

ЛІТЕРАТУРА



НАВЧАЛЬНО-МЕТОДИЧНА

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ  
ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ІВАНА  
ПУЛЮЯ

Кафедра електричної інженерії



**Методичні вказівки до виконання  
лабораторних робіт**

З КУРСУ

**ВИМІРЮВАННЯ ТА ОБЛІК  
ЕНЕРГІЇ**

для здобувачів вищої освіти  
за ОПП Електроенергетика, електротехніка  
та електромеханіка  
першого рівня вищої освіти

ID 964

Тернопіль 2024

Коваль В.П. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з курсу «Вимірювання та облік енергії» для здобувачів першого рівня вищої освіти за ОПП Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / Уклад.: В.П.Коваль – Тернопіль: ТНТУ імені Івана Пулюя, 2024. – 64 с.

**Укладач**                      Вадим Коваль  
к.т.н. доц. завідувач кафедри електричної інженерії

**Рецензент**                    Микола ТАРЕСЕНКО  
д.т.н., проф.. кафедри електричної інженерії

Методичні вказівки розглянуто і затверджено на засіданні кафедри електричної інженерії

Протокол № 10 від 17.04.2024 р.

Схвалено методичною радою ФПТ Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя.

Протокол № 8 від 09.05.2024 р.

# ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
Лабораторна робота № 1 ВИМІРЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ ТРИФАЗНОГО СТРУМУ В ТРИПРОВОДОВОМУ КОЛІ ПРИ РІВНОМІРНОМУ ТА НЕРІВНОМІРНОМУ НАВАНТАЖЕННЯХ .....	9
1.1. Технічні системи й обладнання .....	9
1.2. Теоретичні відомості.....	9
1.3. Схема установки.....	18
1.4. Хід роботи .....	19
1.5. Контрольні запитання .....	21
Лабораторна робота № 2 ВИМІРЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ В ТРИФАЗНОМУ КОЛІ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ СТРУМУ.....	23
2.1. Технічні системи й обладнання .....	23
2.2. Теоретичні відомості.....	23
2.3. Схема установки.....	32
2.4. Хід роботи .....	33
2.5. Контрольні запитання .....	36
Лабораторна робота №3 ВМИКАННЯ В КОЛО І ПЕРЕВІРКА ОДНОФАЗНОГО ЛІЧИЛЬНИКА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ.....	38
3.1. Технічні системи й обладнання .....	38
3.2. Теоретичні відомості.....	38
3.3. Схема установки.....	41
3.4. Хід роботи .....	43
3.5. Контрольні запитання .....	47
Лабораторна робота № 4 ВИМІРЮВАННЯ АКТИВНОЇ І РЕАКТИВНОЇ ЕНЕРГІЇ В ТРИПРОВОДОВОМУ КОЛІ ТРИФАЗНОГО СТРУМУ .....	48
4.1. Технічні системи й обладнання .....	48
4.2. Теоретичні відомості та схема установки.....	48

4.3. Хід роботи .....	50
4.4. Контрольні запитання .....	53
Лабораторна робота № 5 ВИМІРЮВАННЯ КОЕФІЦІЄНТА ПОТУЖНОСТІ ТА ЧАСТОТИ ЗМІННОГО СТРУМУ .....	55
5.1. Технічні системи й обладнання .....	55
5.2. Теоретичні відомості.....	55
5.3. Схема установки.....	60
5.4. Хід роботи.....	61
5.5. Контрольні питання .....	63
Рекомендована література.....	64

## ВСТУП

Виконуючи лабораторну роботу з курсу «Вимірювання та облік енергії», студенти отримують відповідні навички роботи з вимірювальними приладами і технічним устаткуванням, розвивають спостережливість, привчаються глибше аналізувати фізичні процеси.

Враховуючи істотне значення лабораторних робіт, особливо для вивчення предмета «Вимірювання та облік енергії», необхідно повністю виконувати всі роботи, передбачені програмою. Для цього слід дотримуватися прийнятої організації занять у лабораторії.

Як правило, лабораторні роботи виконують безпосередньо після вивчення одного або кількох розділів теоретичного курсу, оскільки вони є практичним підтвердженням теоретичних положень і висновків.

На початку першого заняття в лабораторії студенти повинні ознайомитися з технікою безпеки в лабораторії і порядком виконання лабораторних робіт, звертаючи увагу на їх загальні особливості. Після цього студенти приступають до роботи. Вказівки до виконання заданої роботи вони отримують від викладача під час бесіди або інструктажу біля кожного робочого місця.

Головне при виконанні роботи – повна самостійність. Виконуючи лабораторну роботу, студенти повинні проявляти ініціативу в подоланні труднощів. Звертатися до викладача слід лише тоді, коли вичерпані всі можливі вирішення питань про структуру тієї або іншої схеми, методика виконання окремих етапів лабораторної роботи.

Якщо лабораторну роботу виконують одночасно три-чотири студенти, потрібно аби кожен з них мав певні завдання і виконував їх по черзі.

Можна скористатися і іншим методом, при якому схему збирає один студент, а інші стежать за роботою і весь час контролюють його. Зібрану схему перевіряють, також дотримуючись черговості.

**Підготовка та допуск до лабораторних робіт.** Для того, щоб студенти змогли свідомо виконувати практичні завдання в лабораторії, вони заздалегідь повинні до них підготуватися, не тільки вивчаючи теоретичну частину курсу, але і ознайомитись із методичними вказівками до виконання кожної лабораторної роботи.

Облік лабораторних робіт викладач веде в журналі на відведених для

цього сторінках. У журналі він проставляє допуск до виконання роботи, відробку та захист, враховуючи якість виконання, отримання найхарактерніших результатів, відношення студента до роботи в процесі її виконання, уміння самостійно узагальнювати результати, а також якість звіту. В звіті повинні бути схеми (рисунок панелей приладів для відповідних робіт), графіки, чітко виконані таблиці результатів, зрозуміло і лаконічно висловлений короткий опис виконання роботи й особливо висновків, що узагальнюють її результати.

Готуючись до лабораторної роботи, потрібно повторити теоретичний матеріал, користуючись рекомендованою літературою, вказаною в кінці даних методичних вказівок.

Потім студентам необхідно детально ознайомитися зі змістом роботи, переліком приладів і устаткування, з'ясувати поставлену мету, розглянути схеми з'єднання приладів, з'ясувати найприйнятніші номінали вимірювальних приладів і технічні дані устаткування, уважно прочитати розділ «Хід роботи», звернути увагу на рекомендовані електричні режими, методику виконання вимірювань і необхідних обчислень, ознайомитися з формами таблиць, в які вони записуватимуть результати вимірювань.

*У результаті попередньої підготовки слід оформити звіт, в якому повинні бути:*

1. Назва та мета роботи.
2. Перелік приладів і обладнання, які використовуються під час виконання лабораторної роботи.
3. Схема установки та її короткий опис.
4. Хід роботи із таблицями результатів вимірювань і розрахунків для подальшого виконання лабораторної роботи.

На всі питання, що виникли під час підготовки, треба знайти відповідь, користуючись рекомендованою літературою. Незрозумілі питання слід обговорити з викладачем.

*Під час отримання допуску до виконання лабораторної роботи потрібно представити викладачу звіт про попередню підготовку, оформлений згідно з чинними нормами та правилами, сказати назву та мету, хід роботи, описати схему установки, дати відповіді на запитання про принцип дії та будову вимірювальних приладів, які використовуються.*

**Виконання лабораторних робіт.** Для успішного виконання лабораторних робіт у відведений за розкладом час студенти повинні точно дотримуватися основних положень, що визначають порядок і методичну

послідовність дій під час лабораторних занять:

1. Кожен студент зобов'язаний виконувати вимоги внутрішнього розпорядку, встановленого в лабораторії навчального закладу, і строго дотримуватися правил техніки безпеки під час роботи з електричними установками.

2. Лабораторні роботи студенти виконують бригадами (по 2 – 3 людини). Кожен член бригади повинен оформити звіт.

3. Лабораторні роботи проводяться за розкладом відповідно до графіка, складеного викладачем. Робочі місця в лабораторії можна міняти лише з дозволу і за вказівкою викладача.

4. Кожну лабораторну роботу виконують на певному столі, біля якого прикріплена табличка з її номером відповідно до тематики, складеної викладачем. Переставляти технічні системи й устаткування зі столу на стіл без дозволу викладача забороняється.

5. Перед виконанням завдання перш за все потрібно ознайомитися з устаткуванням і його технічними характеристиками, відповідно до вказівок, наведених в описі виконуваної роботи. Записують технічні характеристики тих деталей, приладів і устаткування, які фактично використовувалися, оскільки залежно від місцевих умов лабораторії деякі технічні системи можуть відрізнятися від вказаних в описі.

6. Перед складанням схеми кожної вимірювальної установки треба ознайомитися зі схемами вмикання приладів, чітко представляти відповідність затискачів тим або іншим точкам схеми. З'єднуючи технічні системи й апаратуру, необхідно прагнути, аби кола виходили простими й наочними, щоб контакти були щільно затиснені, а сполучні провідники були якомога коротші, але не натягнуті.

7. Після складання схеми студентам потрібно звернутись до викладача або лаборанта з проханням перевірити, чи правильно складена схема.

8. Джерела живлення вмикають тільки після дозволу викладача і в останню чергу, перед виконанням роботи, а вимикають їх після закінчення роботи в першу чергу. Якщо потрібно провести перемикання в схемі, обов'язково вимикають джерела живлення. Знову вмикати їх можна лише з дозволу викладача.

9. Забороняється залишати під напругою навчальну схему і технічні системи.

10. Про виявленні несправності приладів і апаратури повідомляють

викладача. Самостійно усувати несправності забороняється.

11. Під час виконання лабораторних робіт треба дбайливо поводитися з приладами, деталями, апаратурою й устаткуванням, маючи на увазі, що ними користуватимуться й інші студенти.

12. Результати вимірювань слід показати викладачу, після чого схему можна розібрати. Технічні системи й апаратуру треба розмістити на столі в такому порядку, в якому вони були до початку роботи.

**Оформлення звіту про виконання лабораторних робіт.** За кожною виконаною лабораторною роботою студент оформляє звіт. На титульній сторінці звіту треба вказати міністерство, якому підлеглий навчальний заклад, назву навчального закладу, назву кафедри, в межах якої проводиться навчання студентів, номер лабораторної роботи, тему, групу, своє прізвище, ім'я, по батькові; в окремому місці повинна бути відмітка про допуск, виконання та захист звіту.

На решті сторінках повинні бути такі дані: схеми вимірювальних установок, перелік приладів і устаткування, хід роботи; таблиці із результатами виконання роботи, графіки і діаграми; висновки за результатами вимірювань і спостережень.

Складений звіт із дотриманням вимог оформлення, студент повинен здати викладачу на наступному лабораторному занятті й бути готовим відповісти на кожне з контрольних запитань, що відносяться до виконаної роботи.



# Лабораторна робота № 1

## ВИМІРЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ ТРИФАЗНОГО СТРУМУ В ТРИПРОВОДОВОМУ КОЛІ ПРИ РІВНОМІРНОМУ ТА НЕРІВНОМІРНОМУ НАВАНТАЖЕННЯХ

**Мета роботи.** Виміряти активну потужність трифазного струму в трипроводовій мережі методом двох ватметрів при рівномірному і нерівномірному навантаженнях фаз і зробити елементарні розрахунки на основі вимірювань.

