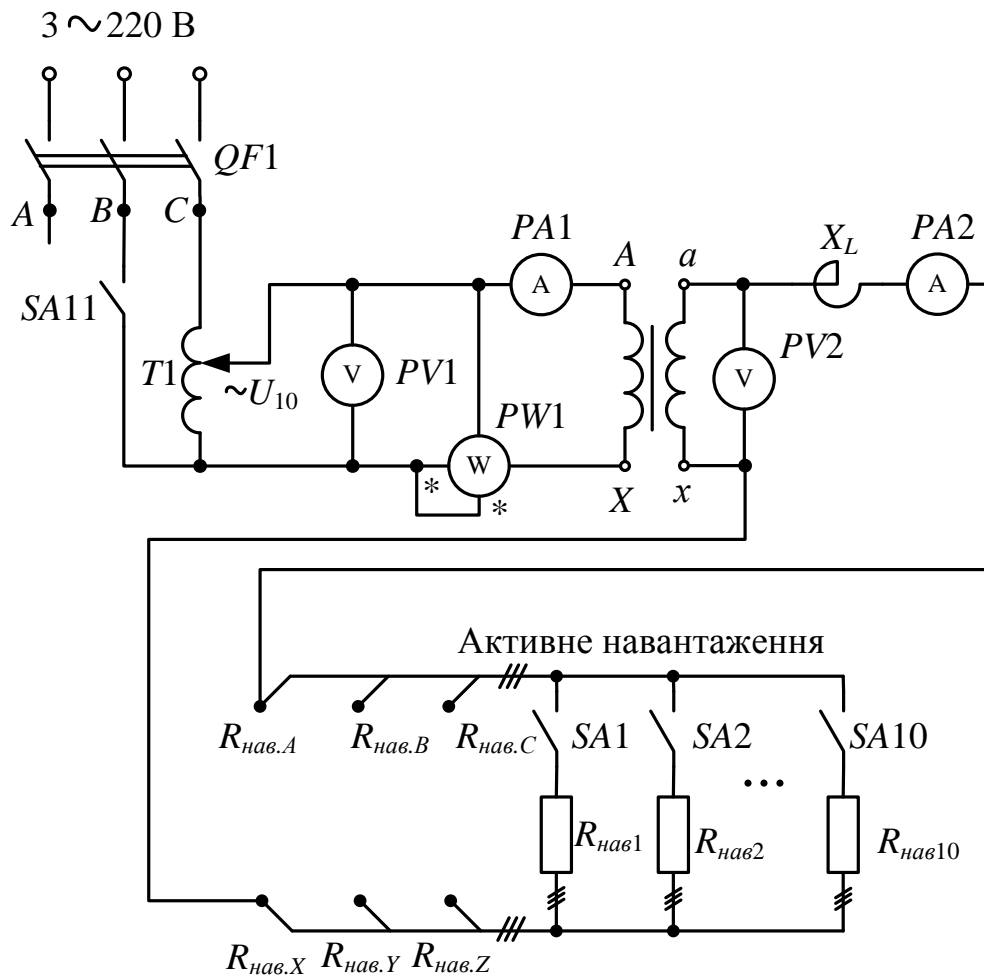
$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{w_1}{w_2}.$$

пори  $Z_K$ ,  $R_K$  та  $X_K$  – за системою рівнянь

$$\left\{ \begin{array}{l} Z_K = \frac{\sqrt{3} U_{1K}}{I_{1K}}; \\ R_K = \frac{P_K}{I_{1K}^2}; \\ X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2}. \end{array} \right.$$

3. Досліди навантаження виконують при активному ( $Z_n = R_n$ ) навантаженні, для чого на вихідні виводи трансформатора вмикається відповідне навантаження (рис. 1.5 – для однофазного трансформатора, рис. 1.6 – для трифазного трансформатора). Вимірювальні прилади повинні бути підібрані відповідно до очікуваних величин напруги, струмів і потужностей.

В дослідах навантаження трансформатор повинен працювати при номінальному і постійному значенні напруги живлення  $U_{1ном} = \text{const}$ . Струм навантаження  $I_2$  повинен змінюватись від нуля до  $1,2 I_{2ном}$ . В цьому діапазоні необхідно провести вимірювання в 6–8 точках, результати вимірювань занести до табл. 1.5 для однофазного трансформатора і до табл. 1.6 для трифазного трансформатора.



**Рис. 1.5. Схема електрична принципова дослідження навантаження однофазного трансформатора**

Розрахункові величини табл. 1.3:  $P_2$  визначається за формулою

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2, \quad (1.8)$$

$\beta$  – за формулою

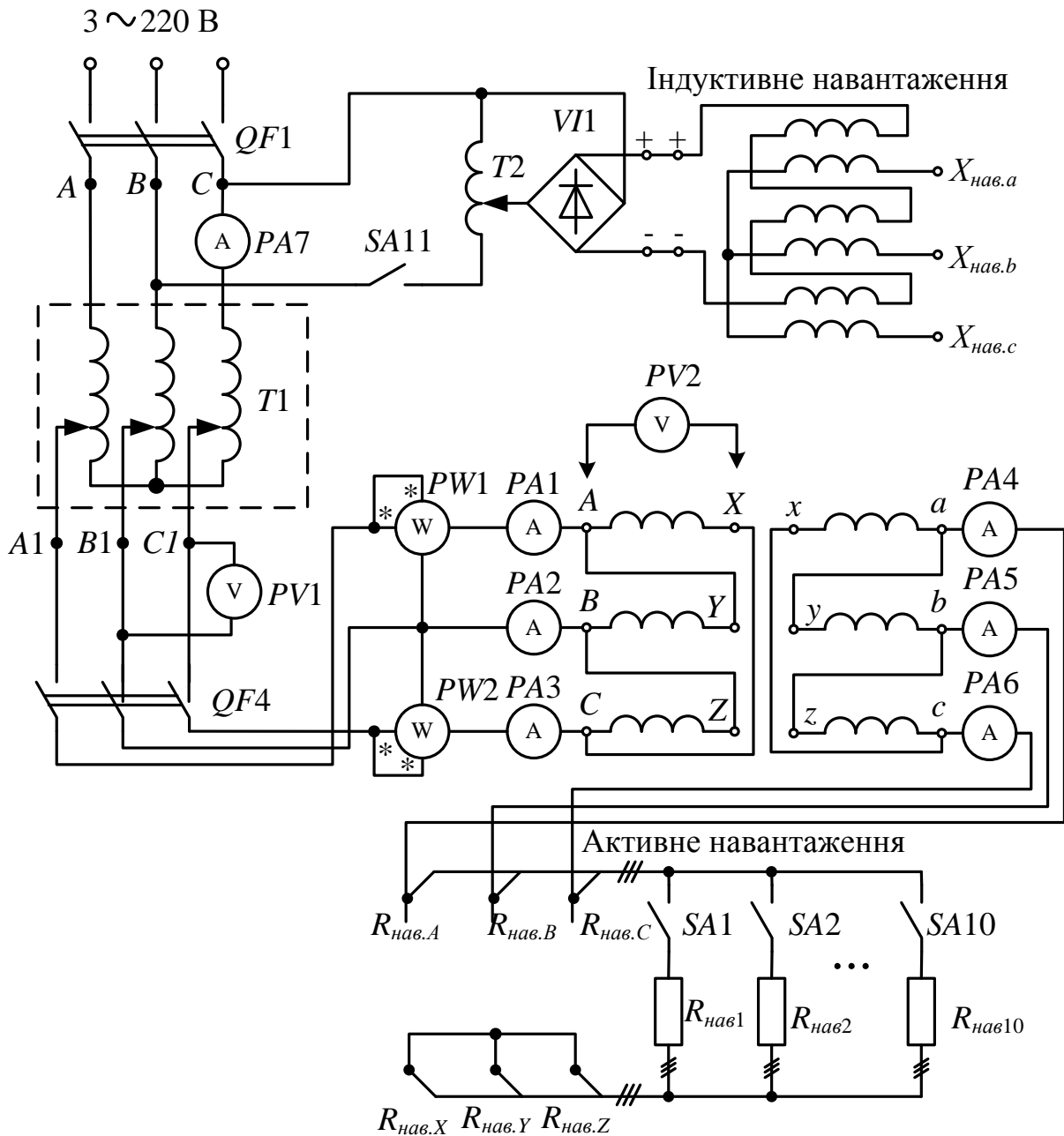
$$\beta = \frac{I_2}{I_{2\text{ном}}} = \frac{I_1}{I_{1\text{ном}}},$$

$\eta$  – за формулою

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2 I_2 \cos \varphi_2}{U_1 I_1 \cos \varphi_1}$$

$\Delta U_{2\%}$  – за формулою

$$\Delta U_{2\%} = \frac{U_{2\text{ном}} - U_2}{U_{2\text{ном}}}. \quad (1.9)$$



**Рис. 1.6. Схема електрична принципова дослідження навантаження трифазного трансформатора**

Розрахункові величини табл. 1.6:  $P_1$  визначається за формулою

$$P_1 = P' \pm P'', \quad (1.10)$$

де  $P', P''$  – покази ватметрів в режимі навантаження,  
 $U_2$  – за формулою

Таблиця 1.4 Дані дослід короткого замикання трифазного трансформатора

№ ДОСЛ.	Дослід						Розрахунок											
	$I_{KA},$ A	$I_{KB},$ A	$I_{KC},$ A	$U_{AB},$ B	$U_{BC},$ B	$U_{CA},$ B	$P'_K,$ Вт	$P''_K,$ Вт	$I_{K1},$ A	$U_{K1},$ B	$P_{K1},$ Вт	$\cos\varphi_{K1},$ в.о.	$U_{K\%},$ %	$U_{K.a. \%},$ %	$U_{K.p. \%},$ %	$Z_{K1},$ ОМ	$R_{K1},$ ОМ	$X_{K1},$ ОМ
1																		
2																		
:																		



**Таблиця 1.5. Дані досліду навантаження для однофазного трансформатора**

№ досл.	Дослід					Розрахунок			
	$\varphi_2$ , °	$U_1$ , В	$P_1$ , Вт	$I_2$ , А	$U_2$ , В	$P_2$ , Вт	$\beta$ , %	$\eta$ , в.о.	$\Delta U_2$ %, %
1	0°								
2									
⋮									

**Таблиця 1.6. Дані досліду навантаження для трифазного трансформатора**

№ досл.	Дослід										Розрахунок						
	$\varphi_2$ , °	$U_1$ , В	$P'$ , Вт	$P''$ , Вт	$I_{2a}$ , А	$I_{2b}$ , А	$I_{2c}$ , А	$U_{ab}$ , В	$U_{bc}$ , В	$U_{ca}$ , В	$P_1$ , Вт	$U_2$ , В	$I_2$ , А	$P_2$ , Вт	$\beta$ , %	$\eta$ , в.о.	$\Delta U_2$ %, %
1	0																
2																	
⋮																	
1	90																
2																	
⋮																	

$$U_2 = \frac{1}{3} \cdot (U_{ab} + U_{bc} + U_{ca}), \quad (1.11)$$

$I_2$  – за формулою

$$I_2 = \frac{1}{3} \cdot (I_{2a} + I_{2b} + I_{2c}), \quad (1.12)$$

де  $I_{2a}$ ,  $I_{2b}$ ,  $I_{2c}$  – струми в лініях  $a$ ,  $b$  та  $c$ ;

$P_2$  – за формулою

$$P_2 = \sqrt{3} \cdot U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2, \quad (1.13)$$

$\beta$  – за формулою

$$\beta = \frac{I_2}{I_{2ном}} = \frac{I_1}{I_{1ном}},$$

$\eta$  – за формулою

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2 I_2 \cos \varphi_2}{U_1 I_1 \cos \varphi_1}$$

$\Delta U_{2\%}$  – за формулою

$$\Delta U_{2\%} = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} \cdot 100 = \frac{U'_{20} - U'_2}{U'_{20}} \cdot 100.$$

### 1.2.2 Розрахункова частина

В реальних умовах експлуатації трансформатор зазвичай працює при номінальному значенні напруги живлення, у зв'язку з чим усі параметри, які характеризують його роботу при холостому ході, повинні визначатися саме для цього значення напруги.

Розрахувати зовнішні характеристики трансформатора, використовуючи формулу

$$\Delta U_{2\%} = \beta \Delta U_{2ном\%} = \beta (U_{к.а.ном\%} \cos \varphi_{2н} + U_{к.р.ном\%} \sin \varphi_{2н})$$

та

$$U_2 = U_{2ном} \cdot \left( 1 - \frac{\Delta U_{2\%}}{100} \right). \quad (1.14)$$

Розрахунок потрібно зробити для трьох граничних значень кута  $\varphi_2 = 0^\circ$  (активне навантаження),  $90^\circ$  (індуктивне навантаження) та  $-90^\circ$  (ємнісне навантаження) і для робочого діапазону зміни  $\beta$  від нуля до одиниці.

Результати розрахунків занести до табл. 1.7.

**Таблиця 1.7. Результати розрахунку вторинної напруги та ККД при зміні навантаження**

$\varphi_2, ^\circ$		$\beta$					
		0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
90	$\Delta U\%$						
	$U_2$						
-90	$\Delta U\%$						
	$U_2$						
0	$\Delta U\%$						
	$U_2$						
	$\eta$						

ККД трансформатора можна розрахувати на основі даних, приведених у паспорті трансформатора й отриманих з дослідів холостого ходу і короткого замикання за формулою

$$\eta = 1 - \frac{\beta^2 P_k + P_0}{\beta S_{ном} \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_k}$$

ККД слід розраховувати при активному характері навантаження. Результати розрахунку занести до табл. 1.7.

Необхідно визначити максимальний ККД трансформатора.

### **Задача 1.1.**

Задано однофазний трансформатор номінальною потужністю  $S_{ном} = 100$  кВ·А, номінальними напругами  $U_{1л.ном} = 6$  кВ і  $U_{2л.ном} = 0,4$  кВ при частоті  $f = 50$  Гц; діюче значення напруги, що припадає на один виток обмоток,  $U_{вит} = 5$  В; коефіцієнт заповнення шихтованого стрижня сталлю  $k_c = 0,93$ ; густина струму в провідниках  $\Delta = 4$  А/мм<sup>2</sup>; максимальне значення магнітної індукції в стрижні  $B_{ст} = 1,4$  Тл.

Визначити: числа витків обмоток трансформатора  $w_1$  і  $w_2$ ; поперечний переріз проводів первинної  $s_{пер1}$  і вторинної  $s_{пер2}$  обмоток; поперечний переріз стрижня магнітопроводу  $s_{пер.ст}$ .

Розв'язок

Числа витків в обмотках:

$$w_j = \frac{U_{jл.ном}}{U_{вит}}, \quad j = 1, 2;$$

$$w_1 = \frac{6000}{5} = 1200 \text{ (витків)};$$

$$w_2 = \frac{400}{5} = 80 \text{ (витків)}.$$

Номинальні значення струмів в обмотках:

$$I_{jл.ном} = \frac{S_{ном}}{U_{jл.ном}}, \quad j = 1, 2;$$

$$I_{1л.ном} = \frac{100}{6} = 16,7 \text{ (A)};$$

$$I_{2л.ном} = \frac{100}{0,4} = 250 \text{ (A)}.$$

Поперечний переріз проводів обмоток:

$$S_{пер j} = \frac{I_{jл.ном}}{\Delta}, \quad j = 1, 2;$$

$$S_{пер1} = \frac{16,7}{4} = 4,2 \text{ (мм}^2\text{)};$$

$$S_{пер2} = \frac{250}{4} = 62,5 \text{ (мм}^2\text{)}.$$

Припустивши, що  $U_{2л.ном} = E_2$ , із виразу (1.3) знаходимо значення магнітного потоку:

$$\Phi = \frac{E_2}{4,44 f w_2};$$

$$\Phi = \frac{400}{4,44 \cdot 50 \cdot 80} = 0,023 \text{ (Вб)}.$$

Поперечний переріз стрижня магнітопроводу:

$$S_{\text{неp.см}} = \frac{\Phi}{k_c B_{\text{см}}},$$

$$S_{\text{неp.см}} = \frac{0,023}{0,93 \cdot 1,4} = 0,02 \text{ (м}^2\text{)}.$$

### 1.2.3 Графічна частина

За даними досліду холостого ходу побудувати в одних координатних осях залежності  $I_0$ ,  $P_0$ ,  $\cos\varphi_0 = f(U_{10})$  і вказати на них значення цих величин, що відповідають номінальній напрузі.

За даними досліду короткого замикання побудувати в одних координатних осях залежності  $I_{1к}$ ,  $P_{1к}$ ;  $\cos\varphi_k = f(U_k)$  і вказати на них значення усіх величин, що відповідають номінальному струму, тобто  $I_{1к} = I_{1\text{ном}}$ .

В одних координатних осях побудувати розрахункові залежності  $\Delta U_{2\%} = f(\beta)$  при  $\varphi_2 = 0^\circ, +90^\circ, -90^\circ$ .

В одних координатних осях побудувати розрахункові зовнішні характеристики трансформатора  $U_2 = f(\beta)$  при  $\varphi_2 = 0^\circ, +90^\circ, -90^\circ$ . Там само для порівняння побудувати відповідні дослідні характеристики, зняті при  $\varphi_2 = 0^\circ$  і  $90^\circ$ .

Ще в одних координатних осях побудувати розрахункову і дослідну залежності  $\eta = f(\beta)$  при активному характері навантаження.

Зобразити в звіті повну електричну схему заміщення досліджуваного трансформатора і вказати на ній кількісні значення всіх її параметрів.

### Контрольні питання

1. Будова і призначення основних вузлів трансформатора.
2. Магнітні потоки і рівняння трансформатора в режимі холостого ходу.
3. Електрична схема заміщення трансформатора в режимі холостого ходу та фізичний зміст її параметрів.
4. Призначення і методика проведення досліду холостого ходу.
5. Довести, що вольт-амперна характеристика трансформатора на холостому ході, тобто  $U_{10} = f(I_0)$ , повторює характер кривої намагнічування сталі магнітопроводу, тобто  $B_{\text{см}} = f(H_{\text{см}})$ , а залежність  $U_{10} = f(I_{10})$  має

- параболічний характер.
6. Пояснити форми кривих струмів і напруги в режимі холостого ходу трифазного трансформатора при різних схемах з'єднання його обмоток.
  7. Електрична схема заміщення трансформатора при короткому замиканні та фізичний зміст її параметрів.
  8. Призначення і методика проведення досліду короткого замикання.
  9. Пояснити вигляд зовнішніх характеристик трансформатора при різних характерах навантаження.
  10. Пояснити вигляд залежності  $\eta = f(\beta)$ . Методика визначення максимального значення ККД.
  11. Векторні діаграми трансформатора на холостому ході і при різних характерах навантаження; методика їх побудови.

#### 1.4. Задачі для самостійного розв'язування

1. Для трифазного знижувального трансформатора з номінальною потужністю  $S_{ном} = 1,5$  кВ·А і з'єднанням обмоток ВН і НН в трикутник розрахувати фазні та лінійні номінальні струми обох обмоток, корисну та споживану активні потужності, споживану реактивну потужність, якщо номінальні лінійні напруги обмоток дорівнюють 220 і 133 В, номінальний ККД  $\eta_n = 92\%$ , коефіцієнт потужності навантаження  $\cos\varphi_2 = 0,8$ .

2. Трифазний трансформатор з номінальними параметрами, наведеними в попередній задачі, працює як знижувальний в режимі холостого ходу і споживає з мережі струм, який складає 10% номінального. Активний опір фази первинної обмотки  $R_1 = 1,8$  Ом. Коефіцієнт потужності трансформатора в цьому режимі  $\cos\varphi_0 = 0,2$ . Визначити магнітні втрати трансформатора.

3. Для трифазного трансформатора з номінальною потужністю 1,5 кВ·А і номінальним ККД, рівним 92%, визначити постійні та змінні втрати в номінальному режимі при  $\cos\varphi_2 = 0,8$ , якщо відомо, що постійні втрати складають 1/4 змінних втрат при номінальному навантаженні трансформатора. Розрахувати також значення максимального ККД трансформатора.

4. Для трифазного знижувального трансформатора з номінальною потужністю  $S_{ном} = 1,5$  кВ·А,  $U_{1ном} = 220$  В,  $U_{2ном} = 133$  В та з'єднанням обох

обмоток в трикутник розрахувати процентне значення напруги короткого замикання та його активну і реактивну складові, якщо опори фаз обмоток трансформатора складають  $R_1 = R_2' = 1,80 \text{ Ом}$ ,  $X_1 = X_2' = 0,35 \text{ Ом}$ . Визначити також усталене значення експлуатаційного струму короткого замикання кожної з обмоток трансформатора.

5. Для трифазного трансформатора з номінальною потужністю  $S_{ном} = 1,5 \text{ кВ}\cdot\text{А}$ ,  $U_{1ном} = 220 \text{ В}$ ,  $U_{2ном} = 230 \text{ В}$  та з'єднанням первинної обмотки в трикутник, а вторинної в зірку визначити в режимі номінального навантаження при  $\cos\varphi_2 = 0,8$  вихідну фазну напругу, якщо опори обмоток трансформатора складають  $R_1 = R_2' = 1,8 \text{ Ом}$ ,  $X_1 = X_2' = 0,35 \text{ Ом}$ . Струмом холостого ходу трансформатора знехтувати.

6. В результаті вимірювання мостом постійного струму отримані опори обмоток трансформатора  $R_1 = 1,8 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 0,6 \text{ Ом}$ . Номінальні фазні напруги обмоток  $U_{1фном} = 220 \text{ В}$ ,  $U_{2фном} = 127 \text{ В}$ . Визначити активні та індуктивні опори обох обмоток приведенного трансформатора, якщо напруга короткого замикання трансформатора  $U_k \% = 4\%$ ,  $I_{1фном} = 2,28 \text{ А}$ .

7. Знайти діюче значення ЕРС одного витка і числа витків обмоток трансформатора, якщо номінальні напруги обмоток  $U_{1ном} = 220 \text{ В}$ ,  $U_{2ном} = 230 \text{ В}$  і схеми їх з'єднання відповідно трикутник і зірка. Активний переріз стрижня магнітопроводу  $\Pi_{ст} = 26 \text{ см}^2$ , індукція в стрижні  $B_{ст} = 1,3 \text{ Тл}$ .

8. В режимі холостого ходу трифазний знижувальний трансформатор потужністю  $S_{ном} = 1,5 \text{ кВ}\cdot\text{А}$ ,  $U_{1ном} = 220 \text{ В}$ ,  $U_{2ном} = 133 \text{ В}$  та з'єднанням обмоток в трикутник споживає з мережі струм, рівний 10% від номінального значення. Споживана з мережі активна потужність  $P_0 = 60 \text{ Вт}$ . Опори первинної обмотки  $R_1 = 1,8 \text{ Ом}$ ,  $X_1 = 0,35 \text{ Ом}$ . Визначити параметри вітки намагнічування електричної схеми заміщення трансформатора.

**Практична робота №2**  
**ДОСЛІДНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ГРУП З'ЄДНАННЯ ОБМОТОК**  
**ТРИФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА**

**Мета роботи.** Дослідним шляхом визначити групи з'єднання обмоток трифазного трансформатора для різного сполучення схем з'єднання обмоток ВН і НН та різного маркування їх початків і кінців; зробити початкове маркування виводів усіх фаз обох обмоток трансформатора.

**2.1 Короткі теоретичні відомості**

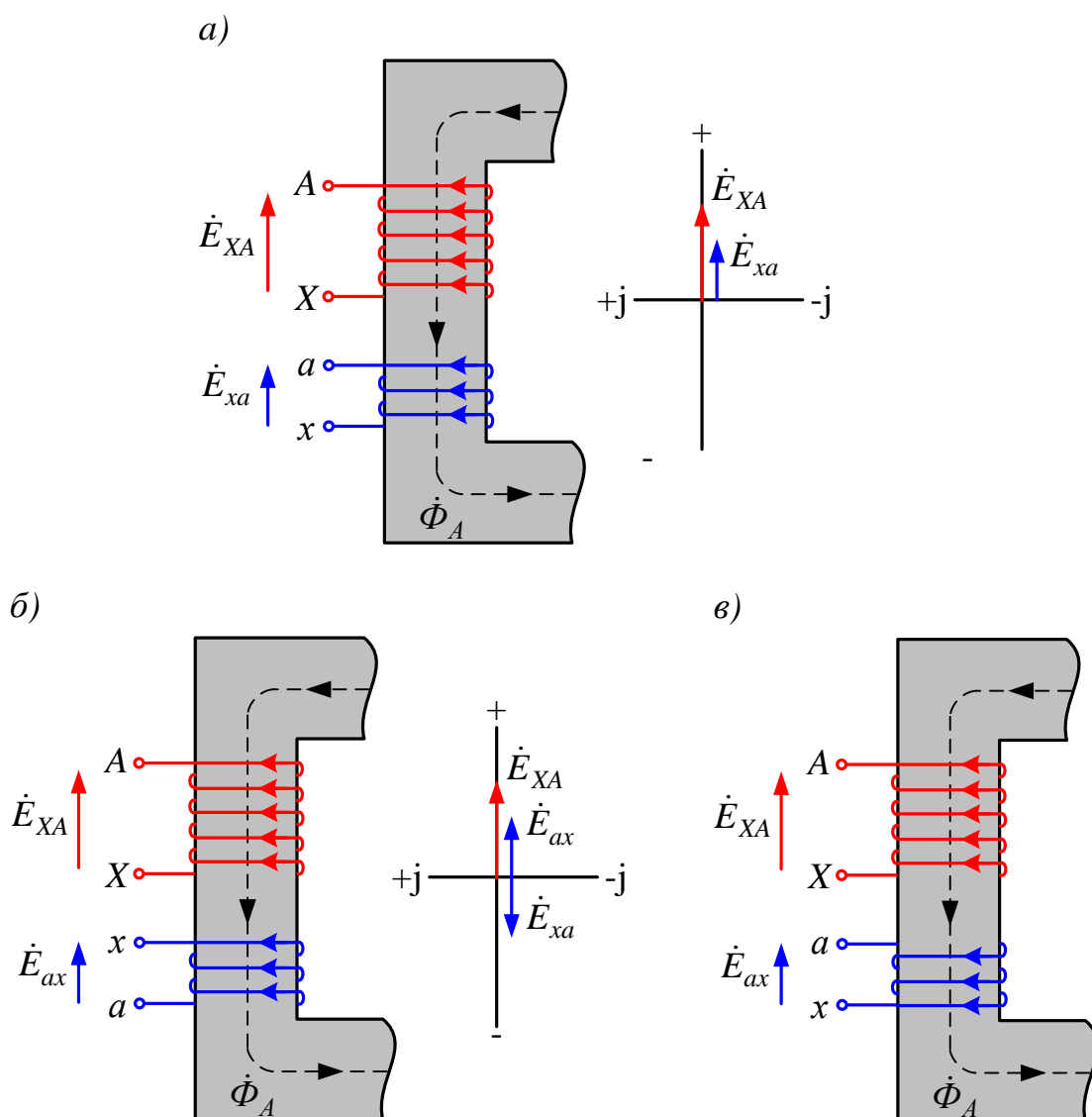
Залежно від маркування початків і кінців обмоток трансформатора та напрямку їх намотування вектори ЕРС обмоток можуть мати різні напрямки.

Наприклад, якщо дві обмотки ВН  $A-X$  і НН  $a-x$ , намотані в одному напрямку і мають однакове маркування початків і кінців (рис. 2.1, *a*), то відповідно до закону електромагнітної індукції позитивні напрямки індукованих в них ЕРС пов'язані з напрямком магнітного потоку  $\Phi$  правилом правого гвинта, внаслідок чого обидві вони ( $\dot{E}_{XA}$  – вектор ЕРС між виводами  $X$  і  $A$ ,  $\dot{E}_{xa}$  – вектор ЕРС між виводами  $x$  і  $a$ ) спрямовані від нижнього кінця обмотки до верхнього, тобто від їхніх кінців до початків. При однаковому маркуванні ці ЕРС будуть однойменними і їх вектори збігатимуться.

Якщо в обмотці НН поміняти місцями маркування початків і кінців, то в самій обмотці напрямок ЕРС не зміниться (рис. 2.1, *b*), але тепер відповідно до нового маркування вона повинна бути спрямована не від кінця до початку, як у першому випадку, а від початку до кінця. Внаслідок цього з вектором  $\dot{E}_{XA}$  повинен збігатися вектор  $\dot{E}_{ax}$ , а однойменний вектор  $\dot{E}_{xa}$  буде спрямований назустріч  $\dot{E}_{XA}$ .