### *1.1. Технічні системи й обладнання*

1. Два одноелементних ватметри або один двоелементний ватметр електродинамічної або феродинамічної системи.
2. Три амперметри.
3. Вольтметр.
4. Навантажувальний трифазний ламповий реостат.
5. Два триполюсних вимикачі, змонтовані на панелі з вивідними затискачами.
6. Один двополюсний вимикач на панелі з вивідними затискачами.
7. Асинхронний електродвигун невеликої потужності.
8. Дросель.
9. З'єднувальні провідники з наконечниками.

### *1.2. Теоретичні відомості*

**Ватметри.** Електродинамічний (феродинамічний) вимірювальний механізм (ВМ) лежить в основі *електродинамічного (феродинамічного) ватметра*.

У цьому випадку (рис. 1.1, а) послідовно з'єднані нерухому й рухому котушки  $1$  і  $2$  вмикають послідовно з об'єктом  $Z$ , споживана потужність якого вимірюється. Рухома котушка  $2$  з додатковим резистором  $R_D$  вмикається паралельно об'єкту. Коло нерухомих котушок називають послідовним, а коло рухомої котушки – паралельним колом.

Для ватметра, що працює в колі постійного струму,

$$\alpha = \frac{1}{W} \frac{dM_{1,2}}{d\alpha} \frac{U \cdot I}{R_U + R_D} = S \cdot P, \quad (1.1)$$

де  $P = U \cdot I$  – вимірювана потужність, Вт;

$S = \frac{dM_{1,2}}{d\alpha} \cdot \frac{1}{W(R_U + R_D)}$  – чутливість, под/Вт. У ватметрів конструктивним

шляхом домагаються  $\frac{dM_{1,2}}{d\alpha} = const$ , що забезпечує рівномірну шкалу.

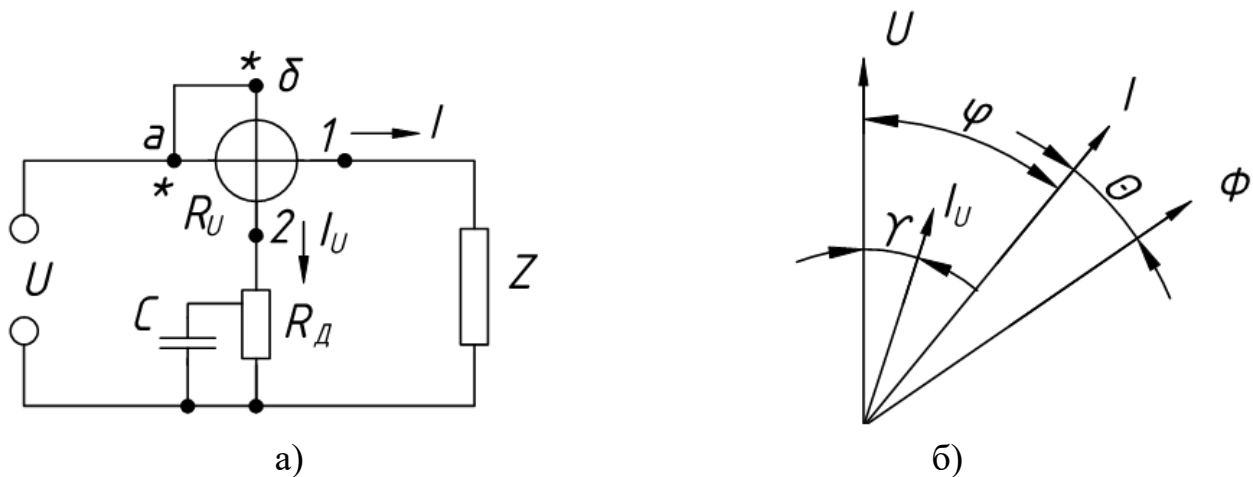


Рис. 1.1. Схема вмикання ватметра (а) і векторна діаграма (б)

При роботі в колах змінного струму вектор струму  $I_U$  паралельного кола відстає від вектора напруги  $U$  на деякий кут  $\gamma$  внаслідок індуктивності рухомої котушки (рис 1.1 б). Тому

$$\alpha = \frac{1}{W} \frac{dM_{1,2}}{d\alpha} I \cdot I_U \cdot \cos(\varphi - \gamma), \quad (1.2)$$

де  $\varphi$  – кут фазового зсуву між струмом і напругою в навантаженні.

Враховуючи, що струм у паралельному колі ватметра  $I_U = U \cdot \cos \gamma / (R_U + R_D)$  і приймаючи  $dM_{1,2} / d\alpha = const$ , отримаємо  $\alpha = S \cdot U \cdot I \cdot \cos(\varphi - \gamma) \cdot \cos \gamma$ .

З виразу випливає, що відхилення рухомої частини ватметра пропорційне активній потужності за умови  $\gamma = 0$ , що може бути виконано вмиканням

конденсатора  $C$  відповідної ємності, як зображено на рис 1.1 *a*. Однак  $\gamma = 0$  лише при певній частоті, і при зміні частоти ця умова порушується.

При  $\gamma \neq 0$  ватметр вимірює потужність із похибкою  $\delta_\gamma$ , яка називається кутовою похибкою. При малому значенні кута  $\gamma$  (звичайно  $\gamma$  не перевищує 40..50'), тобто при  $\sin \gamma \approx \gamma, \cos \gamma \approx 1$  відносна кутова похибка

$$\delta_\gamma = [U \cdot I \cdot \cos(\varphi - \gamma) \cdot \cos \gamma - U \cdot I \cdot \cos \varphi] / (U \cdot I \cdot \cos \varphi) \approx \gamma \cdot \operatorname{tg} \varphi. \quad (1.3)$$

При кутах  $\varphi$ , близьких до  $90^\circ$ , кутова похибка може досягати великих значень.

Споживана потужність послідовним і паралельним колами ватметра призводить до похибки, що залежить від способу вмикання ватметра. При вимірюванні потужності, споживаної об'єктом, можливі дві схеми вмикання ватметра, що відрізняються способом вмикання паралельного кола (рис 1.2 *a* і *б*). Якщо не враховувати фазових зсувів між струмами й напругами в котушках і вважати опір об'єкта чисто активним, то похибки, зумовлені споживанням електроенергії котушками ватметра:

для схеми рис. 1.2 *a*

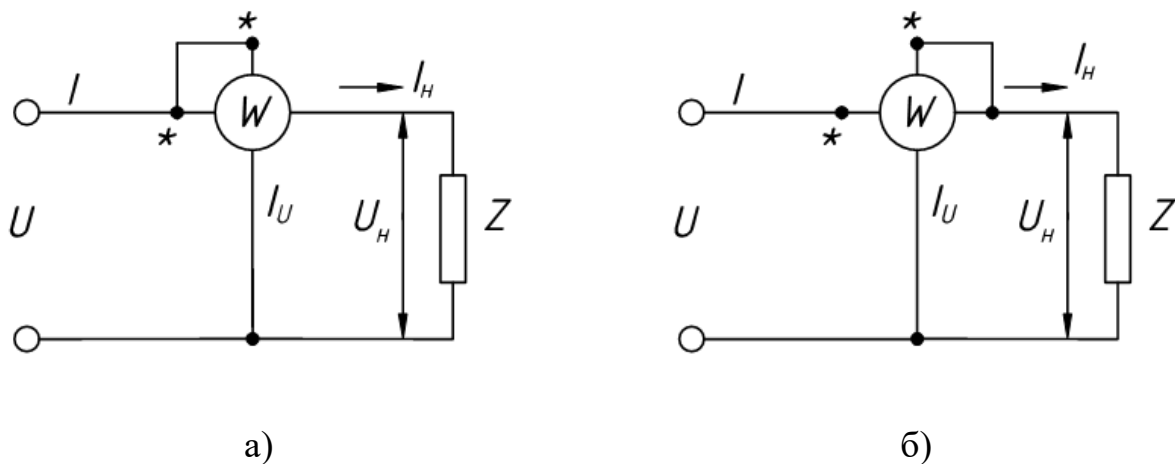
$$\delta = (U \cdot I_n - U_n \cdot I_n) / U_n \cdot I_n = P_I / P_n; \quad (1.4)$$

для схеми рис. 1.2 *б*

$$\delta = [U_n \cdot (I_U + I_n) - U_n \cdot I_n] / U_n \cdot I_n = P_U / P_n, \quad (1.5)$$

де  $P_I$  і  $P_U$  – потужність, споживана відповідно послідовним і паралельним колами ватметра, Вт;

$P_n$  – потужність, споживана навантаженням, Вт.



**Рис.1.2. Схеми вмикання паралельної обмотки ватметра**

Отже, розглянуті похибки помітні лише при вимірюваннях потужності в малопотужних колах. Схему вмикання, зображену на рис. 1.2 а, доцільно використовувати при вимірюванні потужності об'єкта з високоомним навантаженням, а схему, зображену на рис. 1.2 б – при вимірюванні потужності об'єкта з низькоомним навантаженням.

Зміна порядку вмикання затискачів одного з кіл ватметра (поворот відповідного вектора струму) веде до зміни напрямку відхилення рухомої частини вимірювального механізму. Тому для правильного ввімкнення ватметра один із затискачів послідовного й паралельного кола позначається зірочкою (“генераторний затискач”).

**Вимірювання активної та реактивної потужності в трифазних колах.** У трифазній системі незалежно від схеми з'єднання навантаження (трикутником або зіркою) миттєве значення потужності  $p$  системи дорівнює сумі миттєвих значень потужності окремих фаз:

$$P = P_A + P_B + P_C. \quad (1.6)$$

Активна потужність  $P$  і енергія  $W$  за інтервал часу  $\Delta t$  визначаються відповідно виразами:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p \cdot dt = P_A + P_B + P_C = U_{1\phi} \cdot I_{1\phi} \cdot \cos \varphi_1 + U_{2\phi} \cdot I_{2\phi} \cdot \cos \varphi_2 + U_{3\phi} \cdot I_{3\phi} \cdot \cos \varphi_3, \quad (1.7 \text{ а})$$

$$W = \int_0^{\Delta t} P \cdot dt = \int_0^{\Delta t} U_{1\phi} \cdot I_{1\phi} \cdot \cos \varphi_1 \cdot dt + \int_0^{\Delta t} U_{2\phi} \cdot I_{2\phi} \cdot \cos \varphi_2 \cdot dt + \int_0^{\Delta t} U_{3\phi} \cdot I_{3\phi} \cdot \cos \varphi_3 \cdot dt, \quad (1.7 \text{ б})$$

де  $U_{i\phi}$ ,  $I_{i\phi}$  – фазні напруги і струми;

$\cos \varphi_i$ , – косинус кута фазового зсуву між струмом і напругою у фазах навантаження;

$T$  – період зміни змінної напруги.

Для симетричної трифазної системи, в якій усі фазні й лінійні напруги, струми і кути фазового зсуву між напругами і струмами рівні між собою, ці рівняння набувають вигляду:

$$P = 3 \cdot U_\phi \cdot I_\phi \cdot \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot U_\ell \cdot I_\ell \cdot \cos \varphi, \quad (1.8 \text{ а})$$

$$W = 3 \cdot \int_0^{\Delta t} U_\phi \cdot I_\phi \cdot \cos \varphi \cdot dt = \sqrt{3} \int_0^{\Delta t} U_\ell \cdot I_\ell \cdot \cos \varphi \cdot dt, \quad (1.8 \text{ б})$$

де  $U_\ell$ ,  $I_\ell$  – лінійні напруги і струми, В, А;

$\cos \varphi$  – косинус кута фазового зсуву між струмом і напругою у фазі навантаження.

При з'єднанні навантаження зіркою (рис. 1.3 а) миттєва потужність

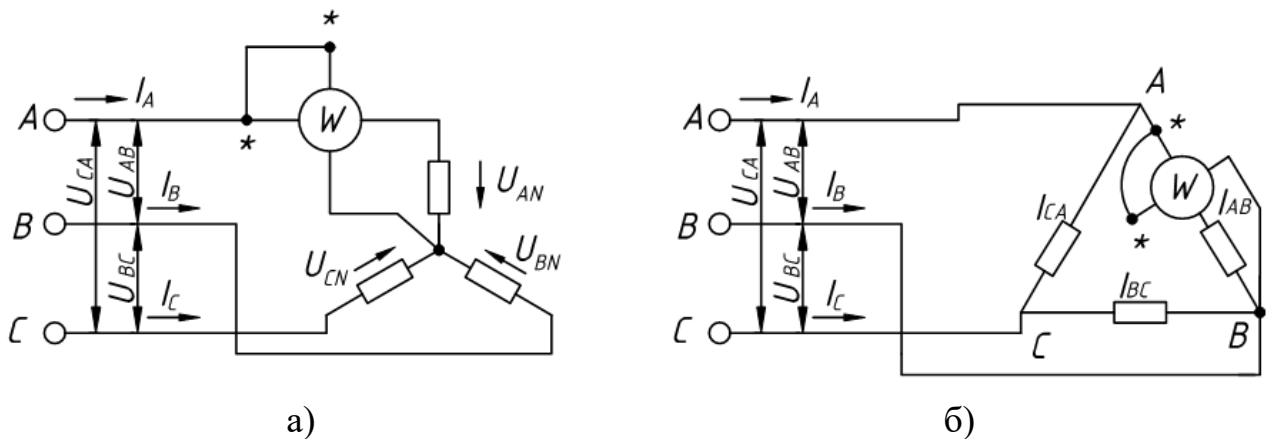
$$p = u_{A0} \cdot i_A + u_{B0} \cdot i_B + u_{C0} \cdot i_C, \quad (1.9)$$

де  $u_{A0}, u_{B0}, u_{C0}$  – миттєві значення фазних напруг, В;

$i_A, i_B, i_C$  – миттєві значення фазних струмів, А.

Враховуючи, що  $i_A + i_B + i_C = 0$ ,  $u_{BC} = u_{B0} - u_{C0}$ ,  $u_{AB} = u_{A0} - u_{B0}$  і  $u_{CA} = u_{C0} - u_{A0}$ , рівняння для миттєвого значення потужності трифазної системи можна представити в трьох формах:

$$p = u_{AC} \cdot i_A + u_{BC} \cdot i_B; \quad p = u_{AB} \cdot i_A + u_{CB} \cdot i_C; \quad p = u_{BA} \cdot i_B + u_{CA} \cdot i_C. \quad (1.10)$$



**Рис. 1.3. Схема вимірювання активної потужності в трифазному колі одним ватметром при вмиканні навантаження зіркою (а) і трикутником (б)**

До таких же висновків можна дійти і при вмиканні навантаження трикутником. Переходячи від миттєвих до середніх значень, отримуємо такі вирази для активної потужності:

$$P = U_{AC} \cdot I_A \cdot \cos \beta_1 + U_{BC} \cdot I_B \cdot \cos \beta_2; \quad (1.11 \text{ а})$$

$$P = U_{AB} \cdot I_A \cdot \cos \beta_3 + U_{CB} \cdot I_C \cdot \cos \beta_4; \quad (1.11 \text{ б})$$

$$P = U_{BA} \cdot I_B \cdot \cos \beta_5 + U_{CA} \cdot I_C \cdot \cos \beta_6, \quad (1.11 \text{ в})$$

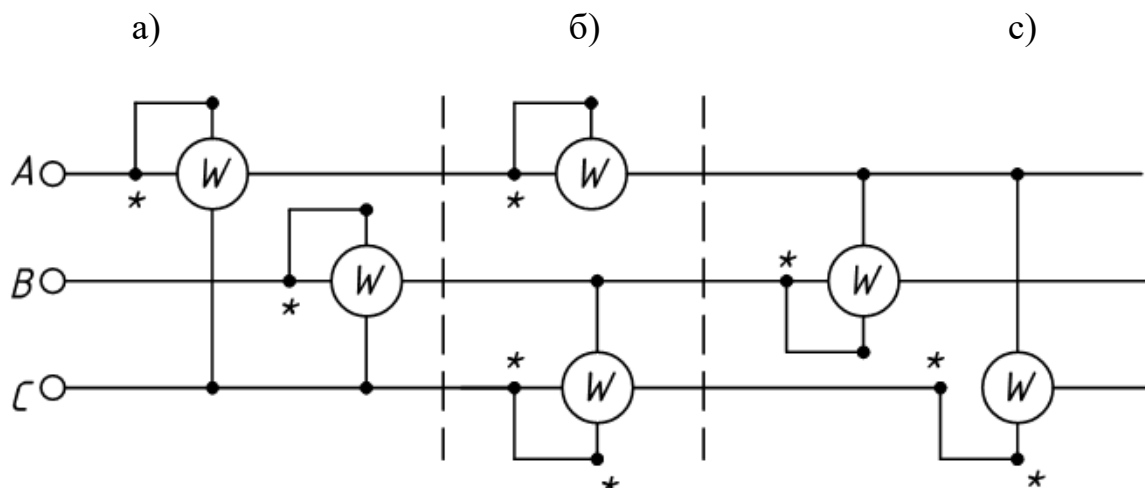
де  $U_{AC}, U_{AB}, U_{BC}, U_{BA}, U_{CB}, U_{CA}$  і  $I_A, I_B, I_C$  – діючі значення лінійних напруг і струмів, В і А;

$\beta_1, \beta_2$  і т.д. – кути фазового зсуву між відповідними струмами і напругами.

З рівнянь (1.7) – (1.11) бачимо, що для вимірювання потужності, а отже, й енергії трифазної системи можуть бути застосовані один, два або три технічні системи. Метод одного приладу ґрунтується на використанні виразів (1.8) і застосовується в симетричних трифазних системах. В асиметричній системі, в якій значення струмів, напруг і кутів фазового зсуву неоднакові, використовується метод двох приладів з використанням виразів (1.11).

Нарешті, в найзагальнішому випадку, у тому числі й у чотирипроводовій асиметричній системі, на підставі виразів (1.7) застосовується метод трьох приладів.

*Метод двох приладів.* Застосовують в асиметричних трипроводових колах трифазного струму. На основі виразів (1.11) маємо три варіанти схеми вмикання двох приладів (рис. 1.4 а, б, в). Аналіз роботи ватметрів по цих схемах показує, що залежно від характеру навантаження фаз знак показів кожного з ватметрів може змінюватися. Активна потужність трифазної системи в цьому випадку повинна визначатися як алгебраїчна сума показів обох ватметрів.



**Рис. 1.4. Схеми вмикання двох ватметрів для вимірювання активної потужності трифазної мережі**

Методи одного, двох і трьох приладів застосовують в основному в лабораторній практиці. В промислових умовах застосовують дво- і трифазні ватметри і лічильники, які є поєднанням в одному приладі двох (двоелементні) або трьох (триелементні) однофазних вимірювальних механізмів, що мають загальну рухому частину, на яку діє сумарний обертаючий момент усіх елементів.

Реактивну потужність трифазної мережі можна представити як суму реактивних потужностей окремих фаз, тобто

$$Q = U_{1\phi} I_{1\phi} \sin \varphi_1 + U_{2\phi} I_{2\phi} \sin \varphi_2 + U_{3\phi} I_{3\phi} \sin \varphi_3. \quad (1.12)$$

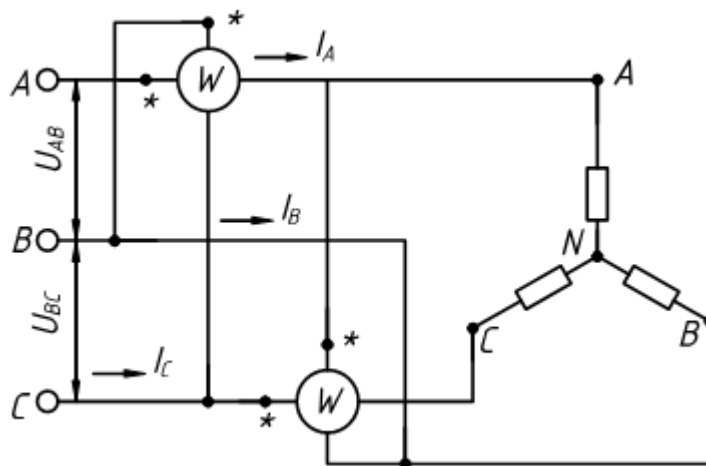
При повній симетрії

$$Q = 3U_{\phi} I_{\phi} \sin \varphi = \sqrt{3}U_{л} I_{л} \sin \varphi. \quad (1.13)$$

Виміряти реактивну потужність (енергію) трифазної мережі можна різними способами: за допомогою звичайних ватметрів (лічильників), що вмикаються за спеціальними схемами, і за допомогою реактивних ватметрів (лічильників).

Кращі результати отримують при вимірюванні реактивної потужності двома ватметрами (рис. 1.5), і при цьому сума показів ватметрів

$$P_1 + P_2 = U_{BC} \cdot I_A \cdot \cos \beta_1 + U_{AB} \cdot I_C \cdot \cos \beta_2. \quad (1.14)$$



**Рис. 1.5. Схема вмикання двох ватметрів при вимірюванні реактивної потужності в асиметричному трифазному колі**

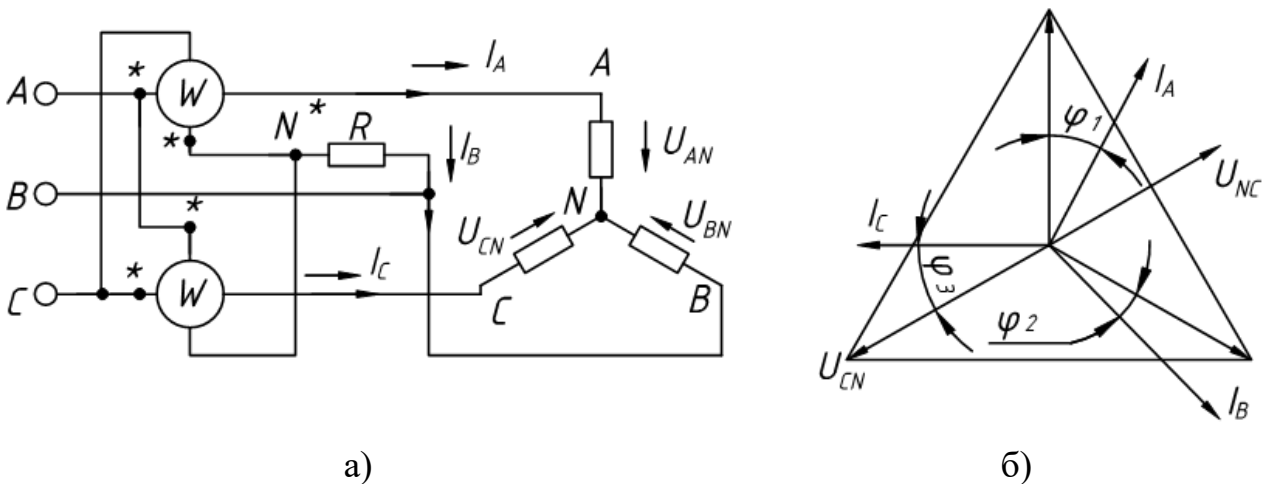
Аналіз роботи схеми при асиметричному навантаженні складний, тому обмежимося окремим випадком, коли  $\beta_1 = \beta_2 = 90^\circ - \varphi$  і система симетрична.