Такий самий результат буде спостерігатися й у випадку незмінного маркування початків і кінців обох обмоток, але при зміні напрямку намотування обмотки НН на протилежний (рис. 2.1, *в*).





**Рис. 2.1.** До визначення груп з'єднання обмоток

Таким чином, якщо дві обмотки розташовані на одному стрижні магнітопроводу, намотані в одному напрямку і мають однакове маркування початків і кінців, то напрямки їх однойменних векторів ЕРС збігаються.

Якщо при незмінному напрямку намотування змінити маркування початків і кінців обмотки, то вектор її однойменної ЕРС повернеться на  $180^\circ$ .

Якщо при незмінному маркуванні початків і кінців обмотки змінити на протилежний напрямку її намотування, то вектор її однойменної ЕРС також повернеться на  $180^\circ$ .

Якщо трансформатор однофазний, то кут між однойменними векторами ЕРС обмоток ВН і НН може бути рівним  $0^\circ$  або  $180^\circ$ .

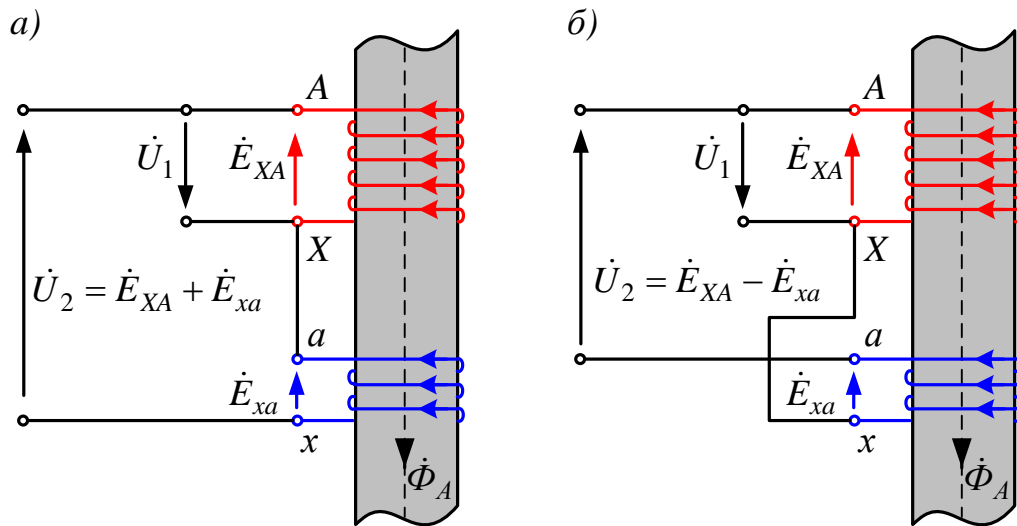
У трифазному трансформаторі однойменні фази обмоток ВН і НН можуть розташовуватися як на одному, так і на різних стрижнях, внаслідок чого кут між векторами однойменних ЕРС може приймати значення, кратні  $30^\circ$ .

Група з'єднання визначається кутом зсуву  $\alpha$  між векторами однойменних лінійних ЕРС обмоток ВН і НН. Кут відраховується за годинниковою стрілкою від вектора ЕРС обмотки ВН до вектора ЕРС обмотки НН.

З розглянутого випливає, що якщо обмотки ВН і НН, розташовані на одному стрижні, з'єднати між собою послідовно, то їх ЕРС при цьому можуть додаватися або відніматися. При однакових напрямках намотування і маркуванні початків і кінців обмоток (рис. 2.1, *а*) послідовне включення називається узгодженим, якщо ЕРС обмоток додаються (початок *a* з'єднується з кінцем *X*), і зустрічним, якщо їх ЕРС віднімаються (кінець *x* з'єднується з кінцем *X*). Це необхідно враховувати при маркуванні обмоток. Якщо обмотки, з'єднані послідовно, будуть розташовані на різних стрижнях магнітопроводу, то висновок про їх узгоджене і зустрічне включення буде протилежним відносно попереднього.

Якщо до однієї з двох послідовно з'єднаних обмоток підвести напругу, то з двох обмоток можна знімати напругу, значення якої може бути більшим або меншим за значення тієї напруги, яка підводиться. Такий пристрій називається відповідно підвищувальним чи знижувальним **автотрансформатором**. Перший буде мати місце при узгодженому включенні обмоток (рис. 2.2, *а*), другий – при зустрічному (рис. 2.2, *б*).

При послідовному з'єднанні обмоток, розташованих на різних стрижнях, висновки про отримання підвищувального і знижувального автотрансформаторів будуть протилежні попередньому випадку.



**Рис. 2.2. Отримання автотрансформатора:**

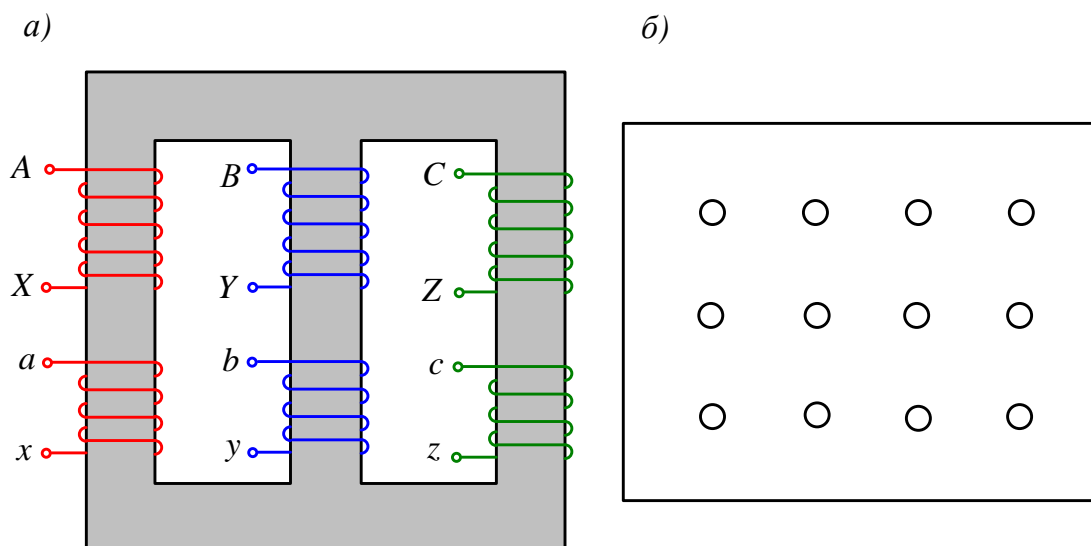
*а) – підвищувального; б) – знижувального*

## 2.2 Програма виконання практичної роботи

1. Ознайомитись з будовою практичного стенда, конструкцією випробуваного трансформатора, записати його номінальні величини і підібрати відповідні вимірювальні прилади.
2. За допомогою контрольної лампи і вольтметра зробити маркування початків і кінців усіх фаз обох обмоток трансформатора.
3. Дослідним шляхом визначити групи з'єднань обмоток трифазного трансформатора для заданих схем з'єднання обмоток ВН і НН і маркування їх початків і кінців.
4. Теоретично визначити маркування початків і кінців фаз обмоток ВН і НН для таких заданих схем і груп: У/У-8; У/У-10; У/Д-3; Д/У-1.

## 2.3 Методичні вказівки до виконання практичної роботи

1. Для випробовувань використовується трифазний двообмотковий трансформатор із тристрижневим плоскими магнітопроводом (рис. 2.3, а). Кінці всіх його обмоток виведені на похилу панель практичного стенда, причому їх маркування невідоме (рис. 2.3, б).



**Рис. 2.3. До визначення початків і кінців обмоток**

2. Маркування початків і кінців обмоток повинно виконуватись за допомогою контрольної лампи і вольтметра. Як джерело живлення потрібно використовувати мережу з лінійною напругою 220 В. Напрямок намотування всіх обмоток однаковий.

Маркування виконувати в такій послідовності:

а) за допомогою контрольної лампи знайти пари кінців усіх шести фаз обмоток ВН і НН, одночасно при цьому визначити фази, що належать обмоткам ВН і НН;

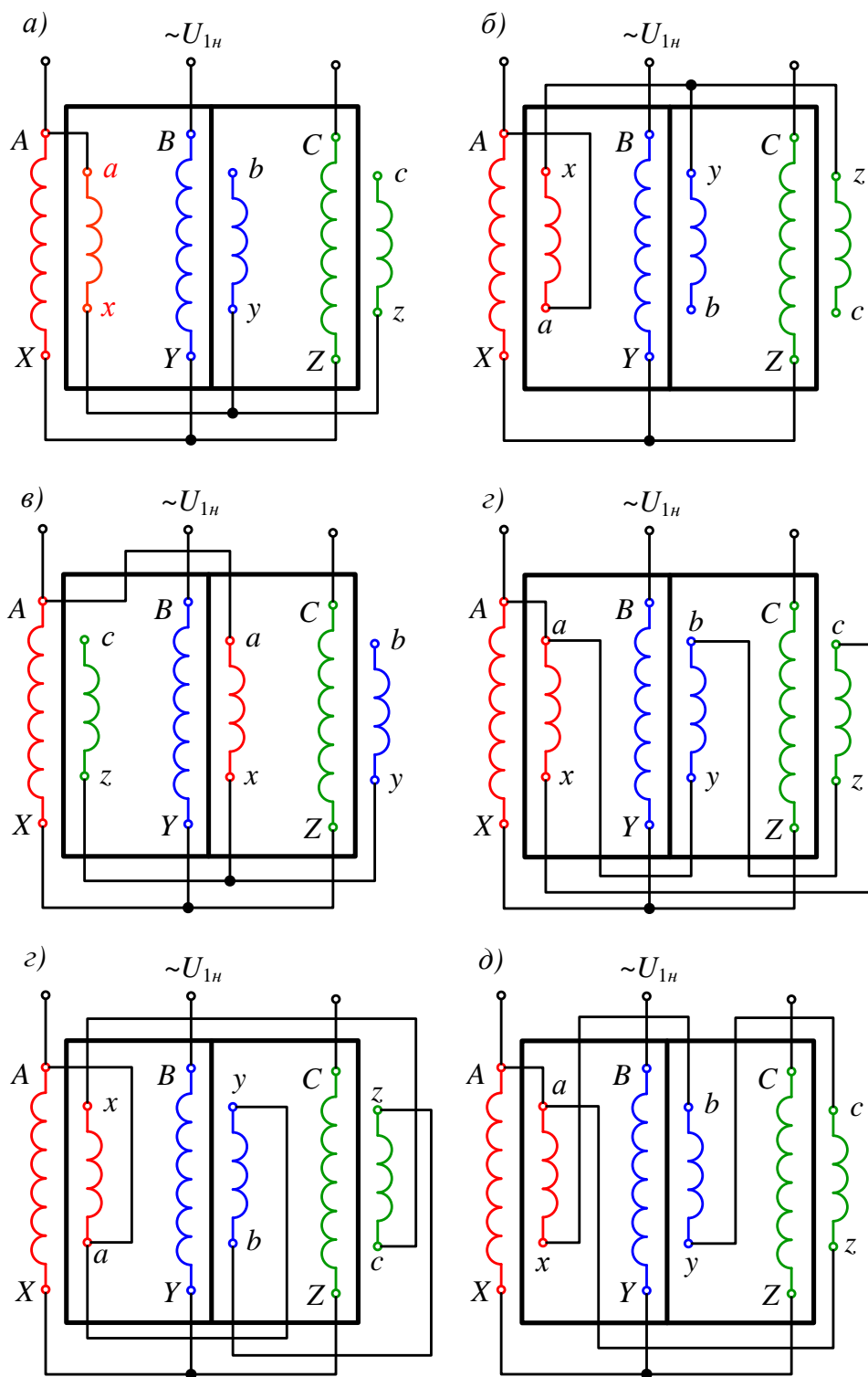
б) за допомогою вольтметра знайти фази, розташовані на середньому стрижні магнітопроводу; початок *B* та кінець *Y* обмотки ВН відмітити довільно;

в) за допомогою вольтметра виконати маркування початків і кінців фаз *A* і *C* обмотки ВН та усіх фаз обмотки НН.

Електричні схеми для маркування кінців обмоток розробити самостійно, попередньо вивчивши для цього теоретичну частину роботи і розв'язавши всі задачі.

Перед виконанням дослідів схеми повинні бути показані викладачеві і перевірені ним або лаборантом.

Усі схеми й остаточне маркування кінців обмоток повинні бути занесені до робочого протоколу випробовувань.



**Рис. 2.4. Схеми електричні принципи для визначення груп з'єднання обмоток трансформатора**

3. Схеми електричні принципи, для яких необхідно дослідним шляхом визначити відповідні їм групи з'єднань обмоток, зображені на рис. 2.4. Перша схема на рис. 2.4, а відповідає початковому маркуванню початків і кінців фаз

обмоток ВН і НН. Наступні схеми відрізняються від вихідної тим, що в них змінені маркування початків і кінців фаз обмотки НН або схема їх з'єднання. Маркування і схема з'єднання обмотки ВН залишаються незмінними в усіх випадках.

В усіх випадках на обмотку ВН подається трифазна номінальна напруга  $U_{1ном}$  і вольтметром вимірюються напруги між виводами  $B$  і  $b$ ,  $B$  і  $c$ ,  $c$  і  $C$ ,  $C$  і  $b$ . Результати вимірювань заносяться до табл. 2.1.

**Таблиця 2.1. Результати дослідів**

Схема на рис. 2Т.4	$U_{AB}$ , В	$U_{BC}$ , В	$U_{CA}$ , В	$U_{Bb}$ , В	$U_{Bc}$ , В	$U_{Cc}$ , В	$U_{Cb}$ , В	Номер групи
<i>a</i>								
<i>б</i>								
<i>в</i>								
<i>г</i>								
<i>д</i>								
<i>е</i>								

За результатами експерименту необхідно побудувати в масштабі векторні діаграми лінійних ЕРС (напруги) обмоток ВН і НН та визначити за ними номер групи для кожної схеми трансформатора.

Векторна діаграма ЕРС повинна будуватися в такий спосіб. Спочатку будують трикутник ЕРС (напруг) обмотки ВН за значеннями  $U_{AB}$ ,  $U_{BC}$ ,  $U_{CA}$ , які були виміряні. Для побудови трикутника ЕРС (напруг) обмотки НН потрібно визначити положення його вершин  $a$ ,  $b$  та  $c$ . Оскільки виводи  $A$  і  $a$  на всіх схемах електрично з'єднані, то і на векторних діаграмах ці точки повинні бути суміщені. Положення двох інших вершин  $b$  і  $c$  визначаються засічками. Наприклад, якщо з вершин  $B$  і  $C$  радіусами, рівними відповідно  $U_{Bb}$  і  $U_{Cb}$ , зробити засічки, то їх перетин дає положення точки  $b$ . Аналогічно знаходиться і положення точки  $c$ .

У звіті під кожною схемою повинна бути приведена відповідна їй векторна діаграма і зазначені схеми з'єднання обмоток і номер групи, наприклад,  $Y/Y - 6$ .

4. Теоретичне маркування початків і кінців фаз обмоток за заданими схемами їх з'єднання і номера групи повинно виконуватись на підставі векторної діаграми ЕРС, яка може бути побудована за заданим номером групи. Трикутники ЕРС обмоток ВН і НН брати таких самих розмірів, як в експерименті.

Маркування виводів обмотки ВН слід вибирати стандартне, тобто таке, як в експерименті, а для маркування виводів потрібно виходити з теоретичних положень, наведених на початку роботи. Напрямок намотування всіх фаз обмоток вважати однаковим.

У звіті повинні бути наведені векторні діаграми ЕРС для кожної групи і відповідні їм схеми, а також маркування виводів обмоток.

### Задача 2.1.

Визначити активні й індуктивні опори трифазного трансформатора, у якого  $S_{ном} = 25$  кВ·А,  $U_{1ном} = 10$  кВ,  $U_{2ном} = 0,4$  кВ, втрати холостого ходу  $P_0 = 125$  Вт, втрати короткого замикання  $P_{кз} = 690$  Вт,  $U_{к.ном\%} = 4,7\%$ ,  $I_0 = 0,032I_{1ном}$ ,  $f = 50$  Гц, з'єднання обмоток  $Y/Y_n-0$ .

*Розв'язок*

Номінальний струму первинної обмотки:

$$I_{1ном} = \frac{S_{ном}}{\sqrt{3}U_{1ном}}, \quad I_{1ном} = \frac{25}{\sqrt{3} \cdot 10} = 1,45 \text{ (А)}.$$

Коефіцієнт трансформації:

$$k = \frac{U_{1ном}}{U_{2ном}}, \quad k = \frac{10}{0,4} = 25.$$

Фазна напруга короткого замикання:

$$U_{к.ф} = \frac{U_{к.ном\%}U_{1ном}}{\sqrt{3} \cdot 100}, \quad U_{к.ф} = \frac{4,7 \cdot 10000}{\sqrt{3} \cdot 100} = 271 \text{ (В)}.$$

Повний опір короткого замикання:

$$Z_k = \frac{U_{к.ф}}{I_{1ном}}, \quad Z_k = \frac{271}{1,45} = 187 \text{ (Ом)}.$$

Активний опір короткого замикання:

$$R_{\kappa} = \frac{P_{\kappa}}{3I_{\text{ном}}^2}, \quad R_{\kappa} = \frac{690}{3 \cdot 1,45^2} = 109 \text{ (Ом)}.$$

Індуктивний опір короткого замикання:

$$X_{\kappa} = \sqrt{Z_{\kappa}^2 - R_{\kappa}^2}, \quad X_{\kappa} = \sqrt{187^2 - 109^2} = 152 \text{ (Ом)}.$$

Коефіцієнт потужності короткого замикання:

$$\cos \varphi_{\kappa} = \frac{R_{\kappa}}{Z_{\kappa}}, \quad \cos \varphi_{\kappa} = \frac{109}{187} = 0,584.$$

Активні опори первинної і приведені вторинної обмоток:

$$R_1 = R_2' = \frac{R_{\kappa}}{2}, \quad R_1 = R_2' = \frac{109}{2} = 54,5 \text{ (Ом)}.$$

Індуктивні опори первинної і приведені вторинної обмоток:

$$X_1 = X_2' = \frac{X_{\kappa}}{2}, \quad X_1 = X_2' = \frac{152}{2} = 76 \text{ (Ом)}.$$

Опори вторинної обмотки:

$$R_2 = \frac{R_2'}{k^2}, \quad R_2 = \frac{54,5}{25^2} = 0,0873 \text{ (Ом)};$$

$$X_2 = \frac{X_2'}{k^2}, \quad X_2 = \frac{76}{25^2} = 0,1215 \text{ (Ом)}.$$

Струм холостого ходу:

$$I_0 = 0,032 \cdot I_{\text{ном}}, \quad I_0 = 0,032 \cdot 1,45 = 0,0464 \text{ (А)}.$$

Опори кола намагнічування:

$$R_m = \frac{P_0}{3I_0^2}, \quad R_m = \frac{125}{3 \cdot 0,0464^2} = 19,3 \cdot 10^3 \text{ (Ом)};$$

$$Z_m = \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}I_0}, \quad Z_m = \frac{10000}{\sqrt{3} \cdot 0,0464} = 124,5 \cdot 10^3 \text{ (Ом)};$$

$$X_m = \sqrt{Z_m^2 - R_m^2},$$

$$X_m = \sqrt{(124,5 \cdot 10^3)^2 - (19,3 \cdot 10^3)^2} = 122 \cdot 10^3 \text{ (Ом)}.$$



## Контрольні питання

1. Як за допомогою контрольної лампи знайти виводи, що належать одній фазі?
2. Як знайти фази обмотки ВН і НН, розташовані на середньому стрижні магнітопроводу?
3. Як виконати маркування початків і кінців фаз обмоток ВН і НН?
4. Що таке група з'єднання обмоток трансформатора і який порядок її визначення?
5. Суть експериментального визначення номера групи з'єднання обмоток трансформатора.
6. Які групи з'єднання обмоток можна одержати при схемах з'єднання У/У; У/Д; Д/У; Д/Д.

### 2.5 Задачі для самостійного розв'язування

1. Для трифазного знижувального трансформатора з номінальною потужністю 1,5 кВ·А, номінальними напругами  $U_{1ном} = 220$  В,  $U_{2ном} = 133$  В і схемами з'єднання обмоток Д/Д розрахувати номінальні фазні струми обох обмоток і поперечні перерізи їх проводів, якщо густина струму обох обмоток однакова і дорівнює  $\Delta = 2,5$  А/мм<sup>2</sup>.

2. Для трансформатора з номінальними параметрами, наведеними в попередній задачі, визначити опір вітки намагнічування електричної схеми заміщення однієї фази при живленні його як зі сторони ВН, так і зі сторони НН, якщо відомо, що його струм холостого ходу при номінальних напругах живлення в обох випадках складає 10% номінального струму відповідної обмотки.

3. Для трифазного трансформатора, номінальні параметри якого наведені в задачі 1, визначити дійсні активні опори обмоток, якщо втрати короткого замикання трансформатора при номінальних струмах  $P_k = 285$  Вт.

4. В трифазному трансформаторі з номінальними параметрами, наведеними в задачі 1, подана номінальна напруга на фазу В обмотки ВН, розташовану на середньому стрижні магнітопровода, а всі інші фази розімкнуті. Знайти значення напруг, що виникнуть на розімкнутих фазах обмотки ВН і НН.

5. Обмотки ВН і НН середньої фази *B* трифазного трансформатора з номінальними параметрами, наведеними в задачі 1, намотані в одному напрямку і з'єднані між собою послідовно. На обмотку ВН подана номінальна напруга. Визначити сумарну напругу двох обмоток при узгодженому і зустрічному включеннях.

6. На обмотку ВН крайнього стрижня (фазу *A*) трифазного трансформатора з номінальними параметрами, наведеними в задачі 1, подана номінальна напруга. Всі інші обмотки розімкнуті. Розрахувати значення ЕРС, що наводяться у всіх розімкнутих обмотках, якщо відомо, що магнітний опір середньої фази в 2 рази менший за опір крайніх.

7. При відомому маркуванні початку і кінця середньої фази *B* обмотки ВН сформулювати правила для дослідного визначення за допомогою вольтметра початків і кінців двох інших фаз обмотки ВН, а також початків і кінців усіх фаз обмотки НН. Всі обмотки намотані в одному напрямку.

8. Для трифазного трансформатора з номінальними параметрами, наведеними в задачі 1, сформулювати правило для дослідного знаходження за допомогою вольтметра обмоток трансформатора, розташованих на середньому стрижні тристрижневого плоского магнітопроводу. Напруга мережі живлення складає 220 В.

**Практична робота №3**  
**ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАЛЕЛЬНОЇ РОБОТИ ТРИФАЗНИХ**  
**ДВООБМОТКОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ**

**Мета роботи.** Дослідити умову включення трансформаторів на паралельну роботу та дослідним шляхом з'ясувати принципи розподілу навантаження між паралельно працюючими трансформаторами за умови, що в них різні:

- коефіцієнти трансформації;
- напруги короткого замикання;
- коефіцієнти трансформації і напруги короткого замикання.

**3.1 Програма виконання практичної роботи**

1. Ознайомитись з будовою лабораторного стенда, конструкцією трансформаторів, записати їх номінальні величини та підібрати відповідні вимірювальні прилади.

2. За допомогою вольтметра визначити коефіцієнти трансформації трансформаторів.

3. Переконайтесь в рівності груп з'єднання обмоток трансформаторів.

4. Дослідити паралельну роботу трансформаторів при таких умовах:

а)  $k_I = k_{II}$  (де  $k_I$ ,  $k_{II}$  – відповідно коефіцієнти трансформації першого та другого трансформаторів) і  $U_{кI} = U_{кII}$  (де  $U_{кI}$ ,  $U_{кII}$  – відповідно напруги короткого замикання першого та другого трансформаторів);

б)  $k_I < k_{II}$  і  $U_{кI} = U_{кII}$  при активному та індуктивному характерах навантаження;

в)  $k_I = k_{II}$  і  $U_{кI} > U_{кII}$ ;

г)  $k_I < k_{II}$  і  $U_{кI} > U_{кII}$ .

У випадках а), в) та г) дослідження проводити тільки при активному навантаженні.

5. Для досліду 4, б) визначити значення струму врівноваження і порівняти його з дослідним значенням.

6. Для досвіду 4, в) розрахувати розподіл струмів навантаження між трансформаторами і порівняти його з дослідними даними.

7. За даними дослідів 4, а) – 4, г) побудувати окремо для кожного досліду залежності  $I_1$ ,  $I_{II} = f(I)$ . Теоретично розраховані залежності для випадку 4, в) сумістити з дослідними.

### 3.2 Методичні вказівки до виконання практичної роботи

1. Для випробовувань використовуються два однакових трифазних триобмотувальних сухих трансформатори з тристрижневим плоским магнітопроводом, номінальні параметри яких наведені в їх паспортних даних. Трансформатори розташовані під лабораторним стендом, а кінці їх обмоток виведені на похилу панель стенда.

Для штучної зміни коефіцієнта трансформації у вторинній обмотці другого трансформатора зроблені проміжні відпайки  $a$ ,  $b$ ,  $c$ . (рис. 3.1).

Напруга короткого замикання збільшується введенням у коло первинної обмотки першого трансформатора додаткового індуктивного опору  $X_L$ .

2. Коефіцієнти трансформації трансформаторів вимірюють у режимі холостого ходу, тобто при  $Z_n = \infty$ . Для цього при розімкненому автоматі  $QF4$  і замкненому  $QF3$  вимірюють первинні напруги:

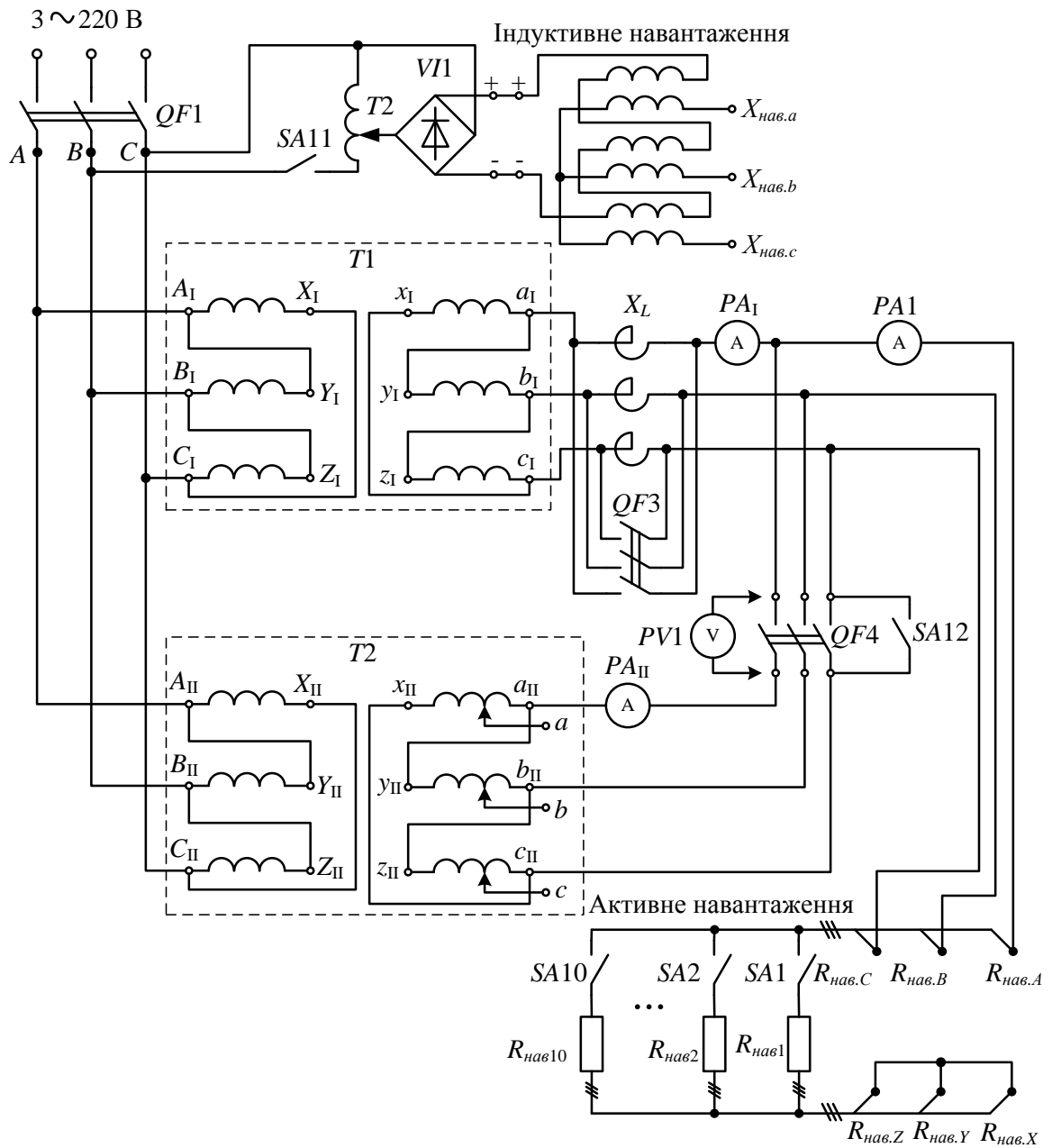
- $U_{A_1B_1}$  – лінійну між фазами  $A_1$  і  $B_1$  першого трансформатора;
- $U_{B_1C_1}$  – лінійну між фазами  $B_1$  і  $C_1$  першого трансформатора;
- $U_{C_1A_1}$  – лінійну між фазами  $C_1$  і  $A_1$  першого трансформатора

і вторинні напруги

- $U_{a_1b_1}$  – лінійну між фазами  $a_1$  і  $b_1$  першого трансформатора;
- $U_{b_1c_1}$  – лінійну між фазами  $b_1$  і  $c_1$  першого трансформатора;
- $U_{c_1a_1}$  – лінійну між фазами  $c_1$  і  $a_1$  першого трансформатора,

а також лінійні напруги між відпайками другого трансформатора  $U_{ab}$ ,  $U_{bc}$ ,  $U_{ca}$ .

Коефіцієнти трансформації визначаються за відношеннями середніх значень лінійної напруги:



**Рис. 3.1. Схема електрична принципова  
включення трансформаторів на паралельну роботу**

$$k_I = \frac{U_{A_I B_I} + U_{B_I C_I} + U_{C_I A_I}}{U_{a_I b_I} + U_{b_I c_I} + U_{c_I a_I}}, \quad (3.1)$$

$$k_{II} = \frac{U_{A_{II} B_{II}} + U_{B_{II} C_{II}} + U_{C_{II} A_{II}}}{U_{a_{II} b_{II}} + U_{b_{II} c_{II}} + U_{c_{II} a_{II}}}, \quad (3.2)$$

$$k'_{II} = \frac{U_{A_I B_I} + U_{B_I C_I} + U_{C_I A_I}}{U_{ab} + U_{bc} + U_{ca}}, \quad (3.3)$$

де  $k'_{II}$  – коефіцієнт трансформації другого трансформатора на відпайках  $a, b, c$ .

3. Трансформатори, що включаються на паралельну роботу, повинні мати однакові групи з'єднання обмоток. Для цього різниця напруг між однойменними виводами вторинних обмоток трансформаторів повинна дорівнювати нулю.

Для того, щоб переконатися в рівності груп, необхідно вольтметром  $PVI$  виміряти напругу  $U_{b_I b_{II}}$  і  $U_{c_I c_{II}}$  (при замкнутому тумблері  $SA4$ ). Якщо ці напруги дорівнюють нулю, то групи з'єднання обмоток однакові.

4. Трансформатори мають однакові коефіцієнти трансформації ( $k_I = k_{II}$ ), якщо другий трансформатор працює на відпайках  $a_{II}, b_{II}, c_{II}$ . При роботі на відпайках  $a, b, c$   $k'_{II} > k_{II}$ , а отже,  $k_I < k_{II}$ .

При зашунтованому автоматом  $QF3$  додатковому опорі обидва трансформатори мають однакові напруги короткого замикання  $U_{кI} = U_{кII}$ . При включеному  $X_L$  (автомат  $QF3$  виключений) перший трансформатор має підвищене значення  $U_{кI}$ .

Трансформатори включаються на паралельну роботу автоматом  $QF4$ . При цьому в кожному досліді необхідно вимірювати струми врівноваження, що можна зробити в режимі холостого ходу.

Після цього збільшують струм навантаження до номінального значення та експериментально визначають розподіл струмів по кожному з трансформаторів. Результати вимірювань заносять до табл. 3.1.

5. Струм врівноваження струм для досліду 4, б) потрібно розраховувати відповідно до теорії, викладеної в п. 1.2.3. У звіті подати дослідні та розрахункові значення цих струмів.

6. Розподіл навантажувальних струмів трансформаторів при різних значеннях їх напруги короткого замикання можна визначити з рівнянь

$$I_I = \frac{U_{кII}}{U_{кI} + U_{кII}} I, \quad (3.4)$$

$$I_{II} = \frac{U_{кI}}{U_{кI} + U_{кII}} I,$$

де  $I$  – сумарний струм навантаження, значення якого вибираються довільно в діапазоні  $0 \dots I_{ном}$ .

У звіті слід навести виведення виразів, використаних раніше для розрахунку струмів трансформаторів.

**Таблиця 3.1. Результати дослідів**

Струм, А	1	2	3	4	5	6	7	8	Примітки
$I_I$									$k_I = k_{II}$ $U_{кI} = U_{кII}$
$I_{II}$									
$I$									
$I_I$									$k_I < k_{II}$ $U_{кI} = U_{кII}$ $Z_H = R_H$
$I_{II}$									
$I$									
$I_I$									$k_I < k_{II}$ $U_{кI} = U_{кII}$ $Z_H = jX_H$
$I_{II}$									
$I$									
$I_I$									$k_I = k_{II}$ $U_{кI} > U_{кII}$
$I_{II}$									
$I$									
$I_I$									$k_I < k_{II}$ $U_{кI} > U_{кII}$
$I_{II}$									
$I$									

7. Окремо для кожного дослідів побудувати залежності  $I_I$ ,  $I_{II} = f(I)$ . Для випадку 4, в) теоретично розраховані залежності сумістити з дослідними.

### Задача 3.1.

Три трифазних трансформатори з однаковими групами з'єднань паралельно працюють на спільне навантаження  $S_{\Sigma} = 5000$  кВ·А. Трансформатори мають

такі дані:  $S_{I\text{ном}} = 1000 \text{ кВ}\cdot\text{А}$ ,  $U_{кI\text{ном}\%} = 6,5\%$ ;  $S_{II\text{ном}} = 1800 \text{ кВ}\cdot\text{А}$ ,  $U_{кII\text{ном}\%} = 6,65\%$ ;  $S_{III\text{ном}} = 2200 \text{ кВ}\cdot\text{А}$ ,  $U_{кIII\text{ном}\%} = 6,3\%$ . Визначити навантаження кожного з трансформаторів.

*Розв'язок.*

Розподіл навантаження між  $b$  трансформаторами, що паралельно працюють, визначимо як:

$$S_v = \frac{S_{\Sigma} S_{v\text{ном}}}{U_{кv\text{ном}\%} \cdot \sum_{v=1}^b \frac{S_{v\text{ном}}}{U_{кv\text{ном}\%}}}, \quad v = \overline{1, b},$$

де  $S_{v\text{ном}}$  – навантаження одного з трансформаторів, що працює паралельно;  $U_{кv\text{ном}\%}$  – напруга короткого замикання одного з трансформаторів, що працює паралельно.

Таким чином, навантаження кожного з трансформаторів:

$$S_1 = \frac{5000 \cdot 1000}{6,5 \cdot \left( \frac{1000}{6,5} + \frac{1800}{6,65} + \frac{2200}{6,3} \right)} = 994,2 \text{ (кВ}\cdot\text{А)};$$

$$S_2 = \frac{5000 \cdot 1800}{6,65 \cdot \left( \frac{1000}{6,5} + \frac{1800}{6,65} + \frac{2200}{6,3} \right)} = 1749,2 \text{ (кВ}\cdot\text{А)};$$

$$S_3 = \frac{5000 \cdot 2200}{6,3 \cdot \left( \frac{1000}{6,5} + \frac{1800}{6,65} + \frac{2200}{6,3} \right)} = 2256,6 \text{ (кВ}\cdot\text{А)}.$$

Порівнявши отримане навантаження кожного з трансформаторів із його номінальним навантаженням бачимо, що третій трансформатор є перевантаженим ( $S_3 > S_{3\text{ном}}$ ) на

$$\frac{2256,6 - 2200}{2200} \cdot 100 = 2,6\%.$$

Для усунення цього перевантаження потрібно знизити зовнішнє навантаження трансформаторів на 2,6%, тобто зменшити його до:



$$S_{\Sigma(y)} = S_{\Sigma} - S_{\Sigma} \cdot \frac{2,6}{100},$$

$$S_{\Sigma(y)} = 5000 - 5000 \cdot \frac{2,6}{100} = 4870 \text{ (кВ} \cdot \text{А)}.$$

### Контрольні питання

1. Переваги паралельної роботи трансформаторів.
2. Умови включення трансформаторів на паралельну роботу.
3. Чому неможлива паралельна робота при різних групах з'єднання обмоток?
4. Як експериментально перевірити рівність груп з'єднання обмоток?
5. Явища, що виникають при паралельній роботі трансформаторів з різними коефіцієнтами трансформації на холостому ході та при різних характерах навантаження. Розрахунок струму врівноваження.
6. Розподіл струмів навантаження при паралельній роботі трансформаторів з різними напругами короткого замикання.

### 3.4 Задачі для самостійного розв'язування

Є два трансформатори з однаковими номінальними потужностями  $S_{I \text{ ном}} = S_{II \text{ ном}} = 1,5 \text{ кВ} \cdot \text{А}$  і номінальними первинними напругами  $U_{I \text{ ном}} = U_{II \text{ ном}} = 220 \text{ В}$ . Первинні і вторинні обмотки обох трансформаторів з'єднані в трикутник.

Для цих трансформаторів, включених на паралельну роботу, потрібно:

1. Розрахувати значення струмів врівноваження, що протікають у первинних і вторинних обмотках трансформаторів, якщо вони працюють без навантаження при однакових значеннях напруги короткого замикання  $U_{кI} = U_{кII} = 4,3\%$ , однакових групах з'єднання обмоток і таких значеннях коефіцієнтів трансформації:  $k_I = 1,65$ ;  $k_{II} = 1,69$ .

2. При умовах попередньої задачі визначити значення напруги, яка встановиться на вторинних шинах трансформаторів.

3. Використовуючи умови, наведені в задачі 1 і нехтуючи активними складовими напруги короткого замикання, розрахувати вторинні струми

трансформаторів, якщо на вторинні шини включений споживач з еквівалентним навантажувальним опором однієї фази:

а)  $Z_n = R_n = 17 \text{ Ом};$

б)  $Z_n = jX_n = j17 \text{ Ом};$

в)  $Z_n = -jX_n = -j17 \text{ Ом}.$

Опори навантаження з'єднані в трикутник.

4. Розрахувати усталені значення струмів врівноваження обох обмоток трансформаторів, що мають однакові значення напруг короткого замикання  $U_{кІ} = U_{кІІ} = 4,3\%$  та коефіцієнти трансформації  $k_I = k_{II} = 1,65$  і включених на паралельну роботу з різницею в номерах груп з'єднання обмоток:

а) у дві групи;

б) у чотири групи;

в) у шість груп.

5. Розрахувати пік навантаження кожного з трансформаторів, включених на паралельну роботу, якщо вони мають однакові коефіцієнти трансформації  $k_I = k_{II} = 1,65$  і групи з'єднання обмоток, але різні напруги короткого замикання:  $U_{кІ} = 5,3\%$ ,  $U_{кІІ} = 4,3\%$ . Повний струм, який віддається обома трансформаторами в навантаження, дорівнює 10 А.

6. Використовуючи умову попередньої задачі, знайти найбільші значення потужностей, якими можуть бути завантажені трансформатори.

## Практична робота №4

### ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИОБМОТКОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

**Мета роботи.** Ознайомитись з будовою триобмоткового трансформатора; освоїти практичні прийоми лабораторного дослідження триобмоткових трансформаторів за допомогою дослідів холостого ходу та короткого замикання.

#### 4.1 Короткі теоретичні відомості

За аналогією з двообмотковим трансформатором для розрахунку зовнішніх характеристик використовуються поняття зміни напруги кожної із вторинних обмоток:

$$\begin{aligned}\Delta U'_{12} &= U_1 - U'_2 = \\ &= I'_2(R_{12\kappa} \cos \varphi_2 + X_{12\kappa} \sin \varphi_2) + I'_3(R_1 \cos \varphi_3 + X_1 \sin \varphi_3),\end{aligned}\quad (4.1)$$

$$\begin{aligned}\Delta U'_{13} &= U_1 - U'_3 = \\ &= I'_3(R_{13\kappa} \cos \varphi_3 + X_{13\kappa} \sin \varphi_3) + I'_2(R_1 \cos \varphi_2 + X_1 \sin \varphi_2),\end{aligned}\quad (4.2)$$

де  $\Delta U'_{12}$ ,  $\Delta U'_{13}$  – спади напруг в другій і третій обмотках триобмоткового трансформатора, відповідно;

$R_{12\kappa}$ ,  $R_{13\kappa}$  – активні опори короткого замикання першої і другої обмоток та першої і третьої обмоток, відповідно;

$X_{12\kappa}$ ,  $X_{13\kappa}$  – реактивні опори короткого замикання першої і другої обмоток та першої і третьої обмоток, відповідно,

$$R_{12\kappa} = R_1 + R'_2; \quad (4.3)$$

$$R_{13\kappa} = R_1 + R'_3; \quad (4.4)$$

$$X_{12\kappa} = X_1 + X'_2; \quad (4.5)$$

$$X_{13\kappa} = X_1 + X'_3, \quad (4.6)$$

де  $R'_3$ ,  $X'_3$  – відповідно активний та реактивний опори третьої обмотки, приведених до первинної.

Тоді приведені напруги обмоток

$$U'_2 = U_1 - \Delta U'_{12}, \quad (4.7)$$

$$U'_3 = U_1 - \Delta U'_{13}. \quad (4.8)$$

ККД триобмоткового трансформатора [18]:

$$\eta = \frac{P_2 + P_3}{P_1} = \frac{P_1 - \Delta p_{\Sigma}}{P_1} =$$

$$= 1 - \frac{\Delta p_{\text{пост}} + \Delta p_{\text{зм}}}{\beta_2 S_{2\text{ном}2} \cos \varphi_2 + \beta_3 S_{2\text{ном}3} \cos \varphi_3 + \Delta p_{\text{пост}} + \Delta p_{\text{зм}}}, \quad (4.9)$$

де  $\beta_2, \beta_3$  – коефіцієнти навантаження другої та третьої обмоток, відповідно:

$$\beta_2 = \frac{I_2}{I_{2\text{ном}}}, \quad (4.10)$$

$$\beta_3 = \frac{I_3}{I_{3\text{ном}}}, \quad (4.11)$$

де  $I_{3\text{ном}}$  – номінальний струм третьої обмотки;

$S_{2\text{ном}2}, S_{2\text{ном}3}$  – номінальні потужності другої та третьої обмоток, відповідно.

Змінні втрати для триобмоткового трансформатора [18]:

$$\Delta p_{\text{зм}} = 3\beta_1 I_{1\text{ном}}^2 R_1 + 3I_{2\text{ном}}'^2 R_2' + 3I_{3\text{ном}}'^2 R_3'. \quad (4.12)$$

## 4.2 Програма виконання практичної роботи

1. Ознайомитись з будовою практичного стенда, конструкцією трансформатора, записати його номінальні величини і підібрати відповідні вимірювальні прилади.
2. Провести розрахунок холостого ходу трансформатора.
3. Виконати розрахунок короткого замикання трансформатора.
4. Провести контрольний розрахунок короткого замикання.
5. Провести дослід номінального навантаження трансформатора при коефіцієнті потужності другої обмотки  $\cos \varphi_2 = 1$  і коефіцієнті потужності третьої обмотки  $\cos \varphi_3 = 0$  (індуктивний характер).

6. За даними розрахунку холостого ходу розрахувати коефіцієнти трансформації обмоток, постійні втрати і струм холостого ходу, а також параметри вітки намагнічування електричної схеми заміщення.

7. За даними розрахунків короткого замикання визначити всі параметри обмоток і значення напруг короткого замикання:

- $U_{\kappa 12}$  – першої і другої обмоток;
- $U_{\kappa 13}$  – першої і третьої обмоток;
- $U_{\kappa 23}$  – другої і третьої обмоток.

8. Використовуючи знайдені параметри обмоток, розрахувати вихідні напруги обмоток для тих самих параметрів навантаження, що й у досліді п.5. Розрахункові значення порівняти з дослідними. Розрахувати номінальне значення ККД трансформатора.

#### 4.3 Методичні вказівки до виконання практичної роботи

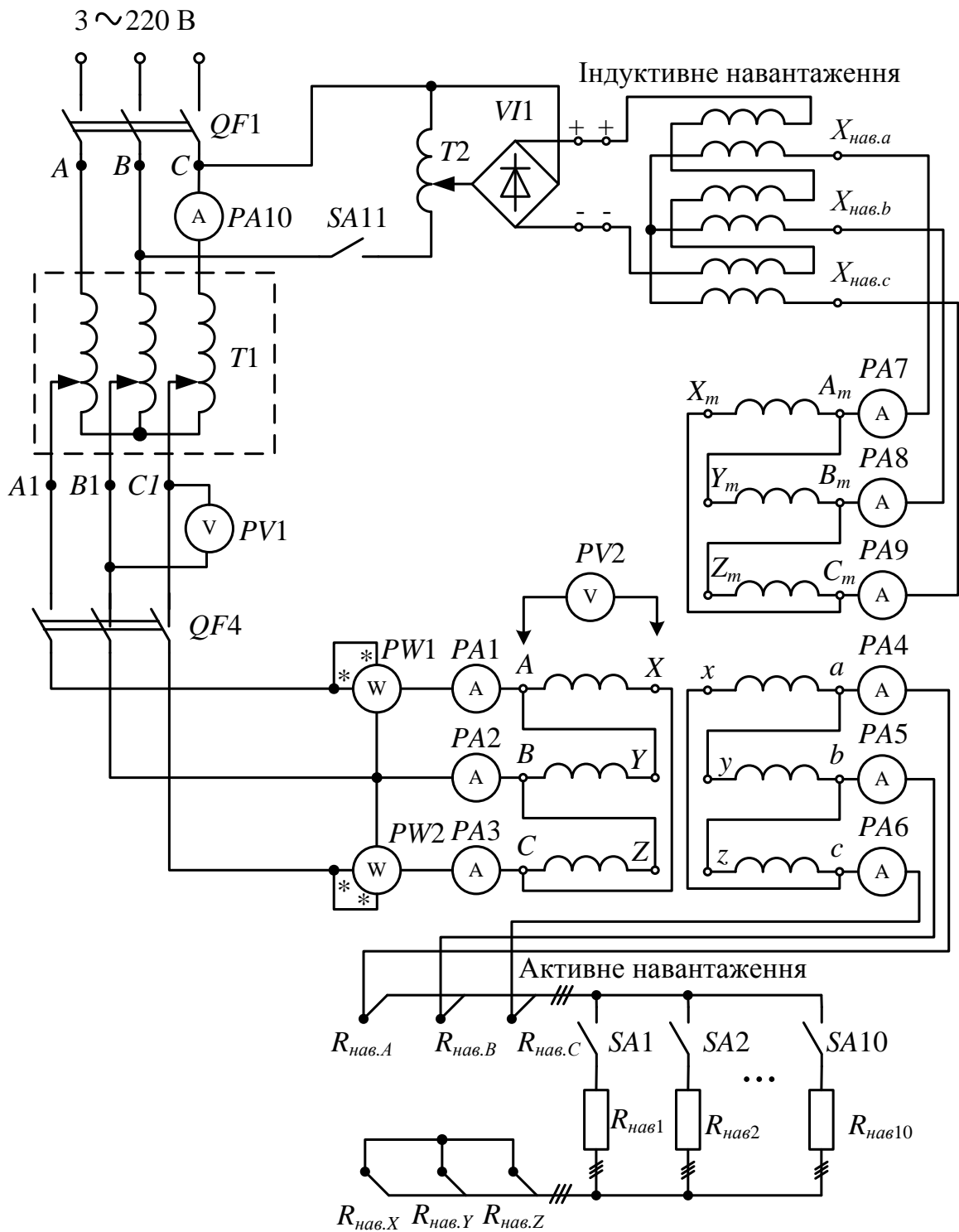
1. Для випробовувань використовується трифазний сухий триобмотковий трансформатор із плоским тристрижневим магнітопроводом. Кінці всіх його обмоток виведені на похилу панель лабораторного стенда. Номінальні параметри трансформатора наведені на стенді. Відповідно до них потрібно підібрати вимірювальні прилади.

Схема електрична принципова для дослідження показана на рис. 4.1.

2. Дослід холостого ходу слід виконувати при номінальній напрузі, яка підводиться до первинної обмотки, і розімкнутих вторинних обмотках, тобто  $I_2 = I_3 = 0$ . Межі вимірювання всіх приладів повинні відповідати очікуваним значенням напруги і струмів.

Необхідно виміряти такі величини:

- $U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}$  (значення яких повинні бути рівні);
- $U_{1ном}, I_{10A}, I_{10B}, I_{10C}$ ;
- $P'_0, P''_0$ ;
- $U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}$ ;
- $U_{AmBm}, U_{BmCm}, U_{CmAм}$ .



**Рис. 4.1. Схема електрична принципова проведення дослідів**

В триобмотковому трансформаторі проводять три досліді короткого замикання:

1. При розімкнутій обмотці 3 (СН) і замкнутій накоротко обмотці 2 (НН) подають на обмотку 1 (ВН) таку напругу  $U_{к12}$ , яка викликає в первинній

обмотці протікання номінального струму. Необхідно пам'ятати, що  $U_{к12} \ll U_{1ном}$ . Тому перед включенням автомата  $QF4$  необхідно установити за допомогою регулятора РНТ Т1 напругу  $U_1 \approx 0$ . Попередньо межі вимірювань приладів потрібно узгодити з очікуваними значеннями струмів і напруги.

Вимірити такі величини:

- $U_{к.АВ}, U_{к.ВС}, U_{к.СА}$ ;
- $I_{кА}, I_{кВ}, I_{кС}$ ;
- $P'_{\hat{e}}, P''_{\hat{e}}$ .

2. При розімкнутій обмотці 2 і замкнутій накоротко обмотці 3 подають на обмотку 1 таку напругу  $U_{к13}$ , яка викличе струм  $I_{1ном}$ . Дослід повинен проводитись аналогічно до попереднього і вимірювати потрібно ті ж величини.

3. При розімкнутій обмотці 1 і замкнутій накоротко обмотці 3 подають на обмотку 2 таку напругу  $U_{к23}$ , яка викличе в обмотці 2 протікання номінального струму  $I_{2к} = I_{2ном}$ . Дослід проводиться аналогічно до двох попередніх. Вимірюють такі величини:

- $U_{каб}, U_{кbc}, U_{кca}$ ;
- $I_{ка}, I_{кb}, I_{кc}$ ;
- $P'_{\hat{e}}, P''_{\hat{e}}$ .

4. Контрольний розрахунок короткого замикання проводиться при замкнутих накоротко обмотках 2 і 3 одночасно та при напрузі  $U_{к123}$ , яка викликає номінальний струм у первинній обмотці. Вимірюють такі величини:

- $U_{к.АВ}, U_{к.ВС}, U_{к.СА}$ ;
- $I_{кА}, I_{кВ}, I_{кС}$ ;
- $P'_{\hat{e}}, P''_{\hat{e}}$ .

5. Для проведення розрахунку номінального навантаження трансформатора необхідно в коло обмотки 2 включити активне навантаження  $R_n$ , а в коло обмотки 3 – індуктивну  $X_n$ , з'єднавши їх фази в трикутник і включивши в їх середні фази амперметри для вимірювання лінійних струмів навантаження.

До первинної обмотки підвести номінальну напругу і завантажити всі обмотки номінальними струмами. Виміряти такі величини:

- $U_{АВ}, U_{ВС}, U_{СА}$ ;
- $I_A, I_B, I_C$ ;

- $P', P''$ ;
- $U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}$ ;
- $I_{2ном}, I_{3ном}$ ;
- $U_{AmBm}, U_{BmCm}, U_{CmAм}$ .

6. Коефіцієнти трансформації, магнітні (постійні) втрати, струм холостого ходу і його активну та реактивну складові (у відсотках від номінального значення струму), а також параметри вітки намагнічування потрібно розраховувати відповідно до електричної схеми заміщення і теорії трансформатора.

Коефіцієнти трансформації і параметри схеми заміщення повинні бути визначені для однієї фази.

7. Для кожного з трьох дослідів короткого замикання може бути отримана електрична схема заміщення, яка складається з послідовно з'єднаних опорів двох обмоток, що беруть участь у досліді. Струмом намагнічування в цьому режимі нехтують.

Тоді сумарні опори відповідних пар обмоток можуть бути знайдені за результатами дослідів з таких виразів [18]:

$$\left\{ \begin{array}{l} Z_{\kappa 12} = \frac{U_{\kappa 12\phi}}{I_{1\phi ном}}; \\ R_{\kappa 12} = \frac{P_{\kappa 12}}{I_{1\phi ном}^2}; \\ X_{\kappa 12} = \sqrt{Z_{\kappa 12}^2 - R_{\kappa 12}^2}, \end{array} \right. \quad (4.13)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Z_{\kappa 13} = \frac{U_{\kappa 13\phi}}{I_{1\phi ном}}; \\ R_{\kappa 13} = \frac{P_{\kappa 13}}{I_{1\phi ном}^2}; \\ X_{\kappa 13} = \sqrt{Z_{\kappa 13}^2 - R_{\kappa 13}^2}, \end{array} \right. \quad (4.14)$$



$$\begin{cases} Z'_{к23} = \frac{U'_{к23\phi}}{I'_{2\phiном}}; \\ R'_{к23} = \frac{P_{к23}}{I'^2_{2\phiном}}; \\ X'_{к23} = \sqrt{Z'^2_{к23} - R'^2_{к23}}, \end{cases} \quad (4.15)$$

де усі величини повинні відповідати одній фазі трансформатора і для визначення яких потрібно врахувати схеми з'єднання обмоток і значення величин, що вимірюються (фазні чи лінійні).

Напруги  $U_{к12}$ ,  $U_{к13}$  визначаються як середні з трьох напруг відповідних дослідів:

$$U_{к12}(U_{к13}) = \frac{U_{кAB} + U_{кBC} + U_{кCA}}{3}. \quad (4.16)$$

У третьому розрахунку короткого замикання вимірюють дійсні значення напруги і струмів обмотки 2, а для знаходження приведених параметрів вони повинні бути приведені до обмотки 1. Тоді

$$U'_{к23} = k_{12}U_{к23}, \quad (4.17)$$

$$I'_{к23} = \frac{I_{2ном}}{k_{12}}. \quad (4.18)$$

Зі схем заміщення при короткому замиканні випливає, що

$$R'_{к23} = R'_2 + R'_3, \quad (4.19)$$

$$X'_{к23} = X'_2 + X'_3. \quad (4.20)$$

Для кожного з опорів є три рівняння і три невідомих опори обмоток, які можна знайти, розв'язавши ці рівняння:

$$R_1 = 0,5(R_{к12} + R_{к13} + R'_{к23}); \quad (4.21)$$

$$R'_2 = 0,5(R_{к12} + R'_{к23} - R_{к13}); \quad (4.22)$$

$$R'_3 = 0,5(R_{к13} + R'_{к23} - R_{к12}); \quad (4.23)$$

$$X_1 = 0,5(X_{\kappa 12} + X_{\kappa 13} - X'_{\kappa 23}); \quad (4.24)$$

$$X'_2 = 0,5(X_{\kappa 12} + X'_{\kappa 23} - X_{\kappa 13}); \quad (4.25)$$

$$X'_3 = 0,5(X_{\kappa 13} + X'_{\kappa 23} - X_{\kappa 12}); \quad (4.26)$$

$$Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_1^2}; \quad (4.27)$$

$$Z'_2 = \sqrt{R_2'^2 + X_2'^2}; \quad (4.28)$$

$$Z'_3 = \sqrt{R_3'^2 + X_3'^2}. \quad (4.29)$$

Якщо всі розрахунки проведені правильно, то всі значення активних опорів повинні бути додатними. Індуктивний опір середньої обмотки повинен мати мінімальне (з трьох) значення і навіть може бути від'ємним.