В цьому випадку  $P_1 + P_2 = 2 \cdot U_{\text{л}} \cdot I_{\text{л}} \cdot \sin \varphi$ . Для отримання потужності трифазної системи суму показів ватметрів множать на  $\sqrt{3}/2$ .

При нерівномірному навантаженні фаз, але симетричній системі напруг (часткова асиметрія) реактивна потужність трифазної мережі може бути виміряна двома однаковими ватметрами активної потужності зі штучною нульовою точкою (рис. 1.6 а). Для створення штучної нульової точки  $N^*$  використовують резистор  $R$ , опір якого дорівнює опорю паралельного кола ватметра.

В окремому випадку рівномірного навантаження фаз, коли  $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = \varphi$ , сума показів ватметрів

$$\begin{aligned} P_1 + P_2 &= I_A U_{NC} \cos(60^\circ - \varphi) + I_C U_{AN} \cos(120^\circ - \varphi) = \\ &= I_\varphi U_\varphi \left( \frac{1}{2} \cos \varphi + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \varphi - \frac{1}{2} \cos \varphi + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \varphi \right) = \\ &= \sqrt{3} I_\varphi U_\varphi \sin \varphi = \sqrt{3} Q_\varphi \end{aligned} \quad (1.15)$$



**Рис. 1.6. Схема вмикання двох ватметрів (а) для вимірювання реактивної потужності в трифазній мережі з частковою асиметрією, і векторна діаграма (б)**

Для отримання реактивної потужності трифазної мережі суму показів ватметрів множать на  $\sqrt{3}$ .

Докладний аналіз схеми рис. 1.6 а для нерівномірного навантаження фаз при симетричній системі напруг призводить до такого ж результату.



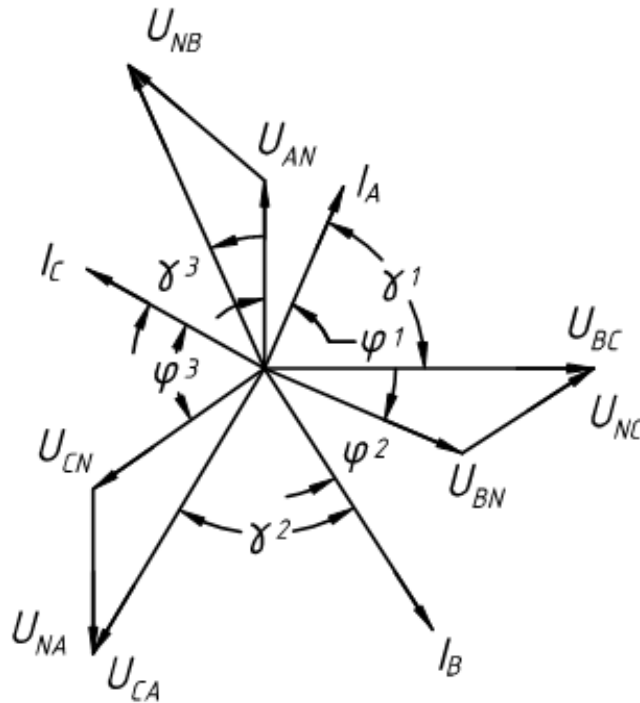
При вимірюванні реактивної потужності й енергії в три- і чотириввідній асиметричних мережах може бути застосований один триелементний прилад або три технічні системи (ватметри чи лічильники).

Доказ можливості вимірювання розглянемо для окремого випадку. Сума показів приладів з урахуванням чергування фаз при вмиканні паралельних обмоток

$$P_A + P_B + P_C = U_{BC} \cdot I_A \cdot \cos \gamma_1 + U_{CA} \cdot I_B \cdot \cos \gamma_2 + U_{AB} \cdot I_C \cdot \cos \gamma_3. \quad (1.16)$$

З векторної діаграми (рис. 1.7) знайдемо

$$\gamma_1 = 90^\circ - \varphi_1; \quad \gamma_2 = 90^\circ - \varphi_2; \quad \gamma_3 = 90^\circ - \varphi_3. \quad (1.17)$$



**Рис. 1.7. Векторна діаграма вмикання трьох ватметрів для вимірювання реактивної потужності в трифазній (чотирифазній) мережі**

Оскільки

$$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U_L,$$

то

$$P_A + P_B + P_C = U_L \cdot (I_A \cdot \sin \varphi_1 + I_B \cdot \sin \varphi_2 + I_C \cdot \sin \varphi_3).$$

Щоб знайти *реактивну* потужність системи, суму показів ватметрів необхідно поділити на  $\sqrt{3}$ .

На основі цього методу випускають реактивні лічильники, придатні як для трипроводових, так і для чотирипроводових кіл трифазного струму.

При непрямих методах вимірювання електричної енергії, наприклад при перевірці лічильників електричної енергії, використовують електродинамічні ватметри і секундоміри.

### 1.3. Схема установки

Активним навантаженням у вимірюваному трипроводовому колі служить трифазний ламповий реостат або три однофазних лампових реостати,  $R_1$ ,  $R_2$  і  $R_3$  з'єднані зіркою (рис. 1.8). Реостат приєднують до вимірювального кола триполюсним вимикачем  $B_2$ .

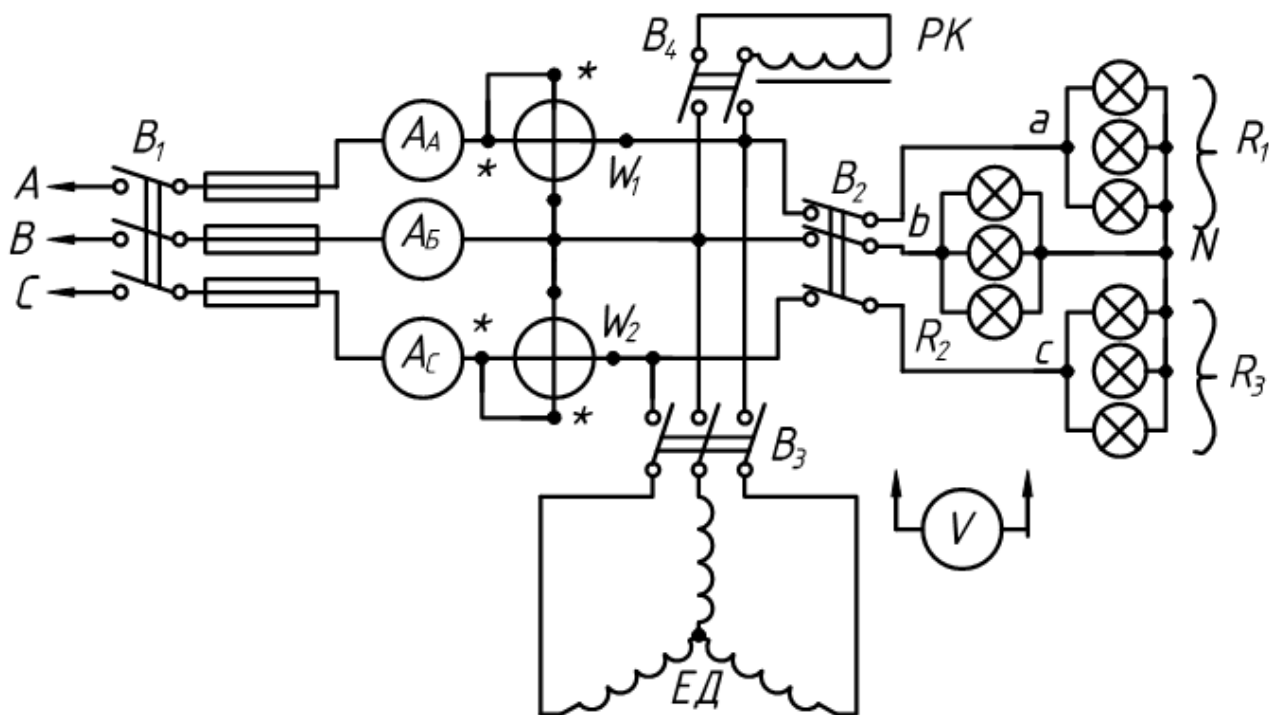


Рис. 1.8. Схема лабораторної установки

У якості рівномірного реактивного навантаження використовують асинхронний електродвигун невеликої потужності порядку 0,4-0,7 кВт, для вмикання якого у вимірювальне коло призначений вимикач  $B_3$ . Для утворення нерівномірного реактивного навантаження до двох проводів

(фази  $A$  і  $B$ ) можна двополюсним вимикачем  $B4$  приєднати реактивну котушку  $PK$  або первинну обмотку трансформатора (наприклад, вимірювального трансформатора напруги).

У фази  $A$  і  $C$  вмикають послідовні обмотки ватметрів  $W1$  і  $W2$ . Їхні паралельні обмотки приєднують до фази  $B$ . Застосовують ватметри лабораторного типу.

Якщо в лабораторії є двоелементний ватметр, то його можна використовувати для вимірювання, вмикаючи обмотки за наведеною схемою.

Номинальні дані обмоток повинні відповідати величинам сили струму і напруги в колі.

Для контролю сили струму в кожен фазу вимірюваного кола вмикають амперметр із границями вимірювань  $0 - 5 - 10$  А або  $0 - 2,5 - 5$  А. До електромережі трифазного струму вимірюване коло вмикають через запобіжники вимикачем  $B1$ , який знаходиться у лабораторному блоку живлення БП4822-2. Контрольний вольтметр для вимірювань під'єднують до відповідної ділянки вимірюваного кола за допомогою з'єднувальних провідників, на кінцях яких є щупи з ізольованими ручками.

#### **1.4. Хід роботи**

1. Ознайомитися з приладами, визначити їхній тип, систему, номінали шкал, класи точності, а у ватметрах додатково — генераторні і навантажувальні затискачі послідовних і паралельних обмоток.

2. Зібрати схему установки. Показати її викладачеві для перевірки і, отримавши його дозвіл, виконати вказівки наступних пунктів.