За параметрами короткого замикання визначають опори

$$X_{\kappa 123} = \frac{U_{\kappa 123\phi}}{I_{1\phi.\text{ном}}}; \quad (4.30)$$

$$R_{\kappa 123} = \frac{P_{\kappa 123}}{I_{1\phi.\text{ном}}^2}; \quad (4.31)$$

$$X_{\kappa 123} = \sqrt{Z_{\kappa 123}^2 - R_{\kappa 123}^2}. \quad (4.32)$$

Відповідно до схеми заміщення для цього розрахунку при  $I_0 \approx 0$  її еквівалентний опір

$$\begin{aligned} Z_{\text{екв}} &= Z_1 + \frac{Z'_2 Z'_3}{Z'_2 + Z'_3} = \\ &= R_1 + jX_1 + \frac{(R'_2 + jX'_2)(R'_3 + jX'_3)}{(R'_2 + jX'_2) + (R'_3 + jX'_3)} = \\ &= R_{\text{екв}} + jX_{\text{екв}}. \end{aligned} \quad (4.33)$$

При правильно визначених параметрах схеми заміщення повинні дотримуватися рівності  $R_{\text{екв}} = R_{\kappa 123}$ ;  $X_{\text{екв}} = X_{\kappa 123}$ ;  $Z_{\text{екв}} = Z_{\kappa 123}$ .

За даними перших трьох розрахунків короткого замикання потрібно розрахувати процентні значення напруги короткого замикання для відповідних пар обмоток:

$$\begin{cases} U_{к12} \% = \frac{U_{к12}}{U_{1ном}} \cdot 100; \\ U_{к13} \% = \frac{U_{к13}}{U_{1ном}} \cdot 100; \\ U_{к23} \% = \frac{U_{к23}}{U_{1ном}} \cdot 100. \end{cases} \quad (4.34)$$

8. Вихідні напруги обмоток при номінальному навантаженні потрібно розраховувати з використанням значень  $\Delta U'_{12}$  і  $\Delta U'_{13}$ , які можна визначити, знаючи параметри обмоток і навантаження. Розраховані значення напруги порівняти з дослідними, для чого знайти їх фазні значення.

Розрахунок ККД виконувати з використанням дослідних параметрів трансформатора.

#### **Задача 4.1.**

Трифазний трансформатор має такі паспортні дані:  $f = 50$  Гц;  $U_{1ном} = 10$  кВ;  $U_{2ном} = 0,4$  кВ;  $P_0 = 1080$  Вт;  $P_{кз} = 5900$  Вт;  $U_{к.ном\%} = 4,7\%$ ;  $U_{к.ном} = 0,045U_{1ном}$ ; номінальний ККД  $\eta_{ном} = 98,4\%$ . Схема з'єднання обмоток – У/Д.

Визначити: фазні напруги трансформатора, лінійні і фазні коефіцієнти трансформації; номінальні струми обмоток; напругу вторинної обмотки і ККД при  $\cos\phi_{ном} = 0,95$  і  $0,7$ .

*Розв'язок*

Номінальна фазна напруга первинної обмотки:

$$U_{1ф.ном} = \frac{U_{1ном}}{\sqrt{3}}, \quad U_{1ф.ном} = \frac{10}{\sqrt{3}} = 5,78 \text{ (кВ)}.$$

Номінальна фазна напруга вторинної обмотки:

$$U_{2ф.ном} = U_{2л.ном}, \quad U_{2ф.ном} = 0,4 \text{ (кВ)}.$$

Лінійний коефіцієнт трансформації:

$$k = \frac{U_{1ном}}{U_{2ном}}, \quad k = \frac{10}{0,4} = 25.$$

Фазний коефіцієнт трансформації:

$$k_{\phi} = \frac{U_{1\phi.\text{ном}}}{U_{2\phi.\text{ном}}}, \quad k_{\phi} = \frac{5,78}{0,4} = 14,43.$$

Номинальні лінійні струми:

$$I_{1\text{ном}} = \frac{S_{\text{ном}}}{\sqrt{3}U_{1\text{ном}}}, \quad I_{1\text{ном}} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 10} = 23,1 \text{ (A)};$$

$$I_{2\text{ном}} = \frac{S_{\text{ном}}}{\sqrt{3}U_{2\text{ном}}}, \quad I_{2\text{ном}} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 578 \text{ (A)}.$$

Активна і реактивна складові напруги короткого замикання:

$$U_{\text{к.а.ном}} \% = \frac{100\Delta p_{\text{кз}}}{S_{\text{ном}}}, \quad U_{\text{к.а.ном}} \% = \frac{100 \cdot 5,9}{400} = 1,475\%;$$

$$U_{\text{к.р.ном}} \% = \sqrt{U_{\text{к.ном}}^2 \% - U_{\text{к.р.ном}}^2 \%},$$

$$U_{\text{к.р.ном}} \% = \sqrt{4,5^2 - 1,475^2} = 4,29\%.$$

Для  $\beta = 0,8$  і  $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,95$  спад вторинної напруги:

$$\Delta U_{2\%} = \beta (U_{\text{к.а.ном}} \% \cos \varphi_{\text{ном}} + U_{\text{к.р.ном}} \% \sin \varphi_{\text{ном}}),$$

$$\Delta U_{2\%} = 0,8 \cdot (1,475 \cdot \cos 0,95 + 4,29 \cdot \sin 0,95) = 2,45\%$$

або в вольтах

$$\Delta U_2 = \frac{\Delta U_{2\%} U_{2\text{ном}}}{100}, \quad \Delta U_2 = \frac{2,45 \cdot 400}{100} = 9,8 \text{ (В)}.$$

Вторинна напруга при  $\beta = 0,8$  і  $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,95$ :

$$U_2 = U_{2\text{ном}} - \Delta U_2, \quad U_2 = 400 - 9,8 = 390,2 \text{ (В)}.$$

ККД трансформатора при  $\beta = 0,8$  і  $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,95$ :

$$\eta_{0,95} = \frac{\beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_{\text{ном}}}{\beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_{\text{ном}} + P_0 + \beta^2 P_{\text{к}}},$$

$$\eta_{0,95} = \frac{0,8 \cdot 400 \cdot \cos 0,95}{0,8 \cdot 400 \cdot \cos 0,95 + 1,08 + 0,8^2 \cdot 5,9} = 0,984.$$

Для  $\beta = 0,8$  і  $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,7$  спад вторинної напруги:

$$\Delta U_{2\%} = 0,8 \cdot (1,475 \cdot \cos 0,7 + 4,29 \cdot \sin 0,7) = 3,25\%$$

або в вольтах

$$\Delta U_2 = \frac{3,25 \cdot 400}{100} = 13 \text{ (В)}.$$

Вторинна напруга при  $\beta = 0,8$  і  $\cos \varphi_{ном} = 0,7$ :

$$U_2 = 400 - 13 = 387 \text{ (В)}.$$

ККД трансформатора при  $\beta = 0,8$  і  $\cos \varphi_{ном} = 0,7$ :

$$\eta_{0,7} = \frac{0,8 \cdot 400 \cdot \cos 0,7}{0,8 \cdot 400 \cdot \cos 0,7 + 1,08 + 0,8^2 \cdot 5,9} = 0,978.$$

### Контрольні питання

1. Будова та область застосування триобмоткового трансформатора.
2. Основні рівняння, електрична схема заміщення триобмоткового трансформатора та фізичний зміст її параметрів.
3. Методика проведення і призначення дослідів холостого ходу трансформатора.
4. Методика проведення і призначення дослідів короткого замикання трансформатора.
5. Суть і призначення контрольних дослідів короткого замикання.
6. Суть взаємного впливу вторинних обмоток і спосіб його зменшення.
7. Методика розрахунку вторинної напруги трансформатора.

### 4.5 Задачі для самостійного розв'язування

Трифазний триобмотковий трансформатор має такі номінальні параметри:  $S_{1ном} = S_{2ном} = S_{3ном} = 1,5 \text{ кВ}\cdot\text{А}$ ;  $U_{1ном} = 220 \text{ В}$ , всі обмотки з'єднані трикутником.

Для цього трансформатора потрібно:

1) визначити номінальні фазні і лінійні струми та напруги всіх обмоток і коефіцієнти їх трансформації;

2) розрахувати втрати і струм холостого ходу трансформатора, якщо він у цьому режимі живиться номінальною напругою зі сторони обмотки ВН, опір якої  $R_1 = 1,8 \text{ Ом}$ , а опори вітки намагнічування електричної схеми заміщення однієї фази  $R_0 = 38 \text{ Ом}$ ,  $X_0 = 134 \text{ Ом}$ . Розрахувати також магнітні втрати,

коефіцієнт потужності, повну, активну та реактивну потужності, що споживаються;

3) визначити активні та індуктивні опори всіх трьох обмоток електричної схеми заміщення трансформатора, якщо в результаті проведення трьох дослідів короткого замикання отримано такі результати:

$$U_{к12} = 12,5 \text{ В}; \quad I_{к12} = 4 \text{ А}; \quad P_{к12} = 74 \text{ Вт};$$

$$U_{к13} = 15 \text{ В}; \quad I_{к13} = 4 \text{ А}; \quad P_{к13} = 82 \text{ Вт};$$

$$U_{к23} = 8 \text{ В}; \quad I_{к23} = 6,5 \text{ А}; \quad P_{к23} = 93 \text{ Вт}.$$

В кожному досліді вимірювались дійсні значення лінійних напруг та струмів і сумарних потужностей трьох фаз;

4) використовуючи результати розв'язку попередніх задач, обчислити ККД трансформатора в номінальному режимі його роботи;

5) використовуючи результати розв'язку задачі, розрахувати вихідні лінійні напруги обох вторинних обмоток трансформатора при номінальній первинній напрузі і номінальних струмах обмоток при  $\cos\varphi_2 = 0,8$  і  $\cos\varphi_3 = 0,6$ .

**Практична робота №5**  
**ДОСЛІДЖЕННЯ ОБЕРТОВОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ АМ.**  
**ВИЗНАЧЕННЯ ВТРАТ ТА ККД АД**

**Мета роботи.** Ознайомитись з конструкцією, принципом дії та основними характеристиками АМ, оволодіти методиками визначення початків і кінців її обмоток.

Освоїти методику визначення втрат потужностей та ККД трифазною АД.

**5.1 Програма практичної роботи**

1. Ознайомитися з будовою практичного стенду, конструкцією АМ, записати її номінальні величини та підібрати відповідно до них вимірювальні прилади.

2. Визначити виводи фазних обмоток АД:

- індукційним методом;
- за допомогою міліамперметра постійного струму.

3. Виміряти опори обмоток фаз статора АД.

4. Зібрати схему для дослідження обертового магнітного поля АМ. Провести розрахунки для визначення пускового моменту ротора, що внесений в магнітне поле двигуна у вигляді:

- рамки;
- циліндра;
- хрестовини.

5. Реалізувати реверс магнітного поля статора АМ.

6. Вивчити методику вимірювання ковзання стробоскопічним методом.

7. Провести розрахунок холостого ходу.

8. Провести розрахунок номінального навантаження.

9. За даними дослідів холостого ходу та номінального навантаження (п. 7, п. 8) визначити:

- а) механічні і магнітні втрати;
- б) електричні втрати в обмотках статора і ротора;
- в) номінальний ККД;
- г) максимальний ККД;
- е) корисну потужність двигуна, при якій настає максимум ККД  $\eta = \eta_{\max}$ .

10. За результатами роботи зробити висновки.

## 5.2 Методичні вказівки до виконання практичної роботи

### 5.2.1 Визначення виводів обмоток АД

Існує кілька способів ідентифікації виводів АД. Розглянемо основні з них.

#### 5.2.1.1 Визначення виводів обмоток АД індукційним методом

Маркування фаз індукційним методом базується на явищі магнітної індукції. Розглянемо маркування для АД з ФР.

За допомогою контрольної лампи *HL* за схемою, приведеною на рис. 5.1, визначаються по два виводи, приналежні кожній із фаз (при відсутності обриву в колі живлення обмоток статора).

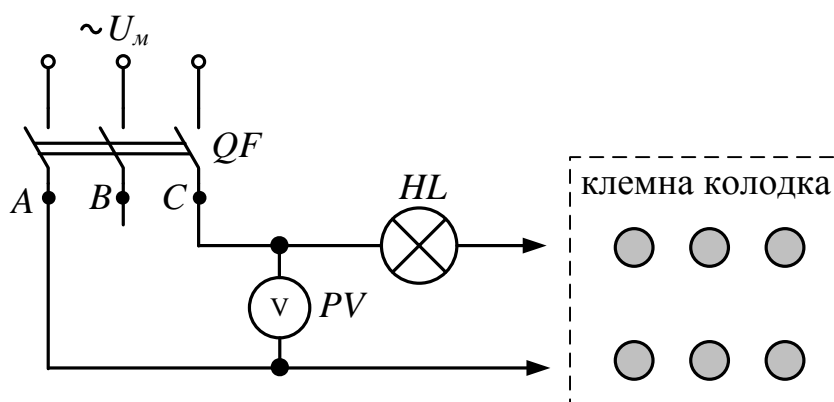
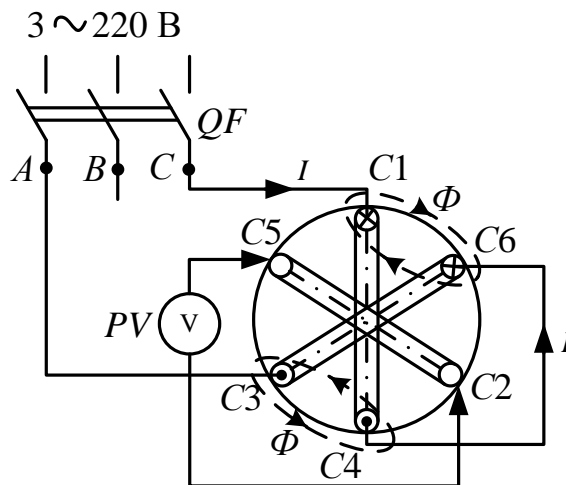


Рис. 5.1. Схема для визначення фаз обмоток АД індукційним методом

При цьому загорання контрольної лампи *HL* свідчить про те, що дані затискачі належать одній фазі. Одночасно за яскравістю горіння лампи *HL* і показами вольметра *PV*, який підключається до затискачів фази АД, визначається належність фази статора чи ротору. Фази статора, виконані на вищу напругу, мають більшу кількість витків і більший опір, тому лампа *HL*, увімкнена послідовно з цими фазами, горить менш яскраво, а покази вольметра *PV* більші. Початки і кінці фаз статора маркуються за схемою рис. 5.2, на якому зображена найпростіша обмотка статора, кожна фаза якої складається з однієї котушки.





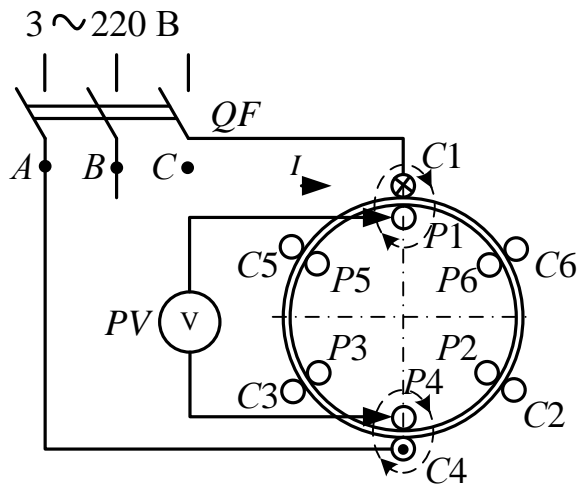
**Рис. 5.2. Маркування початків і кінців фаз статора**

Початок і кінець однієї з фаз позначають довільно, наприклад  $C1-C4$ . Послідовно з цією фазою вмикають одну з невідомих фаз, наприклад  $C3-C6$ , і подають на них напругу. По фазах протікатиме струм  $I$ , який створюватиме магнітний потік  $\Phi$  (рис. 5.2). Якщо кінець  $C4$  з'єднаємо з кінцем другої фази  $C6$ , то ЕРС в третій фазі не наводиться (показ вольметра  $PV$  рівний нулю). Це пояснюється тим, що силові лінії магнітного поля  $\Phi$ , що створюється струмом  $I$ , який має однаковий напрямок в провідниках, що належать початку однієї і кінцю іншої фази, не перетинають третю фазу. Якщо кінець  $C4$  буде з'єднаний з початком  $C3$  другої фази, то в третій фазі індукуватиметься деяка ЕРС, що і покаже вольтметр  $PV$ . Це пояснюється тим, що в цьому випадку струм  $I$  буде мати однаковий напрямок в провідниках, які належать початкам і, відповідно, кінцям фаз. Тоді силові лінії магнітного поля  $\Phi$ , яке охоплює початки  $C1, C3$  фаз і їх кінці  $C4, C6$ , будуть пронизувати третю фазу.

Аналогічно маркується початок і кінець третьої фази.

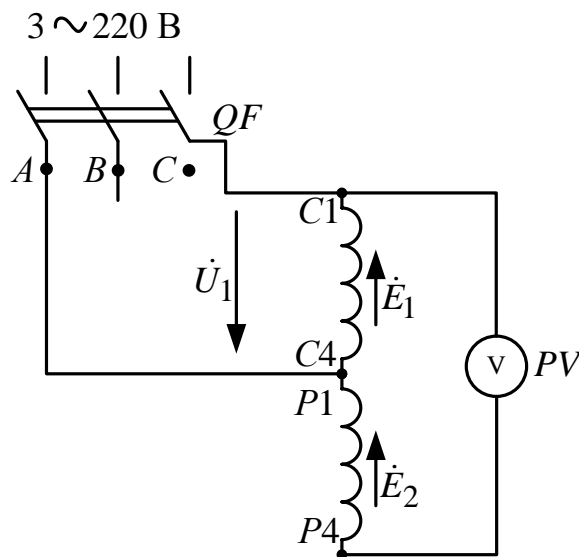
Фази ротора, які відповідають фазам статора, визначаються за схемою рис. 5.3 у такій послідовності. На одну із фаз статора, наприклад  $C1-C4$ , подається напруга.

До затискачів будь-якої іншої фази ротора приєднується вольтметр  $PV$ . Ротор повертається доти, доки вольтметр  $PV$  не покаже максимальну напругу. При цьому магнітні осі відповідних фаз статора і ротора будуть збігатися. Тому якщо напруга подана на фазу  $C1-C4$ , то вольтметр ввімкнений на фазу  $P1-P4$ . Подаючи напругу по черзі на решту фаз статора і не повертаючи ротор, знаходять відповідні їм фази ротора.



**Рис. 5.3. Визначення фаз ротора**

Початки і кінці фаз ротора маркуються за схемою рис. 5.4 при положенні ротора.



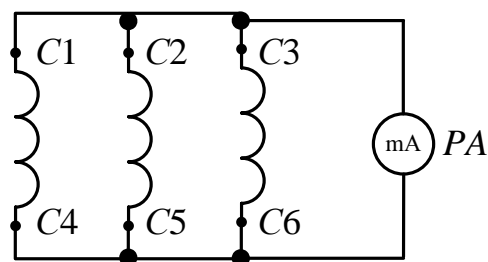
**Рис. 5.4 Маркування початків і кінців фаз ротора**

На одну із фаз статора, наприклад  $C1-C4$ , подається напруга  $U_1$ . Кінець її  $C4$  при цьому з'єднаний з одним із виводів відповідної фази ротора, що відповідає схемі автотрансформатора. Під дією напруги  $U_1$  в фазі статора протікатиме струм, що створюватиме магнітний потік, який в свою чергу індукватиме в фазах статора і ротора ЕРС  $\dot{E}_1$  і  $\dot{E}_2$ . Якщо вихідна напруга автотрансформатора  $U_{вих} = E_1 + E_2 \approx E_1 + E_2$  стане більшою, ніж  $U_1$ , то обмотки

статора і ротора включені узгоджено, тобто з'єднані між собою С4 і Р1, а якщо  $U_{вих} < U_1$ , то обмотки включені зустрічно.

### 5.2.1.2 Маркування виводів фаз за допомогою міліамперметра постійного струму

Початки і кінці фаз обмотки статора можна визначити також за допомогою міліамперметра *РА* постійного струму (рис. 1А.5). При цьому знайдені за допомогою контрольної лампи *HL* (або іншим методом) кінці усіх фаз з'єднують по три разом і до отриманих точок під'єднують вимірювальний прилад *РА* типу DT-830 В DIGITAL MULTIMETER з межею вимірювання 200 мА. Якщо при обертанні від руки ротора стрілка приладу відхиляється, потрібно поміняти місцями виводи однієї з фаз. Якщо після цього при обертанні від руки ротора в ту ж саму сторону стрілка приладу буде також відхилятися, необхідно відновити попереднє положення Perez'єднаної фази і поміняти місцями виводи другої фази. В одному із трьох варіантів стрілка приладу *РА* відхилятися не буде. Це вкаже на те, що всі фази з'єднані однойменними виводами. Отримані дані занести до табл. 5.1.



**Рис. 5.5. Схема визначення початків і кінців обмоток АД за допомогою міліамперметра постійного струму**

**Таблиця 5.1. Значення струму, виміряного міліамперметром**

	Тип з'єднання		
	C1 – C4	C1 – C4; C2 – C5	C1 – C4; C2 – C5; C3 – C6
<i>I</i> , мА			

### 5.2.2 Вимірювання опорів обмоток фаз статора АД

Опір обмоток фаз статора електродвигуна вимірюють з метою перевірки справності схем з'єднань, надійності пайок, відсутності міжвиткових замикань. Цю процедуру можна реалізувати за допомогою методу вольтметра-амперметра або омметра, або тестера.

Розглянемо перший та другий методи. При цьому можна скористатися запропонованою послідовністю виконання операцій:

а) ручку лабораторного автотрансформатора (ЛАТР)  $T1$  встановити в положення (рис. 5.6), при якому його вихідна напруга рівна нулю (крайнє ліве положення; контроль за вольтметром  $PV1$ );

б) по черзі увімкнути автомат  $QF1$  та тумблер  $SA1$ . Обертаючи ручку ЛАТР  $T1$  вправо, встановити за амперметром  $PA1$  струм в фазі, не більший від 20% номінального лінійного струму при з'єднанні обмоток статора в  $\Delta$ , після чого виміряти значення цього струму та значення падіння напруги  $U_\phi$  на фазі за вольтметром  $PV2$ . Аналогічно виміряти значення струму і напруги інших фаз. Регулювання струму і вимірювання необхідно здійснювати швидко, оскільки на постійному струмі провідники обмоток швидко нагріваються, в результаті чого їх опір змінюється;

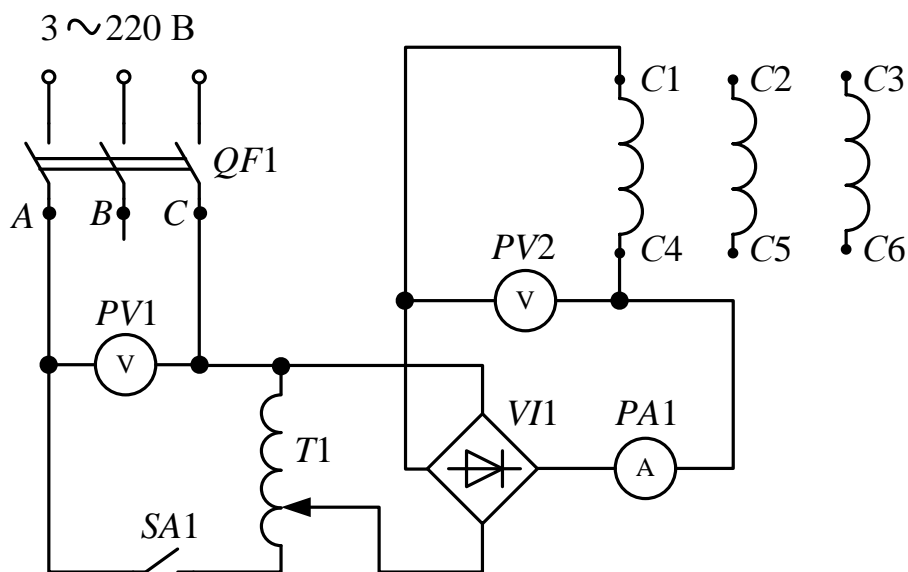


Рис. 5.6. Схема для вимірювання опорів обмоток фаз статора АД

в) розрахувати опір обмоток фаз статора за законом Ома. Результати розрахунків занести до табл. 5.1;

г) для порівняння правильності виконаних операцій виміряти опір обмоток фаз статора за допомогою омметра. Результати вимірювань занести до табл. 5.1.

**Таблиця 5.1. Результати вимірювань опорів обмоток фаз статора АД**

Назва фази	Виміряні та розрахункові значення			
	$I_1, \text{A}$	$U_\phi, \text{В}$	$R_\phi = U_\phi/I_1, \text{Ом}$	$R_1, \text{Ом (омметром)}$
<b>C1 – C4</b>				
<b>C2 – C5</b>				
<b>C3 – C6</b>				

При контрольних випробуваннях достатньо зробити одне вимірювання для кожної фази. Опори обмоток окремих фаз повинні відрізнятися від паспортного значення опору не більше ніж на  $\pm 5\%$ .

Якщо опір якоїсь фази значно більший опору двох інших фаз, то це вказує на поганий контакт, міжвиткове замикання в схемі цієї фази. В такому випадку необхідно усунути дефект.

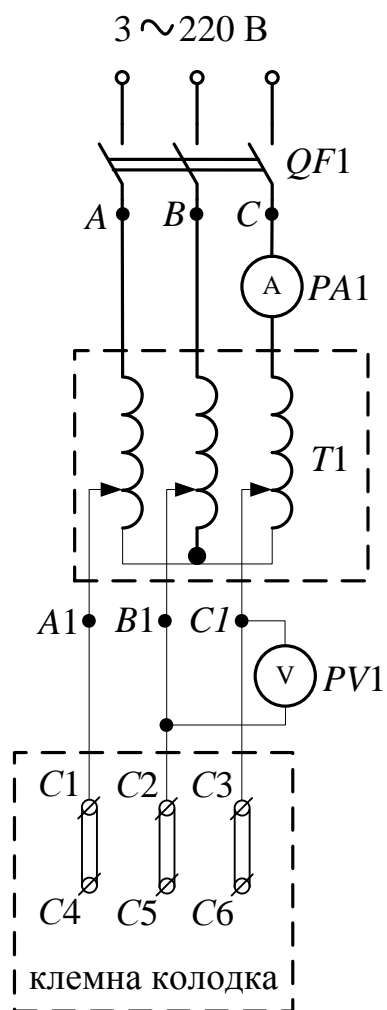
### **5.2.3 Розрахунок обертового магнітного поля АМ**

Для виконання цього розрахунок потрібно взяти АД з відокремленим ротором та зібрати схему, подану на рис. 5.7.

Як відомо з теорії, при подачі трифазної напруги на трифазну обмотку статора, з'єднану в "зірку" або в "трикутник", вона буде створювати обертове магнітне поле. Для того, щоб статор не перегрівався при відсутності ротора, на його обмотку подається понижена напруга  $U \leq 0,3U_n$  за допомогою регулятора напруги трансформаторного (РНТ)  $T1$ . В створенні обмоткою статора обертового магнітного поля можна впевнитись за допомогою хрестовини, рамки чи циліндра, надітих на немагнітний стрижень (наприклад на алюмінієвий провід) і внесених в розточку статора. Під дією обертового магнітного поля статора вони будуть обертатись на цьому стержні. Під час виконання даного розрахунку буде потрібно зафіксувати значення лінійної напруги  $U_n$  та струму  $I_1$ , при яких хрестовина, рамка та циліндр починають обертатись.

Використовуючи отримані під час розрахунків значення, потрібно обчислити значення пускових моментів  $M_n$  для кожного об'єкту, що був

розміщений в обертовому магнітному полі (хрестовини, рамки та циліндру).  
Результати вимірювань та обчислень занести до табл. 5.2.



**Рис. 5.7.** Схема для дослідження обертового магнітного поля АМ

**Таблиця 5.2.** Результати дослідження обертового магнітного поля

Значення	Тип об'єкта		
	рамка	циліндр	хрестовина
$U_L, В$			
$I_1, А$			
$M_n, Н·м$			

### 5.2.4 Реалізація реверсу магнітного поля статора АМ

Для здійснення реверсу необхідно при вимкненому автоматі живлення  $QF1$  (рис. 5.7) поміняти місцями два провідника, що живлять обмотки відповідних фаз статора. Якщо після цього увімкнути автомат  $QF1$ , можна впевнитись в тому, що напрямок обертання поля статора змінився на протилежний.

### 5.2.5 Методика вимірювання ковзання стробоскопічним методом

Суть стробоскопічного методу вимірювання ковзання полягає в наступному.

На торець валу або на диск, закріпленого на валу двигуна, фарбою наноситься радіальна смужка. При обертанні ротора смужка освітлюється неонову лампою, включеною в мережу з частотою напруги, наприклад  $f_1 = 50$  Гц, від якої живиться двигун. Лампа освітлює смужку 50 разів в секунду.

Якщо припустити, що двигун має одну пару полюсів ( $p = 1$ ) і його ротор обертається синхронно з полем статора ( $n = n_1 = f_1/p = 50$  об/с), то смужка кожного разу освітлюватиметься в одному і тому ж положенні, тобто здаватиметься нерухомою. Якби ротор обертася з  $n = 25$  об/хв (при  $p = 2$ ), то за кожен його оборот смужка освітлювалася б двічі і на валу (на диску) була б видна нерухома діаметральна смужка. При  $p = 3$  було б видно трьохпроменеву зірку і т.д.

У загальному випадку число променів зірки рівне числу пар  $p$  полюсів машини. Оскільки ротор АД відстає від поля статора, то кожне подальше освітлення смужки відбуватиметься дещо раніше, ніж попереднє, тобто смужка (зірка) обертатиметься в напрямі, протилежному обертанню ротора. Частота обертання смужки (зірки) буде тим більшою, чим більше відставання ротора від поля статора. Частота обертання смужки (зірки) рівна абсолютній величині відставання ротора від поля, тобто ковзанню, об/хв:

$$\Delta n = n_1 - n = \frac{60z}{t}, \quad (5.1)$$

де  $z$  – число повних обертів смужки (зірки) за час  $t$  (час  $t$  вимірюється в секундах).

Відносна величина ковзання:

$$s = \frac{n_1 - n}{n} = \frac{60z}{tn_1}. \quad (5.2)$$

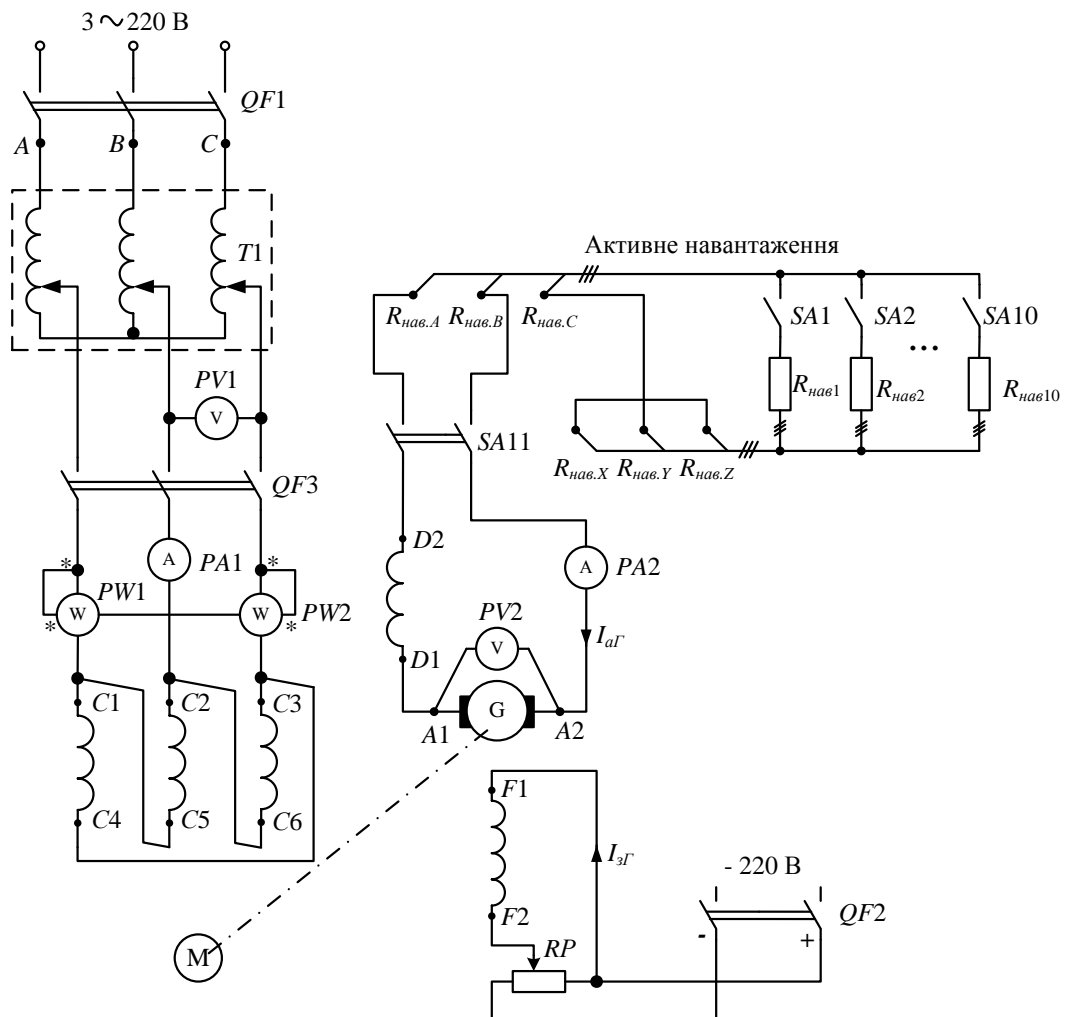
Частоту обертання ротора можна визначити з виразу

$$n = (1 - s)n_1. \quad (5.3)$$

### 5.2.6 Дослід холостого ходу

При дослідженні АД використовується спарка двох ЕМ: АД та МПС з незалежним збудженням, яка працює в режимі генератора – навантажувальна машина.

Як для досліду холостого ходу, так і для досліду навантаження використовується схема, що подана на рис. 5.8.



**Рис. 5.8. Схема для проведення дослідів холостого ходу та навантаження АД**

Дослід холостого ходу проводиться без навантаження на валу двигуна М, для чого кола збудження й навантаження генератора G повинні бути знеструмлені ( $I_{зГ} = 0$  – струм збудження,  $I_{аГ} = 0$  – струм якоря). Для цього



автомат  $QF2$  і тумблери ( $SA1 - SA11$ ), що включають опори навантаження, повинні бути відключені. В умовах лабораторії вал генератора  $G$  не від'єднується від вала двигуна  $M$ , тому в результаті досліду визначаються сумарні механічні втрати двох машин. Оскільки обидві машини приблизно рівні за потужністю, тому їхні механічні втрати приймаються однаковими.

Після складання схеми і перевірки її викладачем або лаборантом виконати дослід холостого ходу за наступною послідовністю.

Автоматом  $QF1$  подати живлення на РНТ  $T1$ , обертаючи рукоятку якого встановити вихідну напругу регулятора, рівну номінальній напрузі двигуна при заданій схемі з'єднання обмотки статора (контроль напруги здійснювати за вольтметром  $PV1$ ). Включивши автомат  $QF3$ , запустити двигун  $M$  і встановити за допомогою РНТ  $T1$  напругу холостого ходу  $U_{10} = 1,2 U_{ном}$ . Потім напругу плавно знижувати до  $U_{10} \approx 0,4 U_{ном}$ , при якій ротор двигуна  $M$  продовжуватиме обертатися з практично незмінною швидкістю. В процесі досліду зняти 10–12 точок, в тому числі точку при  $U_{10} = U_{ном}$ .

Струм холостого ходу  $I_{10}$  контролюється амперметром  $PA1$ . Потужність холостого ходу  $P_{10}$  визначається методом двох ватметрів  $PW1$  та  $PW2$  (значення потужностей  $P_I$  та  $P_{II}$  відповідно).

Результати вимірювань занести до табл. 5.3.

**Таблиця 5.3. Дані досліду холостого ходу**

№ п/п	Дослід					Розрахунок	
	$U_{10}, В$	$I_0, А$	$P_I, Вт$	$P_{II}, Вт$	$P_{10}, Вт$	$\Delta p_{ел10}, Вт$	$\Delta p_{ном}, Вт$
1							
2							
...							

Розрахункові формули до табл. 5.3:

потужність холостого ходу –

$$P_{10} = P_I \pm P_{II}; \quad (5.4)$$

електричні втрати в обмотці статора –

$$\Delta p_{ел1} = I_{10}^2 R_{1(75^0)}, \quad (5.5)$$

де  $R_{1(75^0)}$  – опір обмотки статора при робочій температурі  $75^0\text{C}$ ;

постійні втрати –

$$\Delta p_{\text{пост}} = P_{10} - \Delta p_{\text{ел1}}. \quad (5.6)$$

### 5.2.7 Дослід номінального навантаження

Дослід номінального навантаження проводять при напрузі на статорі двигуна  $U_1 = U_{1\text{ном}}$  за наступною методикою.

Тумблером SA12 (на схемі рис. 5.8 не показаний) включають електронний тахометр. Тумблером SA11 подають напругу на тумблери SA1 – SA10, що включають опори активного навантаження  $R_{\text{нав1}} - R_{\text{нав10}}$ . Автоматом QF2 подають напругу на потенціометр RP, поворотом ручки якого встановлюють номінальну напругу  $U_G$  генератора G, яка контролюється вольтметром PV2. Включенням тумблерів навантаження SA1 – SA10 й регулюванням струму  $I_{3Г}$  шунтової обмотки збудження F1–F2 струм якоря  $I_{aГ}$  (контролюється амперметром PA2) генератора змінюють до тих пір, поки струм статора  $I_1$  двигуна M не досягне номінального значення  $I_1 = I_{1\text{ном}}$  при номінальній напрузі живлення  $U_1 = U_{1\text{ном}}$ . Якщо струм двигуна M не досягає номінального значення, то необхідно зняти навантаження з генератора ( $I_{aГ} = 0$ ) виключити автомат QF2, поміняти місцями затискачі серієсної обмотки збудження D1–D2, включити автомат QF2 й довести навантаження двигуна M до номінального. При цьому виміряти всі номінальні величини, а результати занести до табл. 1А.4.

**Таблиця 5.4. Дані досліді номінального навантаження АД**

Дослід							Розрахунок		
$U_{1\text{ном}}$ , В	$I_{1\text{ном}}$ А	$P_I$ Вт	$P_{II}$ Вт	$n_{\text{ном}}$ об/хв	$U_G$ В	$I_{aГ}$ А	$P_{1\text{ном}}$ Вт	$S_{\text{ном}}$ в.о.	$P_G$ Вт

Розрахункові формули до табл. 5.4:

номінальна споживана потужність АД –

$$P_{1\text{ном}} = P_I \pm P_{II}; \quad (5.7)$$

номінальне ковзання –

$$s = \frac{n_1 - n_{ном}}{n_1}; \quad (5.8)$$

потужність генератора –

$$P_{\Gamma} = U_{\Gamma} I_{a\Gamma}. \quad (5.9)$$

Якщо частоту обертання двигуна визначати вимірюванням ковзання його ротора стробоскопічним методом, то спочатку потрібно визначити номінальне ковзання за формулою (5.2), а потім розрахувати номінальну частоту обертання за формулою (5.3) за умови  $n = n_{ном}$ .

## 5.2.8 Розрахунок втрат потужності та ККД АД

### 5.2.8.1 Механічні та магнітні втрати потужності

Механічні та магнітні втрати потужності двигуна визначають за даними дослідження холостого ходу, для чого будують графік залежності постійних втрат від прикладеної напруги  $\Delta p_{пост} = f(U_{10})$  (рис. 5.9).

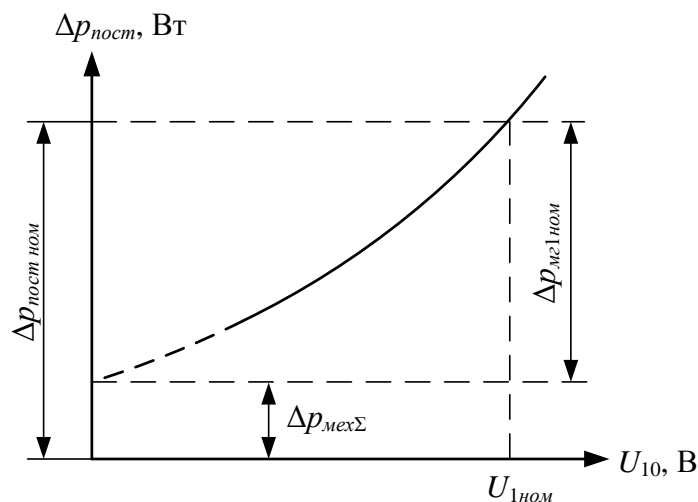


Рис. 5.9. Залежність постійних втрат АД від напруги

Графік залежності  $\Delta p_{пост} = f(U_{10})$  має вигляд параболи, так як механічні втрати не залежать від напруги, а магнітні втрати  $\Delta p_{мг1}$  пропорційні квадрату індукції магнітного поля, яка, в свою чергу, пропорційна прикладеній напрузі.

Продовжуючи графік  $\Delta p_{пост} = f(U_{10})$  до перетину з віссю ординат, де  $U_{10} = 0$  (пунктирна крива), а відповідно, і  $\Delta p_{мг1} = 0$ , отримують сумарні механічні втрати двох машин:

$$\Delta p_{мех\Sigma} = \Delta p_{мех\Gamma} + \Delta p_{мех\Delta}, \quad (5.10)$$

де  $\Delta p_{\text{мех } \Gamma}$ ,  $\Delta p_{\text{мех } Д}$  – механічні втрати генератора та двигуна відповідно.

Тоді механічні втрати двигуна визначаються як

$$\Delta p_{\text{мех } Д} = \frac{\Delta p_{\text{мех } \Sigma}}{2}. \quad (5.11)$$

Магнітні втрати в сердечнику статора визначаються при  $U_{10} = U_{1\text{ном}}$ :

$$\Delta p_{\text{мг1ном}} = \Delta p_{\text{пост ном}} - \Delta p_{\text{мех } \Sigma}, \quad (5.12)$$

де  $\Delta p_{\text{пост ном}}$  – постійні втрати двигуна при номінальній напрузі живлення, яка не залежить від навантаження на його валу.

### 5.2.8.2 Електричні втрати в обмотках АД

Електричні втрати в обмотках статора і ротора в режимі номінального навантаження двигуна розраховуються за формулами:

$$\Delta p_{\text{ел1ном}} = I_{1\text{ном}}^2 R_{1(75^0)}; \quad (5.13)$$

$$\Delta p_{\text{ел2ном}} = s_{\text{ном}} P_{\text{ем ном}}, \quad (5.14)$$

де  $P_{\text{ем ном}}$  – номінальна електромагнітна потужність двигуна, визначається за формулою

$$P_{\text{ем}} = P_1 - \Delta p_{\text{ел1}} - \Delta p_{\text{мг1}}$$

для номінального режиму:

$$P_{\text{ем ном}} = P_{1\text{ном}} - \Delta p_{\text{ел1ном}} - \Delta p_{\text{мг1ном}}. \quad (5.15)$$

### 5.2.8.3 Додаткові і сумарні змінні втрати

Додаткові втрати при номінальному режимі роботи двигуна згідно ГОСТ 11828-75 приймаються рівними 0,5% номінальній потужності, що підводиться:

$$\Delta p_{\text{д ном}} = 0,005 P_{1\text{ном}}. \quad (5.16)$$

При іншому навантаженні їх розраховують пропорційно квадрату струму статора  $I_1$ . Тому додаткові втрати, так як і електричні втрати в обмотках двигун, є змінними.

Сумарні змінні втрати при номінальному режимі навантаження АД визначають за формулою

$$\Delta p_{\text{зм}} = \Delta p_{\text{ел1}} + \Delta p_{\text{ел2}} + \Delta p_{\text{д}}.$$

в яку підставляють номінальні значення електричних втрат  $\Delta p_{\text{ел1}}$ ,  $\Delta p_{\text{ел2}}$  та додаткових втрат  $\Delta p_{\text{д ном}}$ .

#### 5.2.8.4 ККД двигуна та корисна потужність, при якій настає максимум ККД

Сумарні втрати в двигуні:

$$\Delta p_{\Sigma} = \Delta p_{\text{пост ном}} + \Delta p_{\text{зм ном}}. \quad (5.17)$$

Номінальна корисна потужність на валу двигуна  $P_{2\text{ном}}$  та номінальний його номінальний ККД  $\eta_{\text{ном}}$  визначаються за формулами

$$P_2 = P_1 - \Delta p_{\Sigma}.$$

та

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta p_{\Sigma}} = 1 - \frac{\Delta p_{\Sigma}}{P_1}.$$

Для порівняння необхідно розрахувати номінальний ККД за дослідними даними:

$$\eta'_{\text{ном}} = \sqrt{\frac{P_{\Gamma}}{P_{1\text{ном}}}} \quad (5.18)$$

і порівняти його зі значенням  $\eta_{\text{ном}}$ , розрахованим за формулою

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta p_{\Sigma}} = 1 - \frac{\Delta p_{\Sigma}}{P_1}.$$

Коефіцієнт навантаження двигуна, при якому ККД досягає максимального значення, –

$$\beta_m = \sqrt{\frac{\Delta p_{\text{пост ном}}}{\Delta p_{\text{зм ном}}}}. \quad (5.19)$$

Корисна потужність на валу двигуна при  $\eta = \eta_{\text{max}}$ :

$$P'_2 = \beta_{\text{max}} P_{2\text{ном}}. \quad (5.20)$$

Максимальний ККД:

$$\eta_{\text{max}} = \frac{P'_2}{P'_2 + 2\Delta p_{\text{пост ном}}}. \quad (5.21)$$

Задача 5.1.

Трифазний АД живиться від мережі з напругою  $U_{1\text{ном}} = 380$  В при з'єднанні обмоток статора зіркою. Потужність, що споживається з мережі, та коефіцієнт потужності при номінальному навантаженні відповідно дорівнюють  $P_{1\text{ном}} = 15$

кВт та  $\cos \varphi_{1ном} = 0,85$ . Частота обертання  $n_{ном} = 1470$  об/хв; магнітні втрати  $\Delta p_{рм} = 250$  Вт; механічні втрати  $\Delta p_{рмех} = 120$  Вт; активний опір фази обмотки статора  $R_1 = 0,8$  Ом. Знайти номінальний ККД двигуна.

Розв'язок.

Струм в фазі обмотки статора:

$$I_{1ном} = \frac{P_{1ном} \cdot 10^3}{m_1 \frac{U_{1ном}}{\sqrt{3}} \cos \varphi_{1ном}},$$
$$I_{1ном} = \frac{15 \cdot 10^3}{3 \cdot \frac{380}{\sqrt{3}} \cdot 0,85} = 26,81 (A).$$

Електричні втрати в обмотці статора, розраховані за формулою

$$\Delta p_{ел1ном} = 3 \cdot 26,81^2 \cdot 0,8 = 1725,06 \text{ (Вт)}.$$

Електромагнітна потужність АД, розрахована за формулою

$$P_{емном} = 15 \cdot 10^3 - 250 - 1725,06 = 13024,94 \text{ (Вт)}.$$

Номінальне ковзання відповідно до формули

$$s_{ном} = \frac{1500 - 1470}{1500} = 0,02.$$

Електричні втрати в обмотці ротора, розраховані за формулою

$$\Delta p_{ел2ном} = 0,02 \cdot 13024,94 = 260,5 \text{ (Вт)}.$$

Додаткові втрати

$$\Delta p_{додном} = 0,005 \cdot 15 \cdot 10^3 = 75 \text{ (Вт)}.$$

Сумарні втрати

$$\Delta p_{\Sigma ном} = 250 + 1725,06 + 260,5 + 120 + 75 = 2430,56 \text{ (Вт)}.$$

ККД двигуна в номінальному режимі

$$\eta_{ном} = 1 - \frac{2430,56}{15 \cdot 10^3} = 0,84.$$

## Контрольні питання

1. Призначення, будова і принцип роботи АД.
2. Умови створення обертового магнітного поля обмоткою АМ та його реверсу.
3. Поясніть методику визначення початків і кінців обмоток АД методом міліамперметра постійного струму.
4. Приведіть формулу електромагнітного моменту АМ та проаналізуйте її.
5. Поясніть методику визначення початків і кінців обмоток АД індукційним методом.
6. Ковзання та режими роботи АМ.
7. Енергетична діаграма активної потужності двигуна. Залежність окремих видів втрат від фізичних параметрів машини.
8. Енергетична діаграма реактивної потужності. Коефіцієнт потужності АД.
9. Співвідношення магнітних втрат у сердечниках статора й ротора в режимах холостого ходу, короткого замикання й номінального навантаження двигуна.
10. Залежність ККД АД від навантаження.
11. Методика проведення досвідів з метою визначення втрат і ККД АД.
12. Дослідне й розрахункове визначення всіх видів втрат.
13. Суть стробоскопічного методу вимірювання ковзання ротора двигуна.

### 5.4 Задачі для самостійного розв'язування

1. Трифазний АД призначений для роботи при напрузі мережі 220/380 В. Як потрібно з'єднати обмотки статора цього двигуна для напруги мережі 220 В, а як при напрузі 380 В. Відповідь обґрунтуйте.

2. Трифазний АД працює від мережі напругою 660 В при з'єднанні обмоток статора зіркою. При номінальному навантаженні він споживає з мережі потужність  $P_1 = 16,7$  кВт при коефіцієнті потужності  $\cos \varphi_1 = 0,87$ . Частота обертання ротора  $n_2 = 1470$  об/хв. Визначити номінальний ККД двигуна  $\eta_{ном}$ , якщо магнітні втрати  $\Delta p_{мг} = 265$  Вт, а механічні втрати  $\Delta p_{мех} = 123$  Вт. Активний опір фази обмотки статора  $R_1 = 1,1$  Ом. Додаткові втрати складають 0,5% споживаної потужності.

3. АМ з числом пар полюсів  $p = 2$  увімкнена в трифазну мережу з частотою 50 Гц. При зовнішньому моменті, направленому проти обертання поля, ротор машини має кутову швидкість  $\omega = 147,6$  рад/с; при моменті, направленому в

сторону обертання поля,  $\omega = 166,5$  рад/с. Визначити ковзання і режим роботи машини в кожному з випадків.

4. Шестиполюсна АМ живиться від трифазної мережі з частотою 60 Гц. Ковзання машини дорівнює 0,025. Знайти кутову швидкість і частоту обертання магнітного поля та ротора. Як зміняться ці величини при частоті 400 Гц? В якому режимі працює АМ?

5. Трифазний асинхронний двигун із короткозамкненим ротором має такі номінальні дані:  $P_{ном} = 1,7$  кВт;  $Y/\Delta - 380/220$  В;  $\eta_{ном} = 76\%$ ;  $\cos\varphi_{1ном} = 0,81$ . Визначити номінальні значення фазних і лінійних напруг і струмів статора, повну, активну і реактивну потужності, що споживаються з мережі.

6. Ротор трифазного асинхронного двигуна обертається з номінальною частотою 577 об/хв при частоті напруги мережі  $f_1 = 50$  Гц. Визначити частоту обертання поля статора, число полюсів двигуна і його номінальне ковзання.

7. Ротор асинхронного двигуна обертається з кутовою швидкістю  $\omega = 298$  рад/с. В якому режимі і при якому ковзанні буде працювати машина в перший момент після переключення обмоток статора на протилежний напрямок обертання (дві фази міняються місцями), якщо двигун має одну пару полюсів ( $p = 1$ ).

8. Трифазна асинхронна машина має такі дані: число витків фази обмотки статора  $w_1 = 68$ , ротора  $w_2 = 27$ , обмотувальний коефіцієнт обмотки статора  $k_{об1} = 0,886$ , ротора  $k_{об2} = 0,954$ . Частота мережі 50 Гц, магнітний потік  $\Phi = 2,7 \cdot 10^{-2}$  Вб. Визначити діючі значення ЕРС, індукованих в обмотках статора і ротора двигуна при нерухомому роторі.

9. Розрахувати дані в ППП MathCAD (або іншому програмному середовищі) і побудувати механічну характеристику  $\omega = f(M)$  трифазного АД з короткозамкненим ротором типу 2АИ160S4У3 номінальною потужністю 18,5 кВт напругою 220/380 В, частотою обертання 1480 об/хв. Параметри схеми заміщення такого двигуна:  $R_1 = 0,263$  Ом,  $X_1 = 0,521$  Ом,  $R'_2 = 0,168$  Ом,  $X'_2 = 0,892$  Ом. Перевантажувальна здатність двигуна  $\lambda = M_{max}/M_{ном} = 2,35$ ; кратність пускового моменту  $k_n = M_n/M_{ном} = 1,1$ .



## Практична робота №6

### ВИЗНАЧЕННЯ РОБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК АД ПО КРУГОВІЙ ДІАГРАМІ ТА ЇХ ПОРІВНЯННЯ З ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИМИ

**Мета роботи.** Ознайомитися з методикою побудови кругової діаграми трифазного АД за експериментальними даними, визначити по ній робочі характеристики двигуна й порівняти їх з аналогічними експериментальними характеристиками.

#### 6.1 Програма виконання практичної роботи

1. Ознайомитися з будовою лабораторної установки, записати номінальні величини АД й навантажувального генератора, підібрати відповідні їм вимірювальні прилади.

2. Провести досліди:

- а) холостого ходу;
- б) короткого замикання;
- в) навантаження.

3. За даними дослідів холостого ходу й короткого замикання визначити:

- а) механічні втрати двигуна;
- б) активну складову струму реального холостого ходу, що відповідає механічним втратам, а також струм ідеального холостого ходу двигуна;
- в) дійсний струм, потужність і параметри короткого замикання;

4. За експериментальними даними побудувати кругову діаграму АД.

5. По круговій діаграмі в діапазоні зміни струму двигуна від  $I_1 = 0$  до  $I_1 = 1,2I_{1ном}$  визначити й побудувати робочі характеристики двигуна:

- залежності  $(I_1, M_2, \cos\varphi_1) = f(P_2)$  в одних координатних осях;
- залежності  $(P_1, n, \eta) = f(P_2)$  в інших.

На ті ж графіки для порівняння нанести відповідні характеристики, отримані з дослідів навантаження.

6. По круговій діаграмі визначити кратність пускового моменту й перевантажувальну здатність АД.

#### 6.2 Методичні вказівки до виконання практичної роботи

##### 6.2.1 Проведення дослідів

Схема електрична принципова лабораторної установки точно така ж, як і

в роботі №5 (рис. 5.8).

Для проведення досліду короткого замикання АД передбачене механічне гальмо. У муфті, що з'єднує двигун з генератором, висвердлений отвір, у який через отвір у кожусі, що закриває муфту, вставляється металевий штир, який фіксується на металевій стійці. Ця стійка прикріплена до металевої плити, на якій установлені машини.

*Дослід холостого ходу* проводять з метою визначення механічних втрат двигуна, струмів реального й ідеального холостого ходу та їхнього зсуву фаз.

*Дослід короткого замикання* проводять з метою визначення струму й потужності короткого замикання, необхідних для побудови кругової діаграми.

Дослід проводять за наступною методикою. Ротор двигуна загальмовують механічним гальмом. Включенням автомата  $QF1$  подають напругу на вхід РНТ  $T1$  і встановлюють мінімальну напругу на його виході, після чого включають автомат  $QF3$  і напругу на двигуні  $M$  плавно збільшують до значення, при якому струм статора АД при заданій схемі з'єднання обмотки статора буде номінальним. При цьому записують значення струму короткого замикання  $I_{1к} = I_{1ном}$ , напруги короткого замикання  $U_{1к}$  та потужності короткого замикання  $P_к = P_1 + P_{II}$ .

*Дослід навантаження* проводять з метою зняття робочих характеристик двигуна.

Послідовність виконання дій наступна. Включенням автомата  $QF1$  подають напругу на вхід РНТ  $T1$ . Встановлюють мінімальну напругу на його виході й включають автомат  $QF3$ . Двигун  $M$  запускають плавним підвищенням напруги живлення, потім доводять напругу до номінального значення при заданій схемі з'єднання обмотки статора. Після чого включають електронний тахометр тумблером  $SA12$  (на схемі не показаний) і подають напругу на навантаження тумблером  $SA11$ .

Першу точку знімають на холостому ході генератора ( $I_{зГ} = 0$ ,  $I_{аГ} = 0$ ). Далі подають живлення на обмотку збудження генератора, увімкнувши автомат  $QF2$ . Напругу на затискачах генератора доводять до максимального, контролюючи вольтметром  $PV2$ . Почерговим включенням одного-двох опорів навантаження генератора змінюють навантаження на валу двигуна так, щоб струм його обмотки статора при незмінній напрузі живлення  $U_1 = U_{1ном}$  змінювався від  $I_1 = I_{10}$  до  $I_1 = 1,2I_{1ном}$ . При цьому знімають 5-6 точок і результати вимірювань заносять до табл. 6.1.