3. Виміряти активну потужність при двох різних значеннях величини активного навантаження. Для цього встановити однакові навантаження в лампових реостатах  $R1$ ,  $R2$  і  $R3$  (всі лампи увімкнені).

Замкнути вимикач  $B2$ . Спостерігаючи за показами приладів, замкнути вимикач  $B1$  і зняти покази ватметрів  $W1$ ,  $W2$  і амперметрів  $A_A, A_B, A_C$  (сили струму  $I_A, I_B, I_C$ ).

Виміряти напруги  $U_{a0}, U_{e0}, U_{c0}$  на затискачах кожної ділянки навантажувального реостата, і лінійну напругу  $U_L$ .

Покази всіх приладів записати в таблицю 1.1.

Таблиця 1.1

## Результати вимірювань активної потужності трифазного струму

№ з/п	Виміряні величини									Обчислені величини								
	$I_A$	$I_B$	$I_C$	$U_{a0}$	$U_{b0}$	$U_{c0}$	$U_L$	$P_1$	$P_2$	$P_A$	$P_B$	$P_C$	$P'$	$P''$	$Q$	$\cos \varphi$	$\varphi$	
	А	А	А	В	В	В	В	Вт	Вт	Вт	Вт	Вт	Вт	Вт	Вт	вар	-	град
1.																		
2.																		
3.																		
4.																		

Вимикачем  $B1$  вимкнути мережу, зменшити навантаження, викрутивши частину ламп із патронів лампових реостатів  $R1, R2, R3$ . Для цього вимкнути вимикачі  $B5$  і  $B6$ . Потім замкнути вимикач  $B1$  і зняти покази всіх приладів, записавши їх у ту ж таблицю, після чого знову вимкнути мережу.

Виконуючи вимірювання, варто переконатися в тому, що покази ватметрів однакові:  $P_1 = P_2$ .

4. За даними вимірювання обчислити такі величини:

а) активну потужність у трифазному колі

$$P' = P_1 + P_2;$$

б) активну потужність кожної фази

$$P_A = I_A U_{a0}; P_B = I_B U_{b0}; P_C = I_C U_{c0};$$

в) сумарну активну потужність усіх фаз

$$P'' = P_A + P_B + P_C.$$

Результати обчислень записати в таблицю. Порівняти величини потужностей  $P'$  і  $P''$ .

5. Переконатися в тому, що реактивна потужність у всіх випадках вимірювань за пунктами 3 і 4 складає

$$Q = \sqrt{3}(P_1 - P_2) = 0.$$

6. Виміряти активну потужність у трифазному колі при нерівномірному активному навантаженні фаз. Для цього встановити різні величини навантажень за допомогою лампових реостатів (вимкнути вимикачі  $B6$  та  $B7$ ) і повторити всі вимірювання, описані в пункті 3. Виконавши вимірювання, провести необхідні обчислення за формулами, які наведені у пункті 4.

7. Виміряти активну потужність у трифазному колі при рівномірному

реактивному навантаженні фаз. Перед вимірюванням вимикачем  $B2$  вимкнути ламповий реостат, а вмикачем  $B3$  увімкнути реактивне навантаження. Замкнути вимикач  $B1$  і зняти покази приладів, після чого вимкнути електромережу. За даними вимірювань обчислити:

а) активну потужність трифазного кола

$$P' = P_1 + P_2;$$

б) коефіцієнт потужності  $\cos \varphi = P' / (\sqrt{3} \cdot U_{\text{Л}} \cdot I_{\text{Л}})$ ;

в) кут зсуву фаз  $\varphi$  за  $\cos \varphi$ .

Переконатися в тому, що реактивна потужність не дорівнює нулеві:

$$Q = \sqrt{3}(P_1 - P_2) = \sqrt{3} \cdot U_{\text{Л}} \cdot I_{\text{Л}} \cdot \sin \varphi.$$

Варто мати на увазі, що

$$I_{\text{Л}} = I_A = I_B = I_C.$$

Примітка. Якщо при вимірюваннях (пункт 7) стрілка одного з ватметрів буде відхилитися вліво від нульової позначки шкали (від'ємні покази), варто змінити на  $180^\circ$  фазу струму в одній з його обмоток (послідовній або паралельній). Потужність кола в цьому випадку визначається різницею показів ватметрів  $P' = P_1 - P_2$ , де  $P_2$  — покази ватметра з перемкнутими обмотками. Таке явище буває при великих кутах зрушення фаз ( $\varphi > 60^\circ$ ).

8. Створити нерівномірне реактивне навантаження фаз. Вмикачем  $B4$ , увімкнути до вимірюваного кола реактивну котушку  $PK$ . Потім при ввімкненому вимикачі  $B3$  ввімкнути мережу вмикачем  $B1$  і зробити вимірювання в послідовності, описаній в пункті 7.

Закінчивши вимірювання, вимкнути електромережу й обчислити всі величини, зазначені в попередньому пункті. Результати всіх вимірювань і обчислень записати в таблицю і показати викладачеві. Отримавши дозвіл, розібрати схему установки.

### **1.5. Контрольні запитання**

1. Який спосіб вимірювання активної потужності в трифазних мережах найбільш розповсюджений?
2. Які затискачі є у ватметрах і як вони позначені на приладі?
3. У які фази вмикають ватметри при вимірюванні активної потужності методом двох ватметрів?

4. Як вмикають ватметри в трипровідне вимірювальне коло трифазного струму при вимірюванні активної потужності методом двох ватметрів?
5. Як при вимірюванні активної потужності методом двох ватметрів можна визначити реактивну потужність вимірюваного кола?
6. Чи рівні між собою загальні потужності трифазного кола, виміряні двома ватметрами й обчислені за показами амперметрів і вольтметра? Якщо не рівні, пояснити чому.
7. Як варто вчинити, якщо стрілка одного з ватметрів при вимірюванні потужності методом двох ватметрів відхиляється вліво від нуля?
8. Як обчислити потужність трифазного кола при вимірюванні двома ватметрами, якщо при вимірюванні довелося перемкнути яку-небудь обмотку одного з ватметрів для зміни фази на  $180^\circ$  ?
9. Чи можна визначити коефіцієнт потужності в результаті вимірювань активної потужності в трифазному колі методом двох ватметрів ?
10. Як можна визначити кут зсуву фаз при вимірюванні активної потужності методом двох ватметрів у трифазному колі з реактивним навантаженням ?

## Лабораторна робота № 2

# ВИМІРЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ В ТРИФАЗНОМУ КОЛІ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ СТРУМУ

**Мета роботи.** Виміряти активну потужність у колі трифазного струму методом двох ватметрів, увімкнених через вимірювальні трансформатори струму, при рівномірному і нерівномірному навантаженні фаз. Виконати всі необхідні розрахунки, пов'язані з вимірами.

### *2.1. Технічні системи й обладнання*

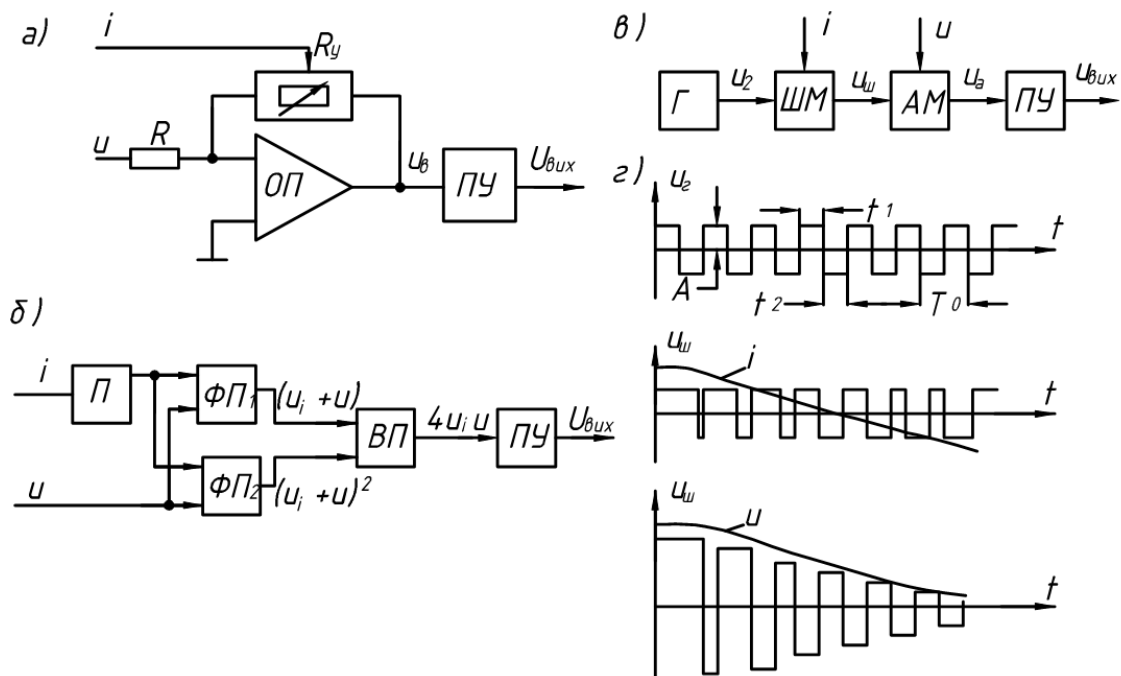
1. Два одноелементних або один двоелементний ватметр електродинамічної або феродинамічної системи.
2. Три амперметри.
3. Вольтметр.
4. Два вимірювальних трансформатори струму.
5. Навантажувальний трифазний ламповий реостат.
6. Асинхронний електродвигун невеликої потужності.
7. Два триполюсних вимикачі, змонтовані на панелі з вивідними затискачами (без запобіжників).
8. Два однополюсних вимикачі.
9. З'єднувальні провідники з наконечниками.

### *2.2. Теоретичні відомості*

Електронні технічні системи для вимірювання потужності – *електронні ватметри* – можуть бути побудовані на основі вимірювального перетворювача потужності в напругу, на виході якого встановлюється магнітоелектричний вимірювальний механізм зі шкалою, градуйованою в одиницях потужності. В наш час випускають вимірювальні перетворювачі активної, реактивної і повної потужності змінного струму, призначені для роботи як в однофазних, так і трифазних колах. Принципи побудови цих перетворювачів багато в чому схожі. Розглянемо основні способи побудови перетворювачів активної потужності.

В основі роботи перетворювачів активної потужності лежить реалізація залежності  $P = \frac{1}{T} \int_0^T u \cdot i \cdot dt$ , де  $P$  – вимірювана потужність;  $T$  – період струму  $i$  та напруги  $u$  на навантаженні, с. Звідси випливає, що необхідним елементом перетворювача є пристрій перемножування величин  $u$  та  $i$ . Залежно від способу отримання добутку  $u$  та  $i$  існують параметричні та модуляційні множні пристрої (МП).

Параметричні множні пристрої можуть бути з прямим і непрямим перемножуванням. При прямому перемножуванні використовується чотириполіусник, на вхід якого подається одна величина (наприклад,  $u$ ), а друга величина ( $i$ ) керує коефіцієнтом його передавання. У цьому випадку вихідний сигнал чотириполіусника пропорційний добутку  $u \cdot i$ . На цій основі побудований перетворювач, зображений на рис. 2.1 а, де ОП – операційний підсилювач;  $R$  – резистор постійного опору;  $R_y$  – резистор, керований струмом  $i$ , опір якого  $R_y = k \cdot i$  (наприклад, польовий транзистор); ПУ – пристрій усереднення. Вихідний сигнал операційного підсилювача  $u_e = u \cdot R_y / R = u \cdot i \cdot k / R$ .