**Таблиця 6.1. Дані дослід навантаження**

№ п/п	Дослід							Розрахунок						
	$U_{1ном},$ В	$I_1,$ А	$P_I,$ Вт	$P_{II},$ Вт	$n_{ном},$ об/хв	$U_{Г},$ В	$I_{aГ},$ А	$P_1,$ Вт	$s,$ в.о.	$P_{Г},$ Вт	$\eta,$ в.о.	$P_2,$ Вт	$M_2,$ Нм	$\cos\varphi_1,$ в.о.
1														
2														
...														

Розрахункові формули до табл. 6.1:

потужність, що споживається з мережі:

$$P_1 = P_I \pm P_{II}; \quad (6.1)$$

ковзання  $s$  розраховується за формулою

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{\omega_1 - \omega}{\omega_1},$$

потужність генератора  $P_G$  розраховується за формулою

$$P_G = U_G I_{aG}.$$

ККД розраховується як

$$\eta = \sqrt{\frac{P_{G1}}{P_1}}; \quad (6.2)$$

потужність на валу АД –

$$P_2 = \eta P_1; \quad (6.3)$$

момент на валу двигуна –

$$M_2 = \frac{9,55 P_2}{n}; \quad (6.4)$$

коефіцієнт потужності –

$$\cos\varphi_1 = \frac{P_1}{\sqrt{3} U_{1ном} I_1}. \quad (6.5)$$

### 6.2.2 Розрахунок вихідних даних для побудови кругової діаграми

Побудову кругової діаграми виконують у такий спосіб.

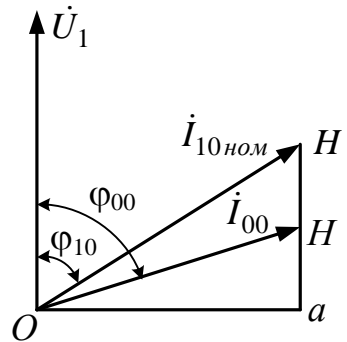
Механічні втрати двигуна  $\Delta p_{мехД}$  визначають з досліді холостого ходу.

Розраховують активну складову струму реального холостого ходу:

$$I_{10a} = \frac{\Delta P_{\text{мехД}}}{\sqrt{3}U_{1\phi.\text{ном}}}, \quad (6.6)$$

де  $U_{1\phi.\text{ном}}$  – номінальна фазна напруга АД.

Струм ідеального холостого ходу  $I_{00}$  визначають з побудови векторної діаграми (рис. 6.1) у такій послідовності.



**Рис. 6.1. Векторна діаграма для визначення струму ідеального холостого ходу**

З досліду холостого ходу при  $U_{10} = U_{1\text{ном}}$  беруть струм холостого ходу  $I_{10\text{ном}}$  і визначають його фазу

$$\varphi_{10} = \arccos\left(\frac{P_{10}}{\sqrt{3}U_{1\text{ном}}I_{10\text{ном}}}\right). \quad (6.7)$$

Будують вектор номінальної напруги  $\dot{U}_{1\text{ном}}$ . Під кутом  $\varphi_0$  до нього відкладають вектор  $\dot{I}_{10\text{ном}} = OH'm_i$ .

Із точки  $H'$  вниз відкладають відрізок  $H'Hm_i = I_{0a}$ . З'єднавши точки  $O$  та  $H$ , одержують струм ідеального холостого ходу  $I_{00} = OHm_i$  і його фазу  $\varphi_{00} = \arccos(Ha / OH)$ .

Відрізок  $Ham_i = I_{00a}$  є активною складовою струму ідеального холостого ходу.

Дійсні струми й потужності короткого замикання, що відповідають  $U_{1к} = U_{1\text{ном}}$ , визначають за даними досліду короткого замикання й номінальних величин:

$$I_{1к\partial} = I_{1ном} \frac{U_{1ном}}{U_k}; \quad (6.8)$$

$$P_{к\partial} = P_k \frac{U_{1ном}^2}{U_{1к}^2} \dots \quad (6.9)$$

Фаза струму короткого замикання:

$$\varphi_k = \dot{U}_{1ном} \wedge \dot{I}_{1к\partial} = \arccos\left(\frac{P_{к\partial}}{\sqrt{3}U_{1ном}I_{1к\partial}}\right). \quad (6.10)$$

Активна складова повного опору короткого замикання двигуна:

$$R_k = \frac{P_{к\partial}}{I_{1к\partial}^2}. \quad (6.11)$$

Приведене значення активного опору роторної обмотки:

$$R'_2 = R_k - R_{1(75^0)}. \quad (6.12)$$

Для побудови кругової діаграми задаються масштабом струму  $m_i$  (А/мм) та розраховують масштаби:

потужності, Вт/мм:

$$m_p = 3U_{1ф.ном}m_i; \quad (6.13)$$

моменту, Н·м/мм:

$$m_m = \frac{m_p}{\omega} = \frac{pm_p}{2\pi f_1}. \quad (6.14)$$

### 6.2.3 Побудова кругової діаграми

Побудова кругової діаграми з врахуванням останнього фактору практично не відрізняється від тієї, що приведена (рис. 1.21). Тому послідовність побудови залишається тією ж самою, за винятком того, що з'являється нова точка  $H'$ , що відповідає реальному холостому ходу (рис. 6.2). Методика знаходження цієї точки викладена вище (рис. 6.1).

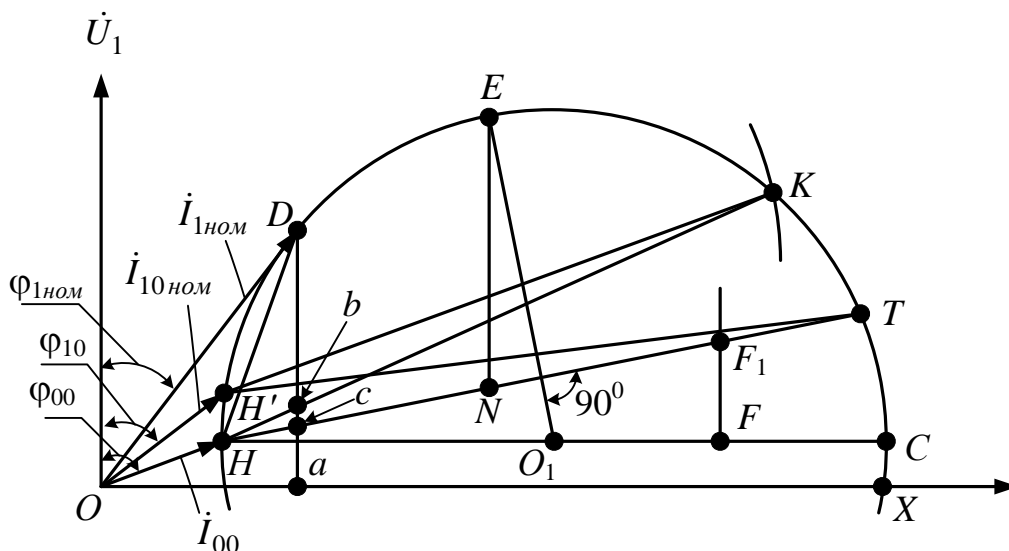


Рис. 6.2. Кругова діаграма АД

У результаті зазначених побудов одержують:

- відрізок  $OX$  – лінію потужності живлення  $P_1$ ;
- відрізок  $HT$  – лінію електромагнітної потужності  $P_{em}$ ;
- відрізок  $H'T$  – лінію електромагнітного моменту  $M$ ;
- відрізок  $HK$  – лінію повної механічної потужності  $P_{mex}$ ;
- відрізок  $H'K$  – лінію корисної потужності двигуна  $P_2$ .

Розрахунок робочих характеристик по круговій діаграмі здійснюють за методикою, викладеною в п. 1.8.2.3.

Відклавши на окружності струмів додатково 4-5 точок, що відповідають струмам статора від  $I_{10ном}$  до  $1,2I_{1ном}$ , для кожного з них знаходять  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $\cos\phi_1$ ,  $s$ ,  $\eta$  за методикою, викладеною в п. 1.8.2.3. Результати заносять до табл. 6.2.

**Таблиця 6.2. Дані для побудови робочих характеристик**

№ п/п	По круговій діаграмі						Розрахунок	
	$I_1$ , А	$P_1$ , Вт	$P_2$ , Вт	$\cos\phi_1$ , в.о.	$s$ , в.о.	$\eta$ , в.о.	$n$ , об/хв	$M_2$ , Н·м
1								
2								
...								

**Задача 6.1.**

Побудувати робочі характеристики АД, параметри якого наведені нижче, з використанням ППП MathCAD.

Вихідні дані із паспорта машини:

$$\begin{aligned}
 P_{\text{ном}} &:= 5.5 \cdot 10^3 \text{ Вт} & f_1 &:= 50 \text{ Гц} & m &:= 3 \\
 U_{\text{ном}} &:= 220 \text{ В} & I_{\text{ном}} &:= 10 \text{ А} & p &:= 1 \\
 R_1 &:= 1.2 \text{ Ом} & n_{\text{ном}} &:= 2890 \text{ об/хв} & &
 \end{aligned}$$

Вихідні дані дослідження холостого

$$\begin{aligned}
 P_0_{\text{ном}} &:= 250 \text{ Вт} & I_0_{\text{ном}} &:= 2 \text{ А} \\
 \Delta p_{\text{мех}} &:= 200 \text{ Вт} & \cos\phi_0_{\text{ном}} &:= 0.2
 \end{aligned}$$

Вихідні дані дослідження короткого замикання:

$$\begin{aligned}
 P_k_{\text{ном}} &:= 390 \text{ Вт} & U_k_{\text{ном}} &:= 60 \text{ В} \\
 I_k_{\text{ном}} &:= 10 \text{ А} & \Delta p_{\text{дод}} &:= 0.005 \cdot P_{\text{ном}} \\
 \cos\phi_k_{\text{ном}} &:= 0.5 & &
 \end{aligned}$$

*Розв'язок.*

Активна складова струму холостого ходу:

$$I_{oa} := I_{0\_nom} \cdot \cos\phi_{0\_nom} \quad I_{oa} = 0.4 \text{ A}$$

Реактивна складова струму холостого ходу:

$$I_{or} := I_{0\_nom} \cdot \sin(\arccos(\cos\phi_{0\_nom})) \quad I_{or} = 1.96 \text{ A}$$

Повний опір КЗ та його складові (активна і реактивна):

$$Z_k := \frac{U_{k\_nom}}{I_{k\_nom}} \quad Z_k = 6 \text{ Ом}$$

$$R_k := Z_k \cdot \cos\phi_{k\_nom} \quad R_k = 3 \text{ Ом}$$

$$X_k := Z_k \cdot \sin(\arccos(\cos\phi_{k\_nom})) \quad X_k = 5.196 \text{ Ом}$$

Приведений активний опір ротора:

$$R'2 := R_k - R_1 \quad R'2 = 1.8 \text{ Ом}$$

Критичне ковзання:

$$s_{kr} := \frac{R'2}{X_k} \quad s_{kr} = 0.346$$



Синхронна швидкість обертання:

$$n1 := \frac{60f1}{p} \quad n1 = 3 \times 10^3 \text{ об/хв}$$

Ковзання в номінальному режимі:

$$s_{\text{nom}} := \frac{n1 - n_{\text{nom}}}{n1} \quad s_{\text{nom}} = 0.037$$

Магнітні втрати:

$$\Delta p_{\text{mag}} := P0_{\text{nom}} - \Delta p_{\text{mex}} \quad \Delta p_{\text{mag}} = 50 \text{ Вт}$$

Діапазон зміни ковзання:

$$\begin{aligned} T &:= 0.001 & i &:= \frac{\text{skr}}{T} \\ i &:= \text{Round}(i, 1) & i &= 346 \\ s_{\text{min}} &:= 0,0 + T \dots \text{skr} \\ & & & + \end{aligned}$$

Еквівалентний активний опір схеми заміщення:

$$Re(s) := R1 + \frac{R'2}{s}$$

Еквівалентний повний опір схеми заміщення:

$$Ze(s) := \sqrt{Re(s)^2 + Xk^2}$$

Коефіцієнт потужності кола ротора:

$$\cos\phi2(s) := \frac{Re(s)}{Ze(s)}$$

Приведений струм кола ротора та його складові:

$$I_2(s) := \frac{U_{\text{nom}}}{Z_e(s)}$$

$$I_{2a}(s) := I_2(s) \cdot \cos\phi_2(s)$$

$$I_{2r}(s) := I_2(s) \cdot \sin(\arccos(\cos\phi_2(s)))$$

Активна, реактивна та повна складові струму статора:

$$I_{1a}(s) := I_{0a} + I_{2a}(s)$$

$$I_{1r}(s) := I_{0r} + I_{2r}(s)$$

$$I_1(s) := \sqrt{I_{1a}(s)^2 + I_{1r}(s)^2}$$

Коефіцієнт потужності двигуна відносно мережі:

$$\cos\phi_1(s) := \frac{I_{1a}(s)}{I_1(s)}$$

Споживана потужність двигуном з мережі:

$$P_1(s) := m \cdot U_{\text{nom}} \cdot I_{1a}(s)$$

Електричні втрати в обмотці статора:

$$\Delta p_{e1}(s) := m \cdot I_{1a}(s)^2 \cdot R_1$$

Електромагнітна потужність двигуна:

$$P_{em}(s) := P_1(s) - \Delta p_{e1}(s) - \Delta p_{mag}$$

Електромагнітний момент двигуна:

$$M_{em}(s) := 9.55 \cdot \frac{P_{em}(s)}{n_1}$$

Електричні втрати в роторі:

$$\Delta p_{e2}(s) := s \cdot P_{em}(s)$$

Коефіцієнт навантаження:

$$\beta(s) := \frac{I_1(s)}{I_{1\text{nom}}}$$

Приведені додаткові втрати в роторі:

$$\Delta p'_{dod}(s) := \beta(s)^2 \cdot \Delta p_{dod}$$

Корисна потужність двигуна:

$$P_2(s) := P_{em}(s) - \Delta p_{e2}(s) - \Delta p_{mex} - \Delta p'_{dod}(s)$$

Коефіцієнт корисної дії:

$$\eta(s) := \frac{P2(s)}{P1(s)}$$

Частота обертання ротора:

$$n(s) := n1 \cdot (1 - s)$$

Момент на валу двигуна:

$$M2(s) := 9.55 \cdot \frac{P2(s)}{n(s)}$$

Результати побудови отриманих залежностей наведені на рис. 6.3.

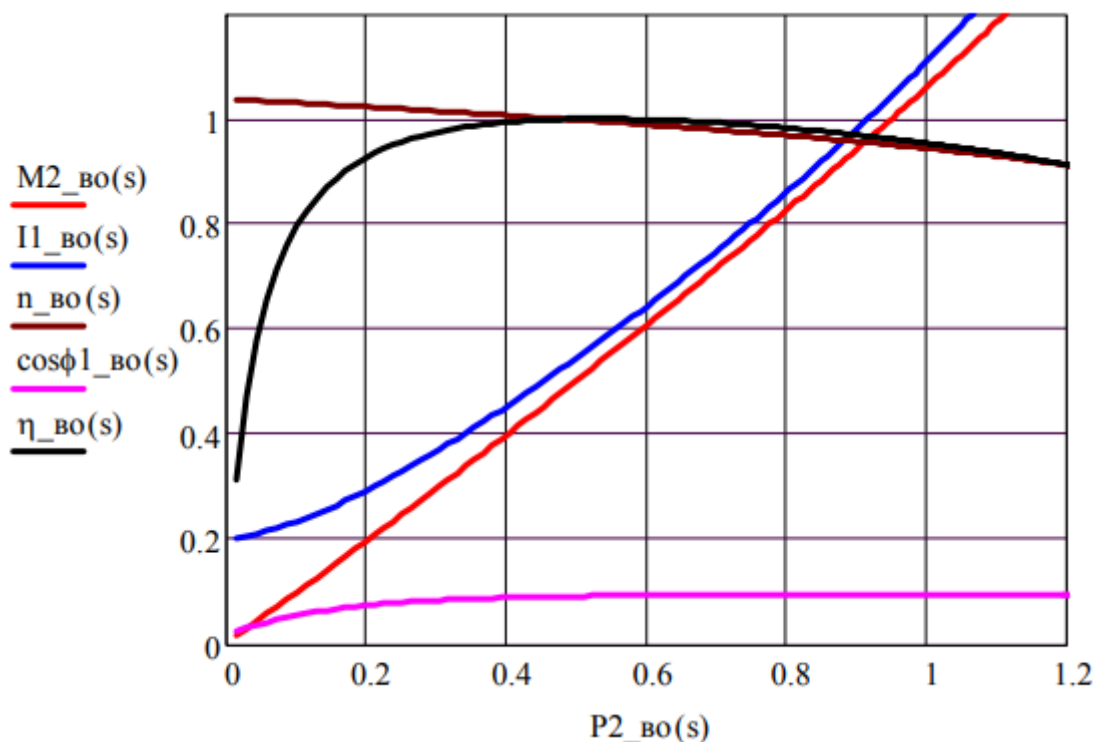


Рис. 6.3. Робочі характеристики АД

### Контрольні питання

12. Будова і принцип дії АД.
13. Мета й методика проведення холостого ходу й короткого замикання АД.
14. Обґрунтування й методика побудови спрощених і уточненої кругових діаграм за дослідними даними.
15. Визначення по круговій діаграмі основних величин, що характеризують роботу двигуна.
16. Визначення перевантажувальної здатності, кратності пускових струму й

моменту АД по круговій діаграмі.

17. Теоретично пояснити вид робочих характеристик двигуна.

#### 6.4 Задачі для самостійного розв'язування

1. Номінальна потужність АД  $P_n = 7,5$  кВт, номінальна фазна напруга  $U_{1\phi n} = 220$  В. Побудувати кругову діаграму та визначити по ній номінальне значення струму статора  $I_{1n}$ , коефіцієнт потужності  $\cos\phi_{1n}$  та споживану потужність  $P_{1n}$ , якщо відомі параметри машини:  $R_1 = 0,524$  Ом,  $R_2' = 0,328$  Ом,  $X_1 = X_2' = 1,5$  Ом, струм холостого ходу  $I_{10} = 5,5$  А та коефіцієнт потужності при синхронному обертанні  $\cos\phi_{10} = 0,12$ ; механічні додаткові втрати складають 1,5% від  $P_n$ .

2. АД має такі параметри:  $R_1 = 0,003$ ;  $R_2' = 0,02$ ;  $X_1 = 0,11$ ;  $X_2' = 0,11$ . Побудувати кругову діаграму для номінальної напруги та визначити по ній кратність максимального моменту двигуна. Механічними та додатковими втратами знехтувати. Коефіцієнт потужності двигуна в номінальному режимі  $\cos\phi_{1n} = 0,85$ , струм холостого ходу при синхронному обертанні  $I_1 = 0,35$ .

3. Активний опір статорної обмотки асинхронного двигуна  $R_1 = 0,04$ . Індуктивні опори розсіювання обмоток  $X_1 = X_2' = 0,12$ . За допомогою кругової діаграми визначити зміни пускового моменту двигуна при збільшенні активного опору кола ротора від значення  $R_2' = 0,04$  до  $R_2' = 0,08$ .

4. Побудувати кругову діаграму восьмиполусного трифазного АД з ФР, що має такі номінальні дані:  $P_n = 22$  кВт;  $U_{1n} = 220$  В;  $f_1 = 50$  Гц;  $I_{1n} = 47$  А. Визначити для номінального режиму частоту обертання ротора, номінальний електромагнітний момент, максимальний електромагнітний момент та коефіцієнт потужності. Дані дослідів:

- холостого ходу –  $U_0 = 220$  В;  $I_0 = 19,5$  А;  $P_0 = 0,705$  кВт;
- короткого замикання –  $U_k = 44$  В;  $I_k = 47$  А;  $P_k = 2,145$  кВт.

Активний опір фази обмотки статора  $R_1 = 0,14$  Ом.

Механічними втратами знехтувати.

## Практична робота №7

### ДОСЛІДЖЕННЯ СПОСОБІВ ПУСКУ ТРИФАЗНИХ АД

**Мета роботи.** Набути практичних навичок розв'язання задач на визначення пускових струмів, моментів, кратностей цих величин при різних способах пуску; дослідити способи пуску трифазних АД.

#### 7.1 Програма виконання практичної роботи

1. Ознайомитися з будовою лабораторного стенду, записати номінальні величини електричних машин і підібрати відповідні вимірювальні пристрої.
2. Дослідити способи пуску АД з КР:
  - а) прямий пуск;
  - б) пуск при пониженій напрузі.
3. Дослідити реостатний пуск АД з ФР.

#### 7.2 Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи

##### 7.2.1 Будова практичного стенду

Малопотужний трифазний АД з КР, що досліджується в дослідах 2 а та 2 б (п. 7.1), змонтований на окремії переносній плиті, на яку виведені всі кінці обмотки статора, закріплена табличка з номінальними даними. Для можливості гальмування валу ротора закріплена металева втулка, в якій просвердлено наскрізний отвір, через який в трубку, прикріплену до плити, вставляється металева шпилька, що загальмовує ротор.

Для забезпечення можливості вимірювання ковзання ротора, що обертається, стробоскопічним методом на його валу закріплений диск із білими і чорними секторами, який освітлюється неоновією лампочкою, закріпленою на плиті. Лампочку включають тумблером, встановленим на плиті, при поданій напрузі на двигун.

АД з ФР знаходиться під стендом, а кінці його обмоток статора і ротора виведені на похилу панель стенду. Туди ж виведені кінці фаз пускового реостата  $R_n$ , рукоятка якого розташована вище на вертикальній панелі стенду. У нульовому положенні рукоятки  $R_n = R_{nmax}$ .

Для відліку часу при вимірюванні гальмування обох двигунів на передній панелі стенду є електросекундомір, що включається тумблером SA5.

Вимірювання ковзання ротора фазного двигуна проводиться методом магнітоелектричного приладу, суть якого полягає в наступному. Частота ЕРС

(струму) в обмотці ротора  $f_2 = sf_1$  при  $s = (0,01 \div 0,06)$  складає всього  $(0,5 \div 3)$  Гц. Тому її можна виміряти за допомогою електровимірювального приладу магнітоелектричної системи з нулем посередині шкали. Це може бути амперметр, включений в коло однієї фази ротора, або вольтметр, приєднаний через щітки до двох контактних кілець. Вимірявши число  $z_1$  повних коливань стрілки приладу за час  $t$  (с) та знаючи частоту  $f_1 = 50$  Гц, розраховують ковзання  $s = f_2/f_1$ .

Реактори (реактивні опори  $X_L$ ) змонтовані на зворотному боці столу, а їхні кінці виведені на похилу частину передньої панелі стенду.

### 7.2.2 Пуск АД з КР

Пуск двигунів з короткозамкнутим ротором виконують за допомогою наступних способів.

*Прямий пуск* – найпростіший і самий поширений спосіб пуску. Для пуску обмотку статора збирають в  $\Delta$  і безпосередньо включають на повну напругу мережі. Студентам пропонується розробити схему самостійно, а після затвердження викладачем зібрати її та виміряти лінійні значення пускового струму  $I_{nл}$  і фазної напруги  $U_{nф}$ .

*Попередження.* Тримати під напругою загальмований двигун можна не більше 10 с, оскільки внаслідок великого струму він швидко перегрівається.

Якщо при пуску виміряна напруга відрізняється від номінальної, то необхідно розрахувати дійсний пусковий струм, що відповідає  $U_{1ном}$ , за формулою:

$$I_{n\delta} = \frac{I_{nл} U_{1ном}}{U_{nф}} \quad (7.1)$$

і його кратність:

$$k_{nл} = \frac{I_{n\delta}}{I_{1ном}}. \quad (7.2)$$

Дані вимірювань і розрахунків занести до табл. 7.1.

**Таблиця 7.1. Дані прямого пуску та пуску перемиканням Y–Δ**

Схема обмотки статора	Дослід			Розрахунки		
	$U_{nф}$ , В	$I_{nл}$ , А	$I_{nδ}$ , А	$K_{nл}$ , в.о.	$\frac{U_{nфY}}{U_{nфΔ}}$	$\frac{I_{nδY}}{I_{nδΔ}}$
Δ						
Y						

*Пуск при зниженій напрузі.* У даній роботі досліджуються два способи пуску при зниженій напрузі:

- пуск перемиканням Y–Δ;
- реакторний пуск.

*Пуск перемиканням Y–Δ* застосовується тоді, коли в нормальному режимі роботи двигуна обмотка статора з'єднаною в Δ.

На час пуску обмотку статора з'єднують в Y. При дослідженні пускових характеристик АД із з'єднанням його обмотки статора Y, потрібно розробити схему з урахуванням живлення від трифазної мережі з  $U_{ном} = 220$  В і вмикання приладів для вимірювання фазних напруги і струму при загальмованому роторі.

Схему представити викладачу і після затвердження зібрати її, провести дослід, а результати вимірювань занести до табл. 7.1.

Досліджуваний в роботі АД при з'єднанні обмотки статора Δ/Y розрахований на напругу  $U_{ном} = 220/380$  В. Тому пуск АД з обмоткою статора, з'єднаною в Δ, є прямим пуском, який досліджений раніше, і повторно досліджувати пуск зі з'єднанням в Δ немає необхідності. Для порівняння пускових струму і напруги при пуску на Y і на Δ необхідно використовувати дані прямого пуску, занесені до табл. 7.1.

*Реакторний пуск* дозволяє знизити напругу на двигуні й пусковий струм вмиканням на час пуску в фази статора індуктивних опорів (реакторів)  $X_L$ . Для дослідження збирають схему, зображену на рис 7.1. Загальмовують ротор, при вимкненому автоматі QF4 подають живлення на двигун, швидко вимірюють пускові струм і напругу, а результати заносять до табл. 7.2. Після цього ротор розгальмовують, здійснюють реакторний пуск і після повного розгону двигуна (після замикання реакторів автоматом QF4) вимірюють ковзання ротора стробоскопічним методом. Результати заносять до табл. 7.2.

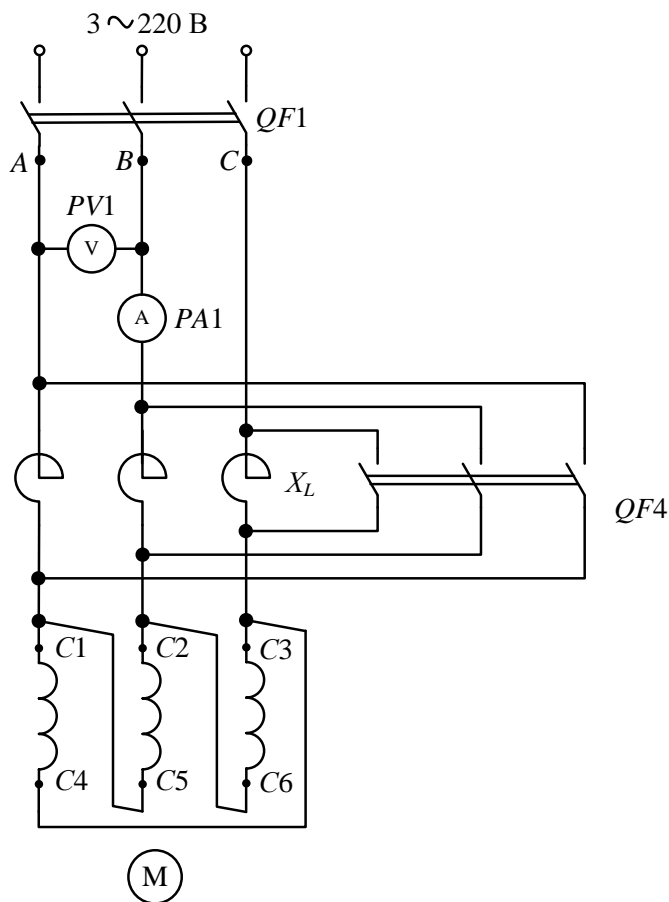


Рис. 7.1. Схема реакторного пуску АД з КР

Таблиця 7.2. Дані реакторного пуску АД з КР

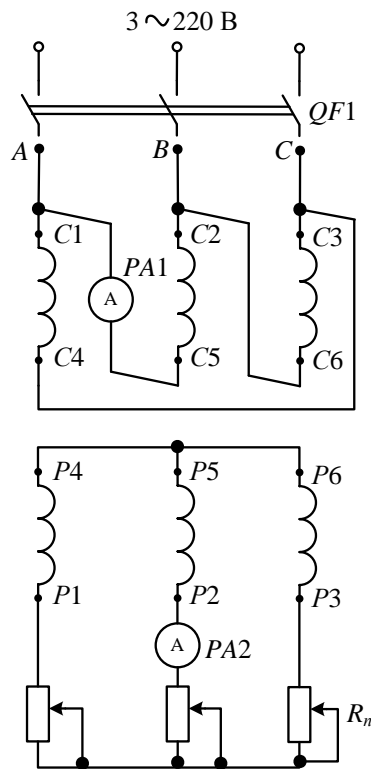
Пускові величини				Вимірювання ковзання			
$U_c,$ В	$U_o,$ В	$I_n,$ А	$\frac{I_n}{I_{ном}}$	$z,$ об	$t,$ с	$\Delta n = 60z/t,$ об/хв	$s = \Delta n/n,$ под./од.