**Рис. 2.1. Структурні схеми (а — в) і часові діаграми сигналів (г) перетворювачів потужності в напругу**



Пристрій усереднення, наприклад фільтр нижніх частот або електромеханічний вимірювальний механізм, повинен мати велику сталу часу.

Тому  $U_{\text{вих}} = \frac{1}{T} \int_0^T u_{\text{в}} \cdot dt = \frac{k}{R} \cdot \frac{1}{T} \int_0^T u \cdot i \cdot dt = \frac{k}{R} \cdot P$ . Якщо напруга  $U_{\text{вих}}$  подається на

магнітоелектричний вимірювальний механізм, то кут відхилення рухомої частини  $\alpha = S_U \cdot U_{\text{вих}} = (S_U \cdot k / R)P$ , де  $S_U$  – чутливість по напрузі вимірювального механізму, под/В.

Параметричні множинні пристрої можуть бути побудовані з використанням непрямих способів множення. На підставі залежності  $4 \cdot u_1 \cdot u_2 = (u_1 + u_2)^2 - (u_1 - u_2)^2$  побудований перетворювач, структурна схема якого зображена на рис. 2.1 б, де  $\Pi$  – перетворювач струму в напругу:  $u_i = k \cdot i$ ;  $\Phi\Pi_1$ ,  $\Phi\Pi_2$  – функціональні перетворювачі (квадратуючого пристрою), що здійснюють зведення у квадрат відповідно до суми й різниці вхідних напруг;  $\text{ВП}$  – віднімаючий пристрій.

З рисунка 2.1, а бачимо, що  $U_{\text{вих}} = \frac{1}{T} \int_0^T 4 \cdot k \cdot u \cdot i \cdot dt = 4 \cdot k \cdot P$

У таких схемах операція множення замінюється простішою операцією зведення в степінь, яка може бути реалізована за допомогою деяких елементів (напівпровідникових і вакуумних діодів, напівпровідникових резисторів і транзисторів та ін.), що мають квадратичну вольт-амперну характеристику. Знайшли також застосування квадратуючі пристрої на основі кусково-лінійної апроксимації параболи, виконані на діодах і резисторах.

Точнішими є модуляційні множинні пристрої, засновані на подвійній модуляції імпульсних сигналів. Використовуються різні види модуляції, серед яких найбільшого поширення набула широтно-імпульсна й амплітудно-імпульсна модуляція (ШІМ— АІМ). На рис. 2.1 в показано структурну схему перетворювача із ШІМ—АІМ, а на рис. 2.1 г – часову діаграму, що пояснює принцип його роботи. Генератор  $G$  виробляє прямокутні двополярні імпульси з постійними амплітудою  $A$ , періодом  $T_0$  й тривалістю додатньої ( $t_1$ ) і від'ємної ( $t_2 = t_1$ ) півхвиль. Середнє значення напруги на виході генератора дорівнює нулю. У широтному модуляторі ШІМ тривалість імпульсів під дією струму  $i$  змінюється за залежністю  $(t_1 - t_2)/T_0 = \Delta t / T_0 = k_{\text{Ш}} \cdot i$ , де  $\Delta t = t_1 - t_2$ ;  $k_{\text{Ш}}$  – коефіцієнт перетворення ШІМ. Середнє за період  $T_0$  значення напруги імпульсу на виході ШІМ буде  $u_{\text{шт}0} = \Delta t \cdot T_0 \cdot A = k_{\text{ш}} \cdot i \cdot A$ . В амплітудному

модуляторі  $AM$  амплітуда  $A$  цих імпульсів модулюється пропорційно вхідній напрузі  $A = k_a \cdot u$ , де  $k_a$  – коефіцієнт перетворення  $AM$ . Тоді  $u_{aT_0} = k_a \cdot k_{uu} \cdot u \cdot i$ , тобто середнє за період  $T_0$  значення напруги на виході  $AM$  пропорційне миттєвому значенню вимірюваної потужності. Напруга на виході пристрою усереднення:

$$U_{вих} = \frac{1}{T} \int_0^T u_{aT_0} \cdot dt = \frac{1}{T} \int_0^T k_a \cdot k_{uu} \cdot u \cdot i \cdot dt = k_a \cdot k_{uu} \cdot P,$$

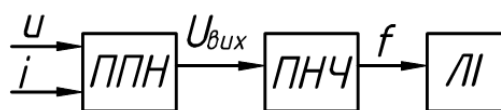
де  $T$  – період зміни струму  $i$  та напруги  $u$ , с.

**Електронні лічильники** активної енергії будуються на основі перетворювача потужності з наступним інтегруванням його вихідної величини

відповідно до залежності  $W = \int_{t_1}^{t_2} p \cdot dt$ . Одна з можливих структурних схем

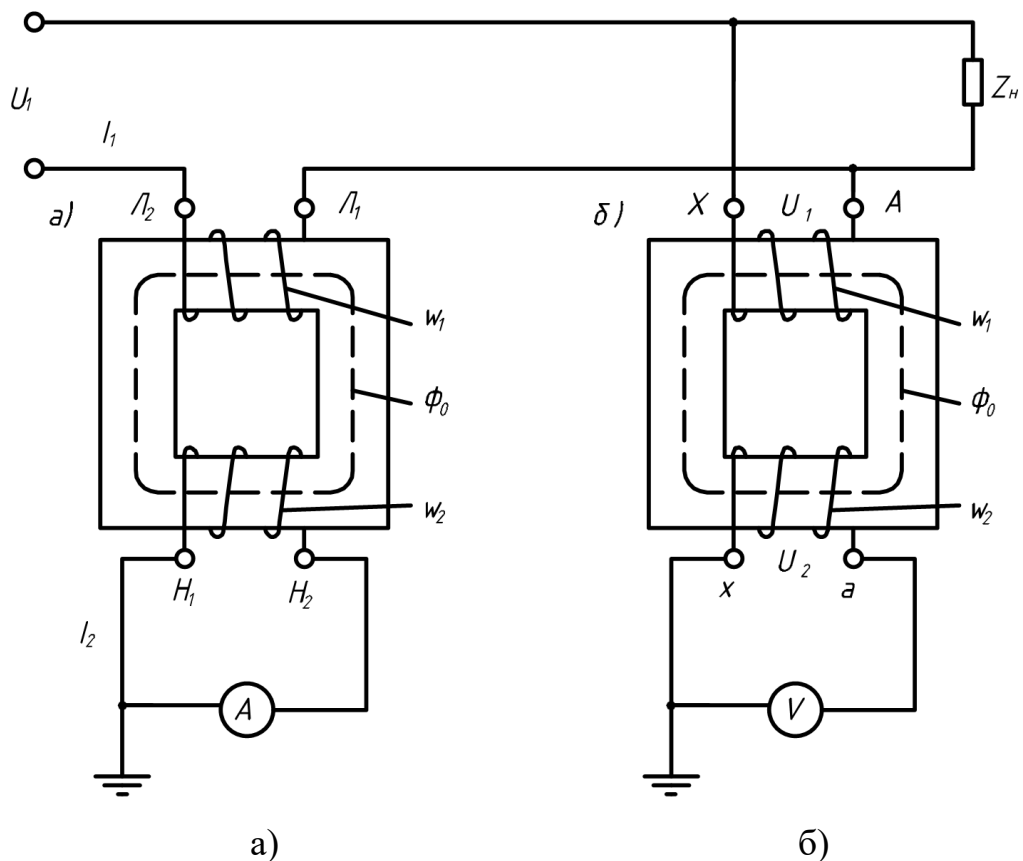
такого лічильника зображена на рис. 2.2, де *ППН* – перетворювач потужності в напругу; *ПНЧ* – перетворювач напруги в частоту; *ЛІ* – лічильник імпульсів. Як було показано,  $U_{вих}$  пропорційна активній потужності  $P$ . За допомогою *ПНЧ* напруга  $U_{вих}$  перетвориться в частоту  $f$  імпульсів, що пропорційна потужності  $P$ . Вихідні імпульси *ПНЧ* підраховуються (інтегруються) лічильником імпульсів *ЛІ*. Отже, покази *ЛІ* пропорційні активній енергії  $W$ .

Електронні лічильники активної енергії змінного струму, що серійно випускаються в наш час, мають клас точності 0,2-2,5. Лічильник САЗУ-И670Д, розрахований на номінальні струми 5 і 10 А і напруги 220 В й 380 В, має клас точності 2,0.



**Рис. 2.2. Структурна схема електронного лічильника активної енергії**

**Вимірювальні трансформатори змінного струму.** Використовуються як перетворювачі великих змінних струмів і напруг у відносно малі струми й напруги, допустимі для вимірювання приладами з невеликими стандартними межами виміру (наприклад, 5 А, 100 В). Застосуванням вимірювальних трансформаторів у колах високої напруги досягається безпека для персоналу, що обслуговує технічні системи, тому що технічні системи при цьому вмикаються в заземлене коло низької напруги (рис. 2.3).



**Рис. 2.3. Схеми вмикання вимірювальних трансформаторів струму (а) і напруги (б)**

Вимірювальні трансформатори складаються із двох ізольованих одна від одної обмоток: первинної з числом витків  $w_1$  і вторинної –  $w_2$ , вміщених на феромагнітне осердя (рис. 2.3 а і б). Для правильного вмикання трансформаторів і приладів затискачі трансформатора позначають, як зображено на рис. 2.3.

У трансформаторах струму, як правило, первинний струм  $I_1$  більший вторинного  $I_2$ , тому в них  $w_1 < w_2$ . У трансформаторах струму з  $I_{1н}$  понад 500 А первинна обмотка може складатися з одного витка у вигляді шини, що проходить через вікно магнітопроводу трансформатора.

У трансформаторах напруги первинна напруга  $U_1$  більша вторинної  $U_2$ , тому в них  $w_1 > w_2$ . Вторинна номінальна напруга  $U_{2н}$  у стандартних трансформаторів становить 100 або  $100/\sqrt{3}$  В при різних значеннях первинної номінальної напруги  $U_{1н}$ .

За схемами ввімкнення у вимірюване коло і за умовою роботи трансформатори струму й напруги відрізняються один від одного. Первинну обмотку трансформатора струму вмикають у вимірюване коло послідовно, а

трансформаторів напруги – паралельно. Вимірювальні технічні системи вмикають у вторинну обмотку трансформаторів.

За показами приладів можна визначити значення вимірюваних величин. Для цього покази приладів помножити на коефіцієнти  $K_I$  і  $K_U$ . Для трансформатора струму  $K_I = I_1 / I_2$ , а для трансформатора напруги  $K_U = U_1 / U_2$ . Коефіцієнти  $K_I$  і  $K_U$  називають дійсними коефіцієнтами трансформації.

Як буде показано нижче,  $I_2$  і  $U_2$  змінюються не пропорційно  $I_1$  і  $U_1$ ,  $K_I$  і  $K_U$  непостійні. Вони залежать від значень струмів і напруг, характеру і значення навантаження вторинного кола, частоти струму, а також від конструкції трансформатора та матеріалу магнітопроводу і зазвичай невідомі. Тому покази приладів множать не на дійсні, а на постійні номінальні коефіцієнти трансформації:

$$K_{In} = I_{1n} / I_{2n} ; K_{Un} = U_{1n} / U_{2n}.$$

Визначення вимірюваних величин за номінальними коефіцієнтами трансформації призводить до похибок. Відносна похибка (у відсотках) унаслідок нерівності дійсного й номінального коефіцієнтів трансформації для трансформатора струму

$$f_I = 100 \cdot (I_1' - I_1) / I_1 = 100 \cdot (K_{In} - K_I) / K_I,$$

де  $I_1' = K_{In} \cdot I_2$  і  $I_1 = K_I \cdot I_2$ , а для трансформатора напруги

$$f_U = 100 (U_1' - U_1) / U_1 = 100 (K_{Un} - K_U) / K_U,$$

де  $U_1' = K_{Un} / U_2$  і  $U_1 = K_U \cdot U_2$ .

Похибку  $f_I$  називають струмовою похибкою, а  $f_U$  – похибкою напруги. У вимірювальних трансформаторах є ще так названа кутова похибка через неточність передавання фази первинної величини вторинній величині. Кутова похибка вимірювальних трансформаторів впливає на покази приладів, відхилення рухомої частини яких залежить від фазового зсуву між струмами в колах цих приладів. До них відносяться ватметри, лічильники електричної енергії, фазометри.

Як відомо з теорії трансформаторів, в ідеальному випадку фазовий зсув між вектором вторинного струму  $I_2$  трансформатора струму й вектором первинного струму  $I_1$  становить 180 град. Такий же фазовий зсув повинен бути

між векторами вторинної  $U_2$  і первинної  $U_1$  напруг у трансформаторі напруги. У реальних трансформаторах кут між поверненим на  $180^\circ$  вектором вторинної величини ( $-I_2$  або  $-U_2$ ) і відповідним вектором первинної величини ( $I_1$  або  $U_1$ ) не дорівнює нулю, а становить кут  $\delta$ , який називають кутовою похибкою трансформатора. Похибка вважається позитивною, якщо повернений на  $180^\circ$  вектор вторинної величини випереджає вектор первинної величини.

**Вимірювальні трансформатори струму.** Трансформатор струму працює в режимі, близькому до режиму короткого замикання, тому що в його вторинну обмотку вмикаються технічні системи з малим опором. Повний сумарний опір  $Z = R + jX$  приладів і підвідних проводів є навантаженням трансформатора струму.

На рис. 2.4 зображена векторна діаграма трансформатора струму, побудова якої почата з вектора  $I_2 \cdot w_2$  – магніторушійної сили (МРС) вторинної обмотки. Вектор напруги  $U_2$  отриманий як сума векторів спадів напруги  $I_2 \cdot R$  і  $I_2 \cdot X$  на активному  $R$  і реактивному  $X$  опорах навантаження при струмі  $I_2$  у вторинному колі трансформатора. Вектор електрорушійної сили  $E_2$ , яка наводиться у вторинній обмотці потоком  $\Phi_0$  сердечника, отриманий у результаті додавання вектора  $U_2$  з векторами  $I_2 \cdot R_2$  і  $I_2 \cdot X_2$  спадів напруги на активному  $R_2$  і реактивному  $X_2$  опорах вторинної обмотки.

Фазовий зсув між вектором МРС  $I_2 \cdot w_2$  і вектором МРС  $I_1 \cdot w_1$  становить майже  $180^\circ$ , тобто МРС  $I_2 \cdot w_2$  спричиняє розмагнічувальну дію. Внаслідок цього магнітний потік  $\Phi_0$  в осерді створюється результуючою МРС  $I_0 \cdot w_1$ . МРС  $I_0 \cdot w_1$  складається з реактивної складової  $I_\mu \cdot w_1$ , що безпосередньо створює потік  $\Phi_0$  і співпадає з ним по фазі, і активної складової  $I_a \cdot w_1$ , що випереджає  $\Phi_0$  на  $90^\circ$ , зумовленої втратами на гістерезис і вихрові струми в осерді. Вектор  $I_1 \cdot w_1$  отриманий додаванням вектора МРС  $I_0 \cdot w_1$  з поверненим на  $180^\circ$  вектором МРС  $-I_2 \cdot w_2$ , тобто  $I_1 \cdot w_1 = I_0 \cdot w_1 + (-I_2 \cdot w_2)$  або  $I_0 \cdot w_1 = I_1 \cdot w_1 + I_2 \cdot w_2$ .

При номінальному режимі роботи трансформатора струму МРС  $I_0 \cdot w_1$  звичайно становить не більше 1 % від МРС  $I_1 \cdot w_1$  (або  $I_2 \cdot w_2$ ). При достатній потужності джерела первинного струму розмикання вторинного ланцюга трансформатора струму викличе значне збільшення  $\Phi_0$ , тому що в цьому випадку  $I_0 \cdot w_1 = I_1 \cdot w_1$ . Розмикання цього кола – аварійний випадок, тому що зростання потоку в осерді призводить до великого збільшення ЕРС (до декількох сотень вольт), що небезпечно для обслуговуючого персоналу й може викликати електричний пробій ізоляції вторинної обмотки. Крім того, збільшення потоку супроводжується зростанням втрат на перемагнічування і

вихрові струми, підвищення температури осердя, а отже й обмоток, і може стати причиною термічного руйнування їхньої ізоляції.

Знайдемо вираз для струмової  $f_I$  і кутової  $\delta_I$  похибок. Із трикутників ОВС й АВС (рис. 2.4) маємо

$$I_1 w_1 = OB / \cos \delta_I = [I_2 \cdot w_2 + I_0 \cdot w_1 \cdot \cos(\varphi_0 - \psi_2)] / \cos \delta_I,$$

де  $\varphi_0$  – кут між векторами  $I_0 \cdot w_1$  і  $I_a \cdot w_1$ ;

$\psi_2$  – кут між векторами  $I_2 \cdot w_2$  й ЕРС  $E_2$ .

Оскільки кут  $\delta_I$  малий (не більше  $1^\circ$ ), то можна вважати  $\cos \delta_I \approx 1$ . Тоді

$$I_1 = [I_2 \cdot w_2 + I_0 \cdot w_1 \cdot \cos(\varphi_0 - \psi_2)] / w_1.$$

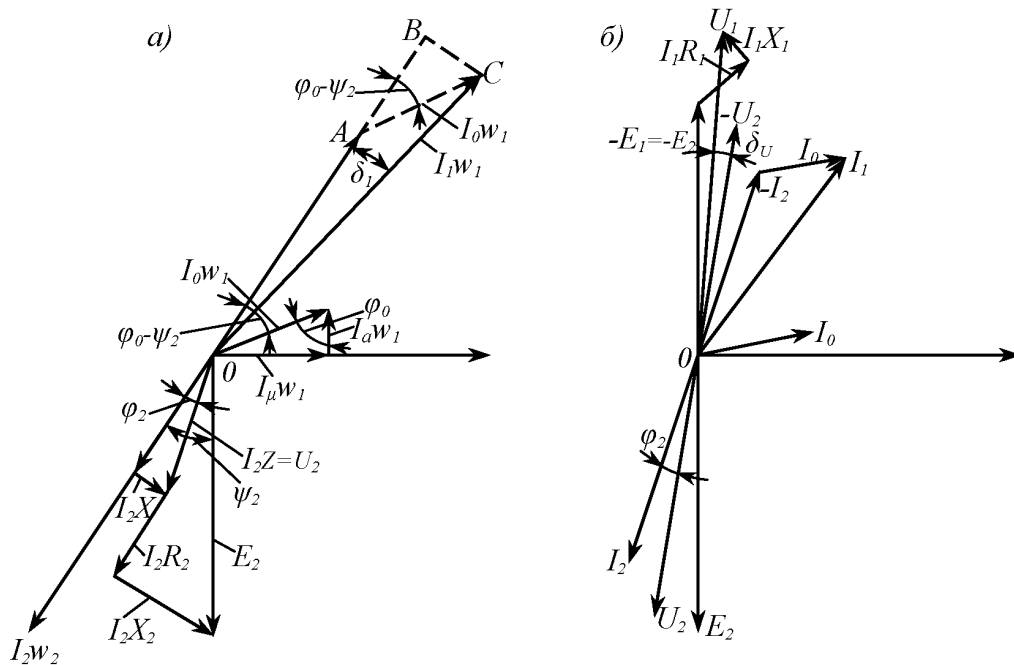


Рис. 2.4. Векторна діаграма трансформатора струму (а) та напруги (б)

Дійсний коефіцієнт трансформації

$$K_I = I_1 / I_2 = w_2 / w_1 + [I_0 \cdot \cos(\varphi_0 - \psi_2)] / I_2. \quad (2.1)$$

Струмова похибка (у відсотках)

$$f_I = 100 \cdot (K_{In} - K_I) / K_I \approx (1 - K_I / K_{In}) \cdot 100, \quad (2.2)$$

тому що в знаменнику можна замінити  $K_I$  на  $K_{Ih}$  зважаючи на те, що вони мало відрізняються одна від одної.

Підставляючи у вираз (2.2) значення з (2.1), отримаємо (у відсотках)

$$f_I = \left[ 1 - \frac{w_2}{w_1 \cdot K_{Ih}} - \frac{I_0 \cdot \cos(\varphi_0 - \psi_2)}{K_{Ih} \cdot I_2} \right] \cdot 100. \quad (2.3)$$

З діаграми (рис. 2.4)

$$\operatorname{tg} \delta_I = \frac{BC}{OB} = \frac{I_0 \cdot w_1 \sin(\varphi_0 - \psi_2)}{I_2 \cdot w_2 + I_0 \cdot w_1 \cdot \cos(\varphi_0 - \psi_2)}. \quad (2.4)$$

Оскільки  $I_0 \ll I_2$ ,  $w_1 < w_2$  і  $\cos(\varphi_0 - \psi_2) < 1$ , то другим доданком у знаменнику виразу (2.4-2.5) можна знехтувати. Крім того, через малу величину кута  $\delta_I$  можна вважати  $\operatorname{tg} \delta_I = \delta_I$ . Тоді кутова похибка (у радіанах)

$$\delta_I = [I_0 \cdot w_1 \cdot \sin(\varphi_0 - \psi_2)] / (I_2 \cdot w_2) \quad (2.5)$$

З векторної діаграми й рівнянь похибок випливає, що збільшення навантаження, тобто ввімкнення великої кількості приладів, призводить до підвищення ЕРС  $E_2$ , що, у свою чергу, пов'язане зі збільшенням струму  $I_0$  і похибок.

При зростанні індуктивного опору навантаження кут  $\psi_2$  збільшується, що призводить до збільшення струмової похибки  $f_I$  і до зменшення кутової похибки  $\delta_I$ , бо  $\cos(\varphi_0 - \psi_2)$  при цьому зростає, а  $\sin(\varphi_0 - \psi_2)$  – зменшується [див. вирази (2.3) і (2.5)].