### 7.2.3 Пуск АД з ФР

Двигун з фазним ротором запускають за допомогою пускового реостата  $R_n$  (рис. 7.2), що вмикається в коло обмотки ротора (реостатний пуск).

Перед пуском ручку  $R_n$  встановлюють в нульове положення ( $R_n = R_{n\max}$ ).  $R_{n\max}$  вибирають так, щоб початковий пусковий момент (при  $n = 0, s = 1$ )  $M_n = M_{\max}$ .





**Рис. 7.2. Схема реостатного пуску АД з ФР**

Після вмикання двигуна в мережу (включають автомат  $QF1$ ), по мірі розгону його ротора реостат  $R_n$  поступово виводиться до крайнього положення ( $R_n = 0$ ), в результаті чого двигун розженеться до максимальної частоти обертання. При розгоні двигуна на кожному ступені реостата  $R_n$  вимірюють струм статора і значення заносять до табл. 7.3. Після повного розгону ( $R_n = 0$ ) вимірюють ковзання ротора АД за допомогою амперметра магнітоелектричної системи, включеного в коло ротора. Результати заносять до табл. 7.3.

**Таблиця 7.3. Дані реостатного пуску АД з ФР**

Номер ступені	0	1	2	3	4	Вимірювання ковзання			
						$z_1$ , коливань	$t$ , с	$f_2 = z_1/t$ , Гц	$s = f_2/f_1$ , под./од.
$I_n$ , А									

**Задача 7.1.**

Побудувати механічну характеристику АД, який має номінальні параметри, наведені нижче.

Вихідні дані до розрахунку:

$$U := 220 \text{ В} \quad p := 1 \quad f := 50 \text{ Гц} \quad m := 3$$

$$P_{\text{ном}} := 10.5 \cdot 10^3 \text{ Вт} \quad n_{\text{ном}} := 2890 \text{ об/хв}$$

$$R1 := 0.263 \text{ Ом} \quad R'2 := 0.168 \text{ Ом}$$

$$X1 := 0.521 \text{ Ом} \quad X'2 := 0.892 \text{ Ом}$$

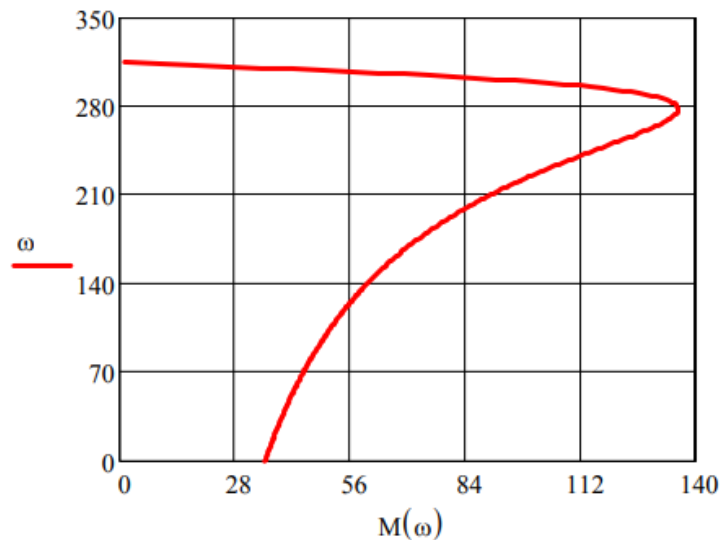
Розрахунок необхідних параметрів:

$$\omega_1 := 2\pi \cdot \frac{f}{p} \quad \omega_1 = 314.159 \text{ рад/с}$$

$$\omega := 0, 1 \dots \omega_1 \quad s(\omega) := \frac{\omega_1 - \omega}{\omega_1}$$

$$M(\omega) := \frac{m \cdot U^2 \cdot R'2 \cdot p}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot s(\omega) \cdot \left[ \left( R1 + \frac{R'2}{s(\omega)} \right)^2 + (X1 + X'2)^2 \right]}$$

Результат побудови механічної характеристики АД наведений на рис. 7.3.



**Рис. 7.3. Механічна характеристика АД**

### Задача 7.2.

АД з ФР з  $P_{ном} = 3$  кВт, розрахований на напругу 220/380 В з частотою 50 Гц, має активний опір фази ротора  $R_2 = 0,6$  Ом і частоту обертання 930 об/хв при номінальному навантаженні. Визначити опір реостата  $R_p$ , який необхідно увімкнути в коло ротора, щоб при незмінному моменті статичного навантаження  $M_c$  частота обертання двигуна була 800 об/хв.

*Розв'язок.*

Синхронна частота обертання АД

$$n_1 = \frac{60 \cdot 50}{3} = 1000 \text{ (об/хв)}.$$

Номінальне ковзання

$$s_{ном} = \frac{1000 - 930}{1000} = 0,07.$$

Ковзання при  $n = 800$  об/хв:

$$s_{800} = \frac{1000 - 800}{1000} = 0,2.$$

Тоді опір реостата, який необхідно ввести:

$$R_p = R_2 \cdot \left( \frac{s_{800}}{s_{ном}} - 1 \right),$$

$$R_p = 0,6 \cdot \left( \frac{0,2}{0,07} - 1 \right) = 1,11 \text{ (Ом)}.$$

### Контрольні питання

1. Будова і принцип дії АД з ФР та АД з КР.
2. Суть, переваги та недоліки прямого пуску.
3. Суть, переваги та недоліки пуску перемиканням  $\Delta$ - $Y$ .
4. Суть, переваги та недоліки реакторного пуску.
5. Суть, переваги та недоліки автотрансформаторного пуску.
6. Вплив активних і реактивних опорів обмоток статора і ротора на вигляд механічних характеристик двигуна.
7. Пуск АД з ФР.
8. АД з покращеними пусковими властивостями.
9. Способи вимірювання ковзання АД.

#### 7.4 Задачі до самостійного розв'язування

1. Визначити повний опір однієї фази АД з КР при його прямому пуску, а також його складові, якщо в цьому режимі він споживає з мережі активну потужність  $P_k = 1840$  Вт і лінійний струм  $I_{кл} = 5,3$  А.

2. Розрахувати фазні й лінійні значення пускових струмів АД при з'єднанні обмотки статора в  $\Delta$  і  $Y$  при напрузі мережі  $U_{ном} = 220$  В і повному опорі фази двигуна  $Z_{кф} = 72$  Ом.

3. Знайти значення пускового моменту двигуна при пуску його перемиканням  $Y-\Delta$ , якщо кратність його пускового моменту  $k_{нМ} = 1,2$ .

4. Розрахувати опір реактора, який потрібно включити в коло статорної обмотки короткозамкненого двигуна для того, щоб обмежити його пусковий струм до  $I_{1к} = I_{1ном}$ , якщо активний і реактивний опори фази двигуна відповідно рівні  $R_{кф} = 65,5$  Ом та  $X_{кф} = 29,9$  Ом.

5. Визначити кратність пускового моменту АД при реакторному пуску при обмеженні його пускового струму до значення  $1,5I_{1ном}$ , якщо при прямому пуску кратності пускового струму  $k_{нIпр} = 4,2$  і пускового моменту  $k_{нMпр} = 1,35$ .

6. Знайти пусковий струм статора АД й струм, споживаний з мережі при автотрансформаторному пуску його, якщо напруга мережі  $U_{ном} = 380$  В, коефіцієнт трансформації автотрансформатора  $k_a = \sqrt{3}$ , а фазний пусковий струм при прямому пуску двигуна  $I_{нпр} = 3,06$  А. У скільки разів зміниться пусковий момент при автотрансформаторному пуску в порівнянні із прямим пуском.

7. Розрахувати опір пускового реостата, який необхідно ввести в коло ротора АД з ФР, щоб його пусковий момент був рівним максимальному. Власний приведені активний опір обмотки ротора  $R'_2 = 3,65$  Ом, індуктивні опори розсіювання обмоток статора й приведеного ротора відповідно  $X_1 = 2,86$  Ом і  $X'_2 = 2,84$  Ом. Коефіцієнт приведення  $T$ -подібної схеми заміщення до  $\Gamma$ -подібної  $C_1 = 1,1$ . Коефіцієнт трансформації ЕРС двигуна знайти за його номінальними величинами.

8. Визначити значення споживаного з мережі пускового струму й пускового моменту АД з контактними кільцями при виведеному й повністю введеному реостаті, якщо активні й індуктивні опори розсіювання обмоток статора й приведеного ротора мають значення  $R_1 = 3,6$  Ом,  $R'_2 = 3,7$  Ом,  $X_1 = 2,86$  Ом,  $X'_2 = 2,84$  Ом, повний активний і реактивний опори вітки намагнічування  $\Gamma$ -подібної схеми заміщення рівні  $5$  Ом і  $32,5$  Ом, приведені опір пускового

реостата  $R'_n = 1,8 \text{ Ом}$ , коефіцієнт приведення  $T$ -подібної схеми до  $\Gamma$ -подібної схеми заміщення  $C_1 = 1,1$ , коефіцієнти трансформації ЕРС і струму АД  $k_E = k_i = 2,67$ , фазна напруга живлення  $U_{1\text{фном}} = 220 \text{ В}$ .

9. При навантаженні асинхронного двигуна, який підключений до мережі напругою  $220 \text{ В}$  електромагнітним гальмом (генератором постійного струму) отримано наступні значення вимірних величин: споживана потужність –  $3600 \text{ Вт}$ ; частота обертання ротора –  $1430 \text{ об/хв}$ ; струм в обмотці статора –  $10,8 \text{ А}$ ; корисний обертовий момент на валу двигуна –  $19,5 \text{ Н}\cdot\text{м}$ . Визначити значення ККД і коефіцієнта потужності двигуна.

10. Частота обертання восьмиполусної АМ  $n = 710 \text{ об/хв}$ . Який додатковий опір потрібно ввести в фазу обмотки ротора для заміщення ротора, що обертається, нерухомим, якщо активний опір фази обмотки ротора  $R_2 = 0,27 \text{ Ом}$ ? Яка потужність виділиться в додатковому опорі при струмі ротора  $I_2 = 30 \text{ А}$ ? Частота мережі  $50 \text{ Гц}$ .

11. Розрахувати та побудувати в ППП MathCAD механічну характеристику трифазного АД типу 4А160М4У3 ( $18,5 \text{ кВт}$ ,  $1465 \text{ об/хв}$ ,  $M_{\text{max}}/M_{\text{ном}} = 2,3$ ;  $M_n/M_{\text{ном}} = 1,0$ ) у відносних одиницях  $s = f(M)$  за спрощеною формулою Клосса.

## Практична робота №8

### ПОРІВНЯННЯ РОБОЧИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ АД В ТРИФАЗНОМУ Й ОДНОФАЗНОМУ РЕЖИМАХ

**Мета роботи.** Набути практичних навиків розв'язання завдань на порівняння робочих властивостей трифазного й однофазного режимів роботи АД, дослідити й порівняти ці властивості.

#### 8.1. Програма виконання практичної роботи

1. Перед виконанням лабораторної роботи студентам необхідно ознайомитися:

- з роботою трифазного двигуна в однофазному режимі й відмінністю його робочих властивостей від властивостей трифазного АД;
- з будовою лабораторної установки. Записати номінальні величини машин, підібрати відповідні їм вимірювальні прилади.

2. Дослідним шляхом зняти робочі характеристики двигуна:

- у трифазному режимі;
- в однофазному режимі.

3. За дослідними даними для трифазного й однофазного режимів побудувати робочі характеристики:

- $(P_1, n, \eta) = f(P_2)$  – в одних координатних осях;
- $(I_1, M_2, \cos\varphi_1) = f(P_2)$  – в інших.

4. Визначити коефіцієнт використання трифазного двигуна в однофазному режимі.

#### 8.2 Методичні вказівки до виконання практичної роботи

##### 8.2.1 Робота трифазного двигуна в однофазному режимі

При обриві однієї з фаз, наприклад фази  $B$  (рис. 1.38), трифазний двигун переходить в однофазний режим, тому що фази  $A$  і  $C$  виявляються з'єднаними послідовно і являють собою однофазну обмотку. Всі явища в трифазному двигуні, що перейшов в однофазний режим роботи, аналогічні явищам в однофазному двигуні.

Двигун також не буде мати при  $s = 1$  пускового моменту, але якщо обрив відбувся під час обертання двигуна, то він буде продовжувати обертатися з тим же навантаженням на валу, але робочі властивості його зміняться.

Порівняємо робочі властивості трифазного двигуна в трифазному й

однофазному режимі роботи при незмінних навантаженні на валу й напрузі живлення мережі.

**Корисна потужність на валу  $P_2$ .** При незмінному моменті навантаження  $M_c$  на валу, рівному корисному моменту двигуна  $M_2$ , його корисна потужність  $P_2 = M_2\omega$  практично не зміниться, тому що кутова швидкість обертання ротора  $\omega = (1-s)\omega_1$  зміниться дуже мало навіть при значній зміні ковзання  $s$ . Тому при переході трифазного двигуна з в однофазний режим роботи потужність на валу практично не змінюється:

$$P_{2(1)} \approx P_{2(3)} \approx \text{const.} \quad (8.1)$$

Тут і в подальшому індекс (1) відноситься до однофазного режиму роботи трифазного АД, а індекс (3) – до трифазного.

**Магнітний потік машини  $\Phi$**  при переході АД з трифазного в однофазний режим також залишається незмінним. Це пояснюється тим, що при незмінній напрузі мережі магніторушійна сила однофазної обмотки буде рівною магніторушійній силі трифазної обмотки, тобто

$$\Phi_{(1)} = \Phi_{(3)} = \text{const.} \quad (8.2)$$

Тому струм намагнічування (струм холостого ходу) також практично не зміниться.

**Струм  $I_1$ , що споживається з мережі.** Потужність, що споживається двигуном з мережі в трифазному режимі

$$P_{1(3)} = \sqrt{3}U_{\text{л}} I_{1(3)} \cos\varphi_{1(3)} \quad (8.3)$$

та в однофазному режимі

$$P_{1(1)} = U_{\text{л}} I_{1(1)} \cos\varphi_{1(1)}. \quad (8.4)$$

Корисна потужність на валу відповідно

$$P_{2(3)} = P_{1(3)}\eta_{(3)} = \sqrt{3}U_{\text{л}} I_{1(3)} \cos\varphi_{1(3)}\eta_{(3)} \quad (8.5)$$

і

$$P_{2(1)} = P_{1(1)}\eta_{(1)} = U_{\text{л}} I_{1(1)} \cos\varphi_{1(1)}\eta_{(1)}. \quad (8.6)$$

Оскільки

$$\cos\varphi_{1(3)}\eta_{(3)} \approx \cos\varphi_{1(1)}\eta_{(1)} \quad (8.7)$$

(буде доведено далі), то з рівності  $P_{2(1)} \approx P_{2(3)}$  маємо

$$I_{1(1)} = \sqrt{3}I_{1(3)}. \quad (8.8)$$

Тому при обриві однієї фази трифазного АД при незмінному навантаженні на валу струм, що споживається з мережі, збільшиться в  $\sqrt{3}$  раз. Якщо в цьому випадку двигун вчасно не відключити від мережі або не знизити навантаження, то він швидко вийде з ладу.

**Коефіцієнт потужності  $\cos\varphi_1$ .** Повний струм двигуна  $\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + (-\dot{I}'_2)$ . Оскільки  $I_{0(1)} \approx I_{0(3)}$ , а  $I_{1(1)} = \sqrt{3}I_{1(3)}$ , то звідси випливає, що збільшення струму  $I_1$  відбувається за рахунок збільшення струму ротора  $I'_2$ , що є активною складовою струму  $I_1$  ( $I'_2 = I_{1a}$ ). Тому коефіцієнт потужності

$$\cos\varphi_{1(1)} = \frac{I_{1a(1)}}{I_{1(1)}} > \cos\varphi_{1(3)} = \frac{I_{1a(3)}}{I_{1(3)}}. \quad (8.9)$$

З метою усунення перевантаження за струмом навантаження на валу двигуна в однофазному режимі знижують на 40–50%; при цьому  $\cos\varphi_{1(1)} < \cos\varphi_{1(3)}$ .

**Коефіцієнт корисної дії  $\eta$ .** ККД визначається за формулою

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta p_\Sigma} = 1 - \frac{\Delta p_\Sigma}{P_1}.$$

З переходом трифазного двигуна в однофазний режим при незмінних  $M_c$ ,  $P_2$ ,  $U_n$ ,  $f_1$ ,  $\Phi$  і  $\omega_{(1)} \approx \omega_{(3)}$  магнітні  $\Delta p_{m1}$  й механічні  $\Delta p_{mex}$  втрати практично не міняються. За рахунок збільшення струмів статора  $I_1$  й ротора  $I_2$  електричні втрати в їхніх обмотках  $\Delta p_{ел1}$  і  $\Delta p_{ел2}$ , а також додаткові  $\Delta p_\delta$ , що залежать від квадрата струму, різко зростають, тому

$$\Delta p_{\Sigma(1)} = \Delta p_{\Sigma(3)} \quad (8.10)$$

і

$$\eta_{(1)} < \eta_{(3)}. \quad (8.11)$$

Але раніше було доведено, що при  $M_c = M_2 = const$   $\cos_{1(3)} > \cos_{1(1)}$ , тому

$$\cos\varphi_{1(1)}\eta_{(1)} \approx \cos\varphi_{1(3)}\eta_{(3)}. \quad (8.12)$$

### 8.2.2 Будова практичної установки

Лабораторна установка складається з трифазного АД з КР, навантаження на валу якого створюється генератором постійного струму з незалежним



збудженням. Для збільшення гальмівного моменту генератора  $M_G = c_m \Phi I_a$ , а тому і навантаження на валу двигуна М в коло навантаження генератора G включена узгоджено з шунтовою обмоткою F1–F2 серієсна обмотка збудження D1–D2. Для дослідження двигуна в трифазному режимі збирають схему у відповідності до рис. 8.1.

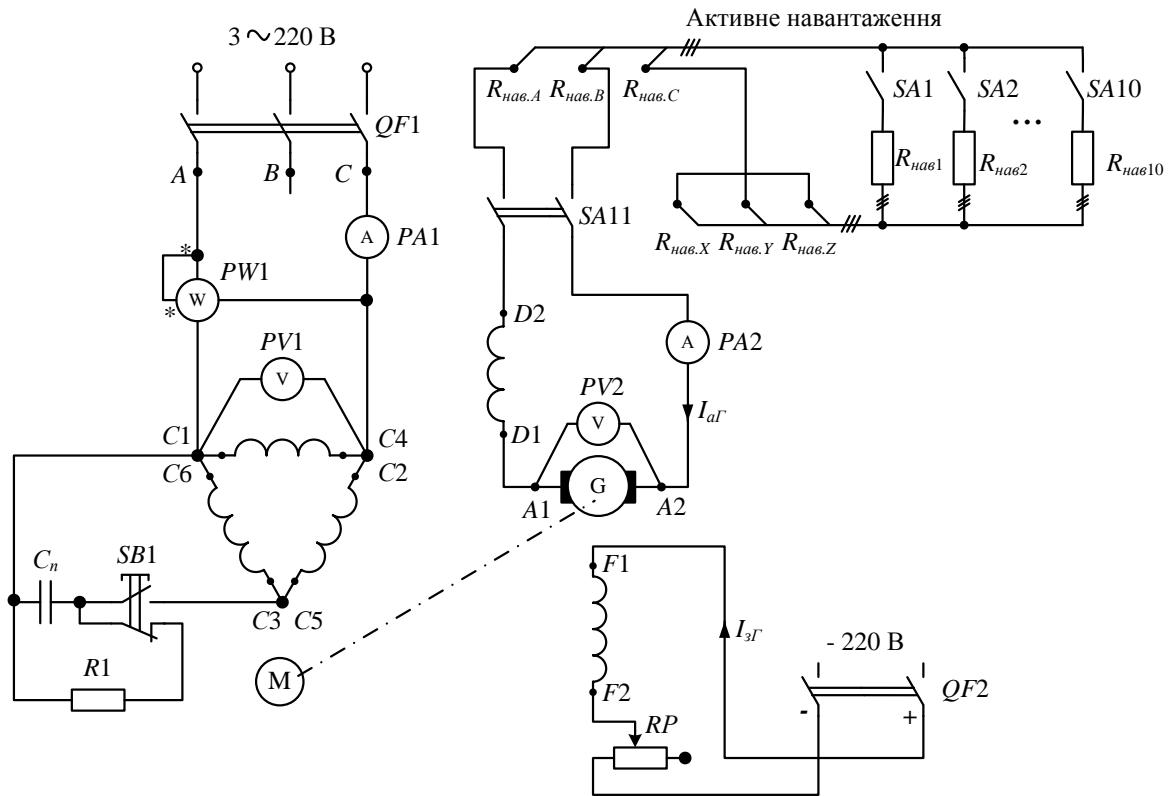
Обмотку статора збирають у  $\Delta$ , пуск двигуна здійснюють плавним підвищенням напруги живлення через РНТ T1. Навантаження на валу двигуна змінюють регулюванням струмів якоря  $I_{aG}$  й збудження  $I_{zG}$  генератора G.

При дослідженні двигуна в однофазному режимі обмотку статора також збирають у  $\Delta$ , але підключають її до двох фаз мережі (рис. 8.2).

У цьому випадку для створення пускового моменту паралельно одній з фаз статора (рис. 8.2 фаза C3–C6 ) на час пуску через пускову кнопку SB1 включається пускова ємність  $C_n$ . Для пуску двигуна натискають кнопку SB1, в результаті чого паралельно фазі статора підключається ємність  $C_n$ . Після цього подається живлення на статор автоматом QF1. Як тільки двигун почне обертатися, кнопку SB1 відпускають, при цьому через її нормально замкнуті контакти ємність  $C_n$  замикається на розрядний опір R1.

Пуск двигуна в обох випадках (рис. 8.1 та рис. 8.2) здійснюється на холостому ході ( $I_{aG} = 0$ ). Частоту обертання двигуна вимірюють електронним тахометром або вимірюванням ковзання ротора стробоскопічним методом.





**Рис. 8.2. Схема практичної установки для дослідження роботи АД в однофазному режимі**

Зняти 5-6 точок, у тому числі при  $I_1 = I_{1ном}$ . Результати вимірювань занести до табл. 8.1.

**Таблиця 8.1. Дані режиму навантаження трифазного АД при живленні від трифазної мережі**

№ п/п	Дослід							Розрахунок						
	$U_1$ , В	$I_1$ , А	$P_1$ , Вт	$P_{II}$ , Вт	$n$ , хв <sup>-1</sup>	$U_G$ , В	$I_{aГ}$ , А	$P_1$ , Вт	$s$ , в.о.	$P_G$ , Вт	$\eta$ , в.о.	$P_2$ , Вт	$M_2$ , Н·м	$\cos\varphi_1$ , в.о.
1														
2														
...														

Розрахункові формули до табл. 8.1:

потужність  $P_1$ , що споживається з мережі, – формула

$$P_1 = 3U_1 I_1 \cos\varphi_1,$$

ковзання  $s$  – формула

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{\omega_1 - \omega}{\omega_1},$$

потужність генератора  $P_G$  – формула

$$P_G = U_G I_{aG}.$$

корисна потужність на валу  $P_2$  – формула

$$P_2' = \beta_{\max} P_{2\text{ном}}.$$

момент на валу двигуна – формула

$$M_2 = \frac{9,55 P_2}{n};$$

коефіцієнт потужності –

$$\cos\varphi_1 = P_1 / \sqrt{3} U_1 I_1. \quad (8.13)$$

В однофазному режимі зібрати схему у відповідності до рис. 8.2. Запустити двигун за методикою, описаної раніше, зняти робочі характеристики аналогічно трифазному режиму й результати вимірювань занести до табл. 8.2.

**Таблиця 8.2. Дані режиму навантаження трифазного АД при живленні від однофазної мережі**

№ п/п	Дослід						Розрахунок					
	$U_1,$ В	$I_1,$ А	$P_1,$ Вт	$n,$ хв <sup>-1</sup>	$U_G,$ В	$I_{aG},$ А	$s,$ в.о	$P_G,$ Вт	$\eta,$ в.о.	$P_2,$ Вт	$M_2,$ Н·м	$\cos\varphi_1,$ в.о.
1												
2												
...												

Розрахункові формули до табл. 8.2:

- коефіцієнт потужності –

$$\cos\varphi_1 = P_1 / U_1 I_1; \quad (8.14)$$

- інші величини розраховуються за тими ж самими формулами, що й для трифазного режиму.

За даними табл. 8.1 і табл. 8.2 побудувати робочі характеристики.

### 8.2.4 Визначення коефіцієнта використання двигуна

Коефіцієнтом використання трифазного двигуна в однофазному режимі  $k_{(3 \rightarrow 1)}$  називається відношення корисної потужності двигуна в однофазному режимі, взятої при  $I_{1(1)} = I_{1ном(3)}$ , до номінальної потужності трифазного режиму (паспортної величини):

$$k_{(3 \rightarrow 1)} = \frac{P_{2ном(1)}}{P_{2ном(3)}}. \quad (8.15)$$

В більшості АД  $k_{(3 \rightarrow 1)} \approx 0,4 \div 0,6$ .

#### Задача 8.1.

Дані трифазного дво полюсного ( $p=2$ ) АД із під'єднанням обмоток у зірку такі:  $U_{ном} = 380$  В;  $I_{ном} = 5,6$  А;  $P_{ном} = 2,8$  кВт;  $f = 50$  Гц;  $\eta_{ном} = 84\%$ ;  $R_1 = 1,8$  Ом;  $R_2' = 2,9$  Ом;  $X_1 = 2,9$  Ом;  $X_2' = 3,6$  Ом;  $X_m = 102$  Ом. Необхідно визначити:

- номінальну частоту обертання при втратах на тертя й вентиляцію  $\Delta p_{тр.в} = 0,01 P_{ном}$ , нехтуючи втратами в сталі ротора;
- струм короткого замикання й пусковий момент двигуна.

Розв'язок.

Споживана потужність двигуна:

$$P_{1ном} = \frac{P_{ном}}{\eta_{ном}},$$

$$P_{1ном} = \frac{2800}{0,84} = 3333 \text{ (Вт)}.$$

Коефіцієнт потужності статора:

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_{1ном}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном} \cdot I_{ном}},$$

$$\cos \varphi_1 = \frac{3333}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 5,6} = 0,904.$$

Струм статора у векторній формі:

$$\dot{I}_1 = I_{1ном} \cdot \cos \varphi_1 + j I_{1ном} \cdot \sin \varphi_1,$$

$$\dot{I}_1 = 5,6 \cdot 0,904 + j 5,6 \cdot \sqrt{1 - 0,904^2} = 5,6 + j 2,4 \text{ (А)}.$$

Наближене значення струму холостого ходу:

$$i_0 = j \frac{U_{ном} / \sqrt{3}}{X_1 + X_\mu},$$

$$i_0 = j \frac{380 / \sqrt{3}}{2,9 + j102} = j2,09 \text{ (A)}.$$

Припустимо, що струм холостого ходу при навантаженні не змінюється, приведений струм ротора:

$$i'_2 = i_0 - i_1,$$

$$i'_2 = j2,09 - 5,6 - j2,4 = -5,6 - j0,29 \text{ (A)}.$$

$$I'_2 = \sqrt{\text{Re}(i'_2)^2 + \text{Im}(i'_2)^2},$$

$$I'_2 = 5,07 \text{ (A)}.$$

Втрати в обмотці ротора:

$$\Delta p_{ел2} = 3 \cdot I_2'^2 \cdot R_2',$$

$$\Delta p_{ел2} = 3 \cdot 5,07^2 \cdot 2,9 = 223,9 \text{ (Вт)}.$$

Механічна потужність:

$$\Delta p_{мех} = P_{ном} + \Delta p_{тр в} = P_{ном} + 0,01 \cdot P_{ном},$$

$$\Delta p_{мех} = 2800 + 0,01 \cdot 2800 = 2828 \text{ (Вт)}.$$

Номінальне ковзання:

$$s_{ном} = \frac{\Delta p_{ел2}}{\Delta p_{ел2} + \Delta p_{мех}},$$

$$s_{ном} = \frac{223,9}{223,9 + 2828} = 0,073.$$

Повний опір короткого замикання:

$$Z_k = \sqrt{(R_1 + R_2')^2 + (X_1 + X_2')^2},$$

$$Z_k = \sqrt{(1,8 + 2,9)^2 + (2,9 + 3,9)^2} = 8,02 \text{ (Ом)}.$$

Струм короткого замикання:

$$I_{1к} \approx I'_{2к} = \frac{U_{ном} / \sqrt{3}}{Z_к},$$

$$I'_{2к} = \frac{380 / \sqrt{3}}{8,02} = 27,35 \text{ (А)}.$$

Синхронна частота обертання:

$$n_0 = 60 \cdot 50 / p,$$

$$n_0 = 60 \cdot 50 / 2 = 1500 \text{ (об/хв)}.$$

Пусковий момент:

$$M_n = 9,55 \cdot \frac{3}{n_0} \cdot I'_{2к} R'_2,$$

$$M_n = 9,55 \cdot \frac{3}{1500} \cdot 27,35 \cdot 2,9 = 41,4 \text{ (Н·м)}.$$

### Контрольні питання

1. Будова і принцип роботи трифазного АД.
2. Фізичні умови роботи АД з однофазною обмоткою на статорі при нерухомому й обертовому роторі.
3. Способи пуску однофазних АД.
4. Зобразити та пояснити вид механічної характеристики однофазного АД.
1. Ковзання ротора однофазного АД відносно полів прямої й зворотної послідовностей. Значення ЕРС і частоти струму в роторі, що наводяться цими полями.
5. Теоретично пояснити розбіжність робочих характеристик двигуна в трифазному й однофазному режимах.
6. Умови створення трифазною і двофазною обмотками статора кругового обертового магнітного поля.
7. Як реалізувати реверсування трифазного і однофазного АД.
8. Конденсаторний АД.

### 8.4 Задачі для самостійного розв'язання

1. Для АД, що використовується в лабораторній роботі, із заданими номінальними величинами визначити номінальне ковзання, споживані активну, реактивну й повну потужності, корисний момент на валу двигуна, а також фазні й лінійні струми та напруги для з'єднання обмотки статора в зірку й трикутник.

2. Для номінального трифазного режиму роботи АД із заданими номінальними величинами розрахувати: споживану активну потужність, фазний струм статора, повні втрати потужності у двигуні, електричні втрати в обмотках статора й ротора, додаткові втрати, електромагнітну й повну механічну потужності, повні змінні, постійні й механічні втрати двигуна. При розрахунку, прийняти магнітні втрати в сердечнику статора рівними 23% електричних втрат в обмотці статора.

3. У режимі номінального навантаження трифазний АД при з'єднанні обмотки статора в зірку відбувся обрив одного проводу, що з'єднує фазу АД з мережею. Знайти струм, що споживається з мережі, в однофазному режимі й електричні втрати в обмотках статора й ротора, якщо частота обертання ротора в трифазному режимі при незмінному навантаженні на валу знизилася до  $2700 \text{ хв}^{-1}$ , а електромагнітна потужність двигуна в однофазному й трифазному режимах 1630 Вт. Знайти електричні втрати в цих же обмотках у трифазному режимі й порівняти їх з аналогічними втратами однофазного режиму.

4. Знайти значення фазного струму статора, при якому втрати в обмотці статора в однофазному режимі будуть дорівнюють втратам у ній у трифазному режимі номінального навантаження при з'єднанні обмотки статора в зірку. Визначити для цього режиму повну потужність, що споживає двигун з мережі, в однофазному й трифазному режимах.

5. При переході АД з трифазного режиму в однофазний при номінальному навантаженні на валу струм, що споживається з мережі, зростає в  $\sqrt{3}$  раз. Знайти активну складову струму в однофазному режимі, якщо відомо, що зростання струму відбувається тільки за рахунок цієї складової. Реактивний струм у трифазному режимі  $I_{1p} = 1,6 \text{ А}$ . Визначити, як при цьому зміниться коефіцієнт потужності двигуна.

6. В обмотці нерухомого ротора однофазного двигуна, підключеного в мережу із частотою напруги  $f_1 = 50 \text{ Гц}$ , індукується ЕРС  $E_2 = 20 \text{ В}$ . Визначити значення частот ЕРС, що наводять у цій обмотці полями прямої і зворотної послідовностей при обертанні ротора з частотою  $2850 \text{ хв}^{-1}$ .

7. При живленні від мережі із частотою напруги  $f_1 = 50 \text{ Гц}$  ротор однофазного двигуна обертається із частотою  $n = 345 \text{ хв}^{-1}$ . При цьому полем прямої послідовності в обмотці ротора наводиться ЕРС  $E_{2s} = 2,4 \text{ В}$ . Розрахувати ковзання ротора відносно полів прямої та зворотної послідовностей, значення й частоту ЕРС ротора від поля зворотної послідовності.



## Список літератури

1. Стаднік М.І., Видмиш А.А., Штуць А.А. Колісник М.А. Інтелектуальні системи в електроенергетиці. Теорія та практика: навч. посіб. Вінниця. ТОВ "ТВОРИ". 2020. 332 с.
2. Матвійчук В. А., Стаднік М. І., Рубаненко О. О. Електропривод виробничих машин і механізмів. Навчальний посібник з виконання курсової роботи для спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. Вінниця: ВНАУ. 2016. с. 92
3. Видмиш А.А., Ярошенко Л.В. Основи електропривода. Теорія та практика. Частина 1. Вінниця: ТОВ "ТВОРИ". 2020. 390 С.
4. Основи Інженерних методів розрахунків на міцність і жорсткість. Г. М. Калетнік, М. Г. Чусов, В. М. Швайко та ін. 2010. 616 с.
5. Рубаненко О.Є. Високовольтні вводи. Конструкція, експлуатація, діагностика і ремонт : монографія О. Є. Рубаненко, О. І. Гуменюк Вінниця: ВНТУ, 2011. 183 с.
6. Видмиш А. А., Трошин О. І. Теорія електропривода. Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2003.
7. Видмиш А.А. Теоретична механіка. Динаміка. РГ та КР: А. А. Видмиш, В. О. Приятельчук, В. О. Федотов. – Вінниця: ВНТУ, 2009. – 143 с.
8. Загірняк М. В. Електричні машини: підручник М. В. Загірняк, Б. І. Невзлін. 2-ге вид., перероб. і доповн. Київ: Знання, 2009. 399 с.
9. Онушко В. В. Електричні машини: навч. посібник В. В. Онушко, О. В. Шефер. – Полтава: ПолтНТУ, 2010. 487 с.
10. Некрасов В. А. Электрические машины: конспект лекций для студ. электротех. спец. В. А. Некрасов, А. В. Некрасов, А. В. Решетняк. Кременчуг: КГПУ. 2007. 159 с.

# ДОДАТКИ

Додаток А  
Одиниці міжнародної системи (SI)

Таблиця Д.1 – Одиниці міжнародної системи

Найменування величини	Одиниця		
	Назва	Позначення	
		Українське	Міжнародне
<i>Основні одиниці</i>			
Довжина	Метр	м	m
Маса	Кілограм	кг	kg
Час	Секунда	с	s
Сила електричного струму	Ампер	А	A
Термодинамічна температура	Кельвін	К	K
Кількість речовини	Моль	моль	mol
Сила світла	Кандела	кд	cd
<i>Додаткові одиниці</i>			
Плоский кут	Радіан	рад	rad
Тілесний кут	Стерадіан	ср	sr
<i>Похідні одиниці електричних і магнітних величин</i>			
Густина електричного струму	ампер на квадратний метр	А/м <sup>2</sup>	A/m <sup>2</sup>
Кількість електрики, електричний заряд	Кулон	Кл	C
Поверхнева густина електричного заряду	кулон на квадратний метр	Кл/м <sup>2</sup>	C/m <sup>2</sup>
Електрична напруга, електричний потенціал, різниця електричних потенціалів, ЕРС	Вольт	В	V
Напруженість електричного поля	вольт на метр	В/м	V/m
Електрична ємність	фарад	Ф	F
Абсолютна діелектрична проникність	фарад на метр	Ф/м	F/m
Електричний опір	ом	Ом	Ω
Питомий електричний опір	ом-метр	Ом·м	Ω·m
Електрична провідність	сименс	См	S
Питома електрична провідність	сименс на метр	См/м	S/m
Магнітний потік	вебер	Вб	Wb
Магнітна індукція	тесла	Тл	T
Індуктивність, взаємна індуктивність	генрі	Гн	H
Абсолютна магнітна проникність, магнітна стала	генрі на метр	Гн/м	H/m
Намагніченість, напруженість магнітного поля	ампер на метр	А/м	A/m
Магніторушійна сила	ампер	А	A
Магнітний опір	ампер на вебер	А/Вб	A/Wb
Магнітна провідність	вебер на ампер	Вб/А	Wb/A
Електромагнітна енергія	джоуль	Дж	J
Активна потужність	ват	Вт	W
Реактивна потужність	вар	вар	var

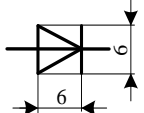

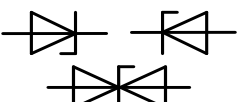


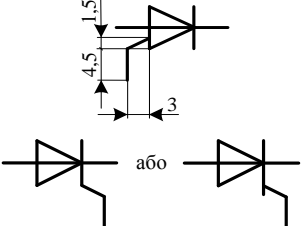
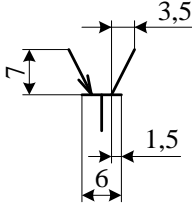

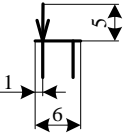

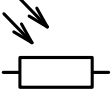

## Додаток Б

### УМОВНІ ГРАФІЧНІ ПОЗНАЧЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ СХЕМ

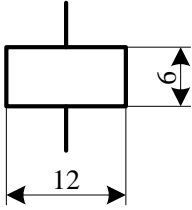

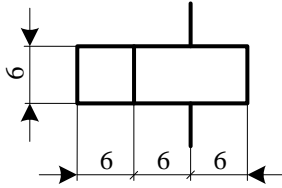
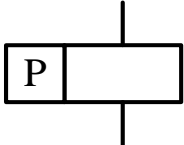
Таблиця Д.2 – Графічні позначення елементів згідно з ГОСТ 728-74  
(резистори, конденсатори)

Опис	Графічне позначення
Резистор постійний	
Резистор змінний	
Примітка: для змінного резистора у реостатному ввімкненні допускається використовувати таке позначення:	
1) загальне позначення	
2) з нелінійним регулюванням	
Шунт вимірювальний	
Конденсатор постійної ємності	
Примітка: для того щоб вказати полярність конденсатора використовують позначення	
Конденсатор змінної ємності	
Конденсатор електролітичний поляризований	
Конденсатор електролітичний неполяризований	

Таблиця Д.3 – Графічні позначення елементів згідно з ГОСТ 2.730-73 (прилади напівпровідникові)

Опис	Графічне позначення
Діод	
Тунельний діод	
Стабілітрон: 1) односторонній 2) двосторонній	
Варікап	
Діод Шоткі	
Тиристор тріодний, який запирається в зворотному напрямку:  1) з управлінням за анодом  2) з управлінням за катодом	
Транзистор PNP <i>Примітка:</i> Допускається позначення транзисторів зображати в дзеркальному положенні	
Транзистор NPN	
Транзистор польовий	
Транзистор польовий з ізолюваним затвором	
Фоторезистор:	
Фотодіод	

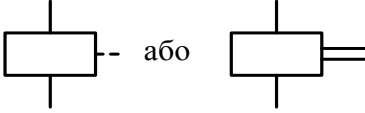
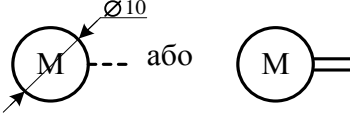
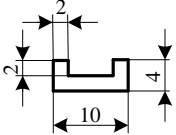
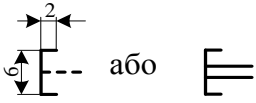
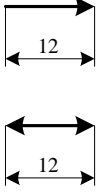
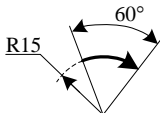
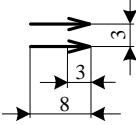
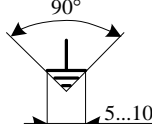
Таблиця Д.4 – Графічні позначення елементів згідно з ГОСТ 2.756-76 (сприймаюча частина електромеханічних пристроїв)

Опис	Графічне позначення
Котушка електромагнітного пристрою	
Котушка електромеханічного пристрою трифазного струму	
Котушка електромеханічного пристрою з додатковим графічним полем (у додатковому полі вказують уточнюючі дані електромеханічного пристрою)	
<p>Котушка електромеханічного пристрою з зазначенням виду обмотки:</p> <p>1) обмотка струму</p> <p>2) обмотка напруги</p> <p>3) обмотка максимального струму</p> <p>4) обмотка мінімальної напруги</p>	
Котушка поляризованого електромеханічного пристрою	

Таблиця Д.5 – Графічні позначення елементів згідно з ГОСТ 2.755-87 (пристрої комутаційні і контактні з'єднання)

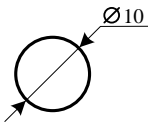
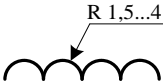
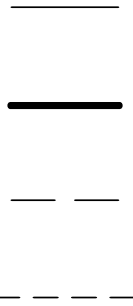
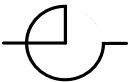
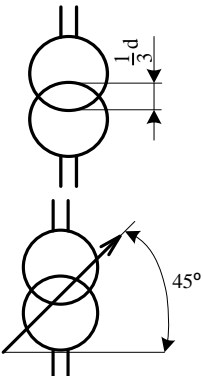
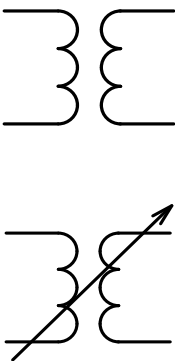
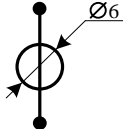
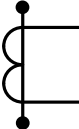
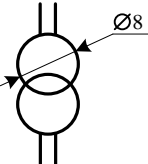
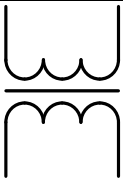
Опис	Графічне позначення
Нормально розімкнутий контакт комутаційного пристрою	
Нормально замкнутий контакт комутаційного пристрою	
Контакт комутаційного пристрою, який забезпечує переключення із нейтральним центральним положенням	
Контакт комутаційного пристрою, який забезпечує переключення без розмикання кола	
Вимикач кнопковий нажимний з нормально розімкнутим контактом	
Вимикач кнопковий нажимний з нормально замкнутим контактом	
Вимикач триполюсний	
Вимикач триполюсний з автоматичним спрацюванням максимального струму	
Контакт електротеплового реле при рознесеному способі зображення	
Реле електротеплове без само повернення	
Контакт кінцевого вимикача	

Таблиця Д.6 – Графічні позначення елементів згідно з ГОСТ 2.721-74  
(позначення загального застосування)

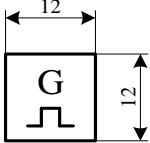



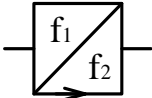
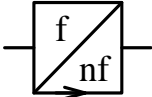
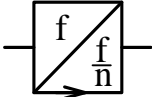

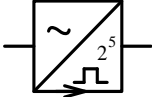

Опис	Графічне позначення
Електромагнітний привод	
Електромашинний привод	
Магніт постійний	
Привод ручний, який приводиться в рух натисненням кнопки	
Рух прямолінійний: 1) односторонній 2) з поверненням	
Обертальний рух	
Зв'язок оптичний	
Заземлення (загальне позначення)	



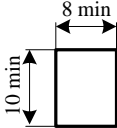


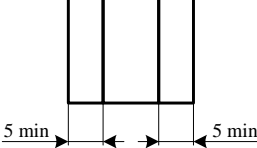
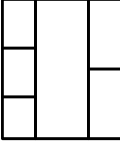
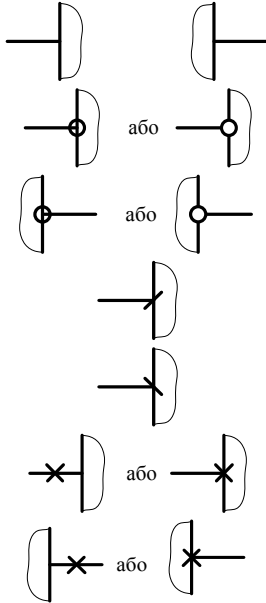
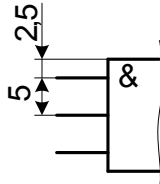
Таблиця Д.7 – Графічні позначення елементів згідно з ГОСТ 2.723-68 (катушки індуктивності, дроселі, трансформатори)

Опис	Графічне позначення	
	форма I	форма II
Обмотка трансформатора (силового), автотрансформатора, дроселя і магнітного підсилювача		
Магнітопровід 1) феромагнітний 2) феритовий (зображають товстою лінією) 3) феромагнітний з повітряним зазором 4) магнітодіелектричний <i>Примітка.</i> Кількість штрихів не встановлюється		
Реактор		
Трансформатор без магнітопровода 1) з постійним зв'язком <i>де d – діаметр</i> 2) з змінним зв'язком		
Трансформатор струму з одною вторинною обмоткою		
Трансформатор вимірювальний напруги		

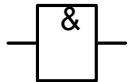
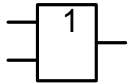
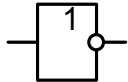
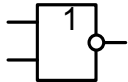
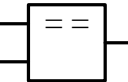
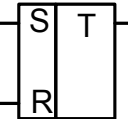
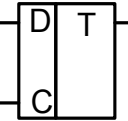
Таблиця Д.8 – Графічні позначення елементів згідно з ГОСТ 2.737-68 (пристрої зв'язку)

Опис	Графічне позначення
Генератор прямокутних імпульсів	
Генератор синусоїдальних коливань (50 Гц)	
Генератор з кварцовою стабілізацією	
Випрямляч	
Перетворювач постійного струму	
Інвертор	
Випрямляч-інвертор	
Перетворювач частоти $f_1$ в частоту $f_2$	
Помножувач частоти	
Подільник частоти	
Інвертор імпульсів	
Перетворювач змінного струму в бінарний код	
Формувач імпульсів	

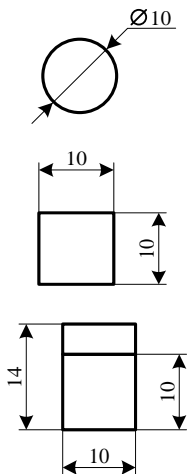
Таблиця Д.9 – Графічні позначення елементів згідно ГОСТ 2.743-91 (елементи цифрової техніки)

Опис	Графічне позначення
Елемент цифрової техніки, що має тільки основне поле	
Елемент цифрової техніки, що має основне поле і одне (праве) додаткове поле	
Елемент цифрової техніки, що має основне поле і одне (ліве) додаткове поле	
Елемент цифрової техніки, що має основне поле і два додаткових поля	
Елемент цифрової техніки, що має основне поле і два додаткових, які розділені на зони (кількість зон – необмежена)	
<p>Позначення виводів елементів</p> <p>прямий статичний вхід та вихід, відповідно</p> <p>інверсний статичний вхід</p> <p>інверсний статичний вихід</p> <p>прямий динамічний вхід</p> <p>інверсний динамічний вхід</p> <p>вивід, який не несе логічної інформації</p>	
Позначення логічного елемента з групою рівнозначних вводів	

Продовження таблиці Д.9

Опис	Графічне позначення
Елемент «І» («&»)	
Елемент «АБО» («1»)	
Елемент «НЕ»	
Елемент «АБО-НЕ»	
Компаратор	
RS-тригер	
D-тригер	

Таблиця Д.10 – Графічні позначення елементів згідно з ГОСТ 2.729-68 (прилади електровимірювальні)

Опис	Графічне позначення
<p>Прилад електровимірювальний:</p> <p>1) показу вальний</p> <p>2) реєстру вальний</p> <p>3) інтегрувальний (лічильник електричної енергії)</p>	

Додаток Д

**БУКВЕНІ ПОЗНАЧЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ**

Таблиця Д.11 – Буквені коди найбільш поширених елементів згідно з ГОСТ 2.710-81

Код	Елементи	Приклади елементів	Код
<i>A</i>	Пристрій (загальне позначення)		
<i>B</i>	Перетворювачі неелектричних величин в електричні (крім генераторів і джерел живлення) або навпаки; аналогові і багаторозрядні перетворювачі; сенсори для показу або вимірювання:	Гучномовець	<i>BA</i>
		магнітострикційний елемент	<i>BB</i>
		сельсин-приймач	<i>BE</i>
		сельсин-сенсор	<i>BC</i>
		тепловий сенсор	<i>BK</i>
		Фотоелемент	<i>BL</i>
		Мікрофон	<i>BM</i>
		сенсор тиску	<i>BP</i>
		п'єзоелемент	<i>BQ</i>
		Звукознімач	<i>BS</i>
	сенсор швидкості	<i>BV</i>	
<i>C</i>	Конденсатори		
<i>D</i>	Схеми інтегральні:	схема інтегральна аналогова	<i>DA</i>
		схема інтегральна, цифрова, логічний елемент	<i>DD</i>
		пристрій зберігання інформації	<i>DS</i>
		пристрій затримки	<i>DT</i>
<i>E</i>	Елементи різні:	нагрівальний елемент	<i>EK</i>
		лампа освітлювальна	<i>EL</i>
		Піропатрон	<i>ET</i>
<i>F</i>	Розрядники, запобіжники, пристрої захисту:	дискретний елемент захисту за струмом миттєвої дії	<i>FA</i>
		дискретний елемент захисту за струмом інерційної дії	<i>FP</i>
		запобіжник плавкий	<i>FU</i>
		дискретний елемент захисту за напругою, розрядник	<i>FV</i>
<i>G</i>	Генератори, джерела живлення:	Батарея	<i>GB</i>
<i>F</i>	Розрядники, запобіжники, пристрої захисту:	запобіжник плавкий	<i>FU</i>
		дискретний елемент захисту за напругою, розрядник	<i>FV</i>

Продовження таблиці Д.11



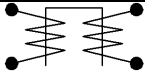



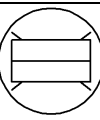
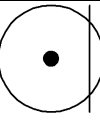
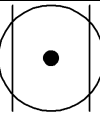
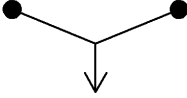
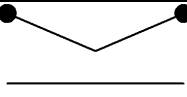
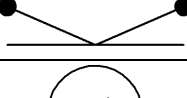



Код	Елементи	Приклади елементів	Код
<i>G</i>	Генератори, джерела живлення:	Батарея	<i>GB</i>
<i>H</i>	Пристрої індикаційні і сигнальні:	прилад звукової сигналізації	<i>HA</i>
		індикатор символний	<i>HG</i>
		прилад світлової сигналізації	<i>HL</i>
<i>K</i>	Реле, контактори, пускачі:	реле струмове	<i>KA</i>
		реле вказівне	<i>KH</i>
		реле електротеплове	<i>KK</i>
		контактор, магнітний пускач	<i>KM</i>
		реле часу	<i>KT</i>
<i>L</i>	Котушки індуктивності, дроселі, реактори	реле часу	<i>KV</i>
		дросель люмінесцентного освітлення	<i>LL</i>
<i>M</i>	Двигуни		
<i>P</i>	Прилади вимірювальні: <i>Примітка.</i> Поєднання <i>PE</i> є недопустимим	Амперметр	<i>PA</i>
		лічильник імпульсів	<i>PC</i>
		Частотомір	<i>PF</i>
		лічильник активної енергії	<i>PI</i>
		лічильник реактивної енергії	<i>PK</i>
		Омметр	<i>PR</i>
		реєструвальний прилад	<i>PS</i>
		годинник, вимірювач часу, дії	<i>PT</i>
		Вольтметр	<i>PV</i>
Ватметр	<i>PW</i>		
<i>Q</i>	Вимикачі і роз'єднувачі в силових колах:	вимикач автоматичний	<i>QF</i>
		короткозамикач	<i>QK</i>
		роз'єднувач	<i>QS</i>
<i>R</i>	Резистори:	терморезистор	<i>RK</i>
		потенціометр	<i>RP</i>
		шунт вимірювальний	<i>RS</i>
<i>S</i>	Пристрої комунікаційні в колах керування, сигналізації і вимірювальних: <i>Примітка.</i> Позначення <i>SF</i> використовують для апаратів, які не мають контактів в силових колах	вимикач або перемикач	<i>SA</i>
		вимикач кнопковий	<i>SB</i>
		вимикач автоматичний	<i>SF</i>
		вимикач, що спрацьовує від різних впливів:	
		Рівня	<i>SL</i>
		Тиску	<i>SP</i>
		положення (шляховий)	<i>SQ</i>
частоти обертання	<i>SR</i>		
Температури	<i>SK</i>		

Продовження таблиці Д.11

<b>Код</b>	<b>Елементи</b>	<b>Приклади елементів</b>	<b>Код</b>
<i>T</i>	Трансформатори, автотрансформатори:	трансформатор струму	<i>TA</i>
		електромагнітн. стабілізатор	<i>TS</i>
		трансформатор напруги	<i>TV</i>
<i>U</i>	Пристрої зв'язку. Перетворювачі електричних величин в електричні:	Модулятор	<i>UB</i>
		Демодулятор	<i>UR</i>
		дискримінатор	<i>UI</i>
		перетворювач частоти, інвертор, генератор частоти, випрямляч	<i>UZ</i>
<i>V</i>	Прилади електровакуумні і напівпровідникові	діод, стабілітрон	<i>VD</i>
		прилад електровакуумний	<i>VL</i>
		Транзистор	<i>VT</i>
		Тиристор	<i>VS</i>
<i>W</i>	Лінії і елементи СВЧ. Антени:	відгалужувач	<i>WE</i>
		короткозамикач	<i>WK</i>
		Вентиль	<i>WS</i>
		трансформатор, фазообертач	<i>WT</i>
		Атенюатор	<i>WU</i>
		Антенна	<i>WA</i>
<i>X</i>	З'єднання контактні:	струмознімач, контакт ковзний	<i>XA</i>
		Штир	<i>XP</i>
		Гніздо	<i>XS</i>
		з'єднання розбірне	<i>XT</i>
		з'єднувач високочастотний	<i>XW</i>
<i>Y</i>	Пристрої механічні з електромагнітними приводами:	електромагніт	<i>YA</i>
		гальмо з електромагнітним приводом	<i>YB</i>
		муфта з електромагнітним приводом	<i>YC</i>
		електромагнітний патрон або плита	<i>YH</i>
<i>Z</i>	Пристрої кінцеві, фільтри, обмежувачі:	Обмежувач	<i>ZL</i>
		фільтр кварцовий	<i>ZQ</i>

## Додаток Е

Таблиця Д12 – Умовні позначення на шкалах електровимірювальних приладів

Зображення знака	Пояснення
1	2
	Магнітоелектричний прилад з рухомою рамкою
	Електромагнітний прилад
	Електромагнітний логометр
	Електродинамічний прилад
	Електродинамічний логометр
	Феродинамічний прилад
	Феродинамічний логометр
	Індукційний прилад
	Індукційний логометр
	Тепловий прилад
	Термоперетворювач ізольований
	Термоперетворювач неізольований
	Електронний перетворювач
	Захист від зовнішніх електричних кіл (I категорія захисту)
	Захист від зовнішніх магнітних кіл (I категорія захисту)



Продовження таблиці Д.12

1	2
	Постійний струм
	Постійний і змінний струм
	Трифазний струм
	Горизонтальне положення шкали
	Вертикальне положення шкали
	Нахил накладення шкали під визначеним кутом до горизонту, наприклад 30°
1	2
1,5	Клас точності при нормованій похибці в відсотках діапазону вимірювання, наприклад 1,5
	Клас точності при нормованій похибці в відсотках від даного показника, наприклад 0,05
	Клас точності при нормованій похибці в відсотках від довжини шкали, наприклад 1,0
	Клас точності при нормованій похибці в відсотках від кінцевого значення робочої частини шкали, для приладів з без нульовою шкалою, наприклад 1,5
	Вимірювальне коло ізольоване від корпусу і випробуване напругою, наприклад 7кВ
	Обережно! Міцність ізоляції вимірювального кола по відношенні до корпусу не відповідає нормам (знак яскраво-червоного кольору з розмірами по ГОСТ 6395-52)
	Увага! Дивися додаткові вказівки в паспорті і інструкції по експлуатації
*	Загальний затискач для багатопризначених приладів змінного струму, а також генераторний затискач (наприклад, ватметрів)