Для переносних багатограничних вимірювальних трансформаторів струму встановлені класи точності від 0,01 до 0,2. Їх виготовляють на номінальну частоту або область номінальних частот від 25 Гц до 10 кГц. Трансформатори струму випускають на номінальні значення первинного струму від 0,1 А до 30 кА і на номінальне значення вторинного струму 5 А. Для частоти 50 Гц допускається виготовлення трансформаторів струму на номінальний вторинний струм 1 і 2 А.

Стационарні трансформатори струму для частоти 50 Гц виробляють на номінальні первинні струми від 1 А до 40 кА й номінальні вторинні струми 1, 2, 2,5, 5 А. Класи точності цих трансформаторів від 0,2 до 10. Клас точності стаціонарних трансформаторів струму визначає граничні значення струмової й кутової похибок. Зокрема, для трансформаторів класів точності від 0,2 до 1

допустиме значення струмової похибки, що відповідає класу точності, має місце при значенні первинного струму 100-120 % номінального, а для трансформаторів більш низьких класів точності – при значенні первинного струму 50-120 %. При інших значеннях первинного струму допустима струмова похибка збільшується.

Трансформатори струму виготовляють на певне номінальне навантаження, наприклад, для стаціонарних трансформаторів від 2,5 до 100 ВА.

Конструктивне оформлення трансформаторів струму різне залежно від призначення, робочої напруги, класу точності і значення первинного номінального струму.

### **2.3. Схема установки**

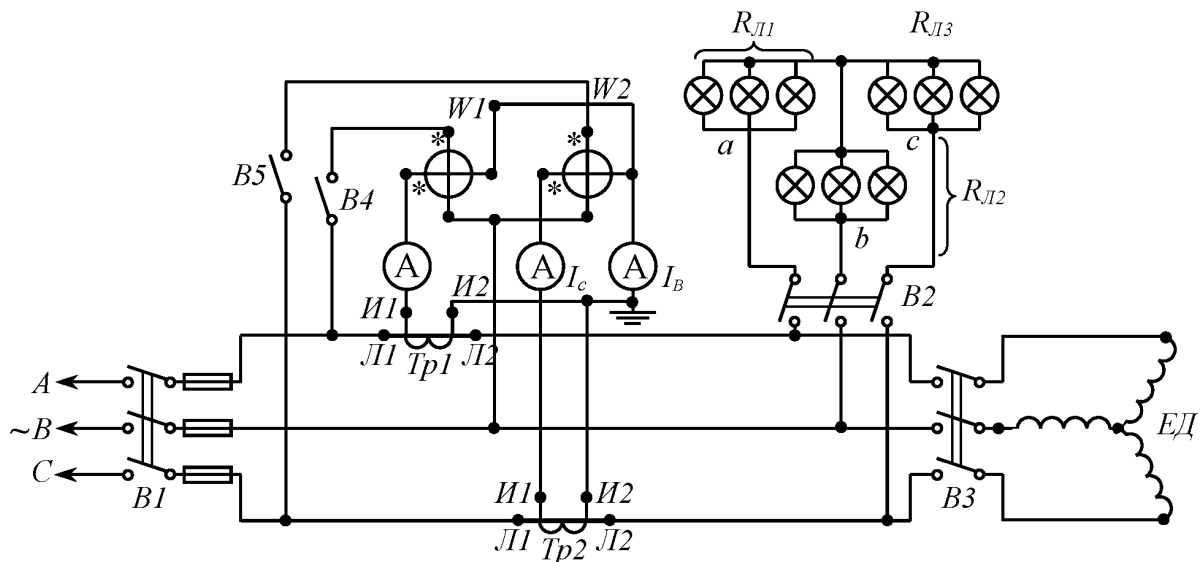
Як відомо, вимірювальні трансформатори струму застосовують для розширення межі вимірювання приладів по струму, тобто тоді, коли в колі сила струму значно перевищує межу вимірювального приладу. Наприклад, сила струму в колі досягає 20–30 А, а межа приладу допускає виміряти силу струму до 5 А. Однак може вийти, що в колі сила струму значно менша, ніж межа вимірювань приладів. У цьому випадку також можуть застосовуватися вимірювальні трансформатори струму, в яких номінальний струм вторинного кола відповідає даним приладів.

У лабораторній роботі передбачено саме цей варіант, тому що електромережа лабораторій електричних вимірювань не завжди розраховується на велику силу струму.

Для роботи найпридатніші вимірювальні трансформатори струму типу И54. Номінальний струм їхнього первинного кола  $I_{H1} = 0,5 - 1 - 2 - 5 - 10 - 20 - 50$  А, а вторинного  $I_{H2} = 5$  А. Первинні обмотки трансформаторів вмикають у фази А і С (рис. 2.5) трипроводового вимірювального кола трифазного струму на межу 2 А. До їхніх вторинних обмоток приєднують кола, що складаються з амперметра і струмової обмотки ватметра, з'єднаних послідовно. Третій амперметр увімкнений у загальний провід. Він контролює силу струму фази.

Контрольні амперметри вмикають на межі вимірювання 0–5А, а вольтметр – на межу 0–300 В. До його затискачів приєднують провідники, кінці яких мають щупи з ізольованими ручками.





**Рис. 2.5. Схема вмикання приладів через вимірювальні трансформатори струму при вимірі потужності в колі трифазного струму**

Активним навантаженням кола служить ламповий реостат. Потужність ламп у кожній фазі складає 200 Вт (лампи по 100, 75 і 25 Вт). Для вмикання реостата в коло призначений вимикач  $B2$ . Вимикачем  $B3$  можна ввімкнути реактивне навантаження – електродвигун трифазного струму потужністю не більше 0,7 кВт.

Вимірюване коло приєднане до лабораторного блоку живлення типу БП 4822-2 у якому змонтовані вимикач  $B1$  та запобіжники, яким воно під'єднується до електромережі трифазного струму.

#### 2.4. Хід роботи

1. Ознайомитися з приладами й обладнанням, призначеними для роботи. З'ясувати і записати їх основні технічні характеристики.

2. Визначити затискачі послідовних і паралельних обмоток ватметрів. Якщо застосовано двоелементний ватметр, необхідно визначити належність обмоток окремим елементам і генераторні затискачі, зазвичай позначені на приладах зірочками.

Аналогічно визначити лінійні ( $L1$  і  $L2$ ) і вимірювальні ( $B1$  і  $B2$ ) затискачі вимірювальних трансформаторів струму.

3. Скласти на робочому столі схему установки за рисунком для вимірювання потужності в трипровідному колі трифазного струму. При

з'єднанні приладів звернути увагу на правильність вмикання трансформаторів струму і ватметрів відповідно до позначень біля їхніх затискачів.

Визначити ціну поділки ватметрів і амперметрів, а також номінальний коефіцієнт трансформації  $K_I$  вимірювальних трансформаторів струму з огляду на те, що їхні первинні обмотки ввімкнені на межі 0–2 А. Усі дані записати в робочий зошит.

Складену схему перевірити й показати її для перевірки викладачеві. Отримавши його дозвіл, виконати вказівки наступних пунктів.

4. Виміряти активну потужність при двох різних значеннях величини активного навантаження. Для цього спочатку встановити однакові навантаження в лампових реостатах  $R1, R2, R3$  (вкрутити в патрони кожного реостата лампи, потужність яких у кожному реостаті повинна складати 125 Вт).

Замкнути вимикач  $B2$ . Спостерігаючи за приладами, вимикачем  $B1$  увімкнути вимірюване коло в електромережу.

Переконайтеся в тому, що покази ватметрів  $P_1 = P_2$ . Зняти і записати в таблицю 2.1 покази приладів: амперметрів  $I_A, I_B, I_C$ , ватметрів  $P_1$  і  $P_2$ . Змінити також напругу  $U_{a0}, U_{b0}, U_{c0}$  на затискачах кожного з навантажувальних лампових реостатів  $R1, R2, R3$  і лінійну напругу  $U_{Л}$ . Вимикачем  $B1$  вимкнути мережу.

Таблиця 2.1

Результати вимірювань потужності трифазного струму при вмиканні приладів через вимірювальні трансформатори струму

№ спостереження	Виміряні величини									Обчислені величини								
	$I_A$	$I_B$	$I_C$	$U_{A0}$	$U_{B0}$	$U_{C0}$	$U_{Л}$	$P_1$	$P_2$	$K_H$	$P_A$	$P_B$	$P_C$	$P$	$P'$	$Q$	$\cos \varphi$	$\varphi$
Од. вим	А	А	А	В	В	В	В	Вт	Вт	-	Вт	Вт	Вт	Вт	Вт	вар	-	град
1.																		
2.																		
3.																		
4.																		

5. Вкрутити всі лампи в лампові реостати (потужність ламп у кожному реостаті складає 200 Вт). Потім увімкнути електромережу і виконати вимірювання, зазначені в попередньому пункті, переконавшись, що покази ватметрів однакові:  $P_1 = P_2$ .

П р и м і т к а. Якщо в схему ввімкнений двоелементний ватметр, то покази  $P_1$  знімають при ввімкненому вмикачі  $B4$  і вимкненому вмикачі  $B5$ , а покази  $P_2$  — при ввімкненому вмикачі  $B5$  і вимкненому  $B4$ . Закінчивши вимірювання, вимикають електроживлення вимірюваного кола вимикачем  $B1$ .

6. За даними вимірювань пунктів 4 і 5, записаних у таблицю, обчислити:

а) активну потужність у трифазному колі

$$P = (P_1 + P_2) \cdot K_H;$$

б) активну потужність кожної фази

$$P_A = I_A \cdot K_H \cdot U_{a0}; \quad P_B = I_B \cdot K_H \cdot U_{b0}; \quad P_C = I_C \cdot K_H \cdot U_{c0};$$

в) сумарну активну потужність усіх фаз

$$\sum P_\phi = P_A + P_B + P_C = P'.$$

Результати обчислень також записати в таблицю. Необхідно переконатися, що в усіх випадках вимірювань за вказівками пунктів 4 і 5  $P=P'$   $Q = K_H \cdot \sqrt{3}(P_1 - P_2) = 0$ . Якщо виявляться розбіжності між величинами потужностей  $P$ , необхідно з'ясувати причину й усунути помилки.

7. Виміряти активну потужність трифазного струму в трипроводовому колі при нерівномірному активному навантаженні фаз. Для цього встановити різні значення навантажень у кожній фазі за допомогою лампових реостатів  $R1, R2, R3$  і повторити всі регулювання і вимірювання, описані в пунктах 4 і 5. Покази приладів і результати розрахунків, виконаних за вказівками пункту 6, записати в таблицю.

8. Виміряти активну потужність трифазного струму в трипроводовому

колі при рівномірному реактивному навантаженні фаз. Вимикачем  $B2$  вимкнути ламповий навантажувальний реостат і вмикачем  $B3$  увімкнути реактивне навантаження. Замкнути вимикач  $B1$  і зняти покази приладів, після чого відключити електроживлення.

За даними вимірювань обчислити такі величини:

а) активну потужність у трифазному колі за показами ватметрів

$$P = (P_1 + P_2)K_H;$$

б) коефіцієнт потужності

$$\cos \varphi = P / (\sqrt{3} \cdot I \cdot U)$$

Силу струму  $I$  визначають як добуток показів одного з амперметрів на номінальний коефіцієнт трансформації  $K_H$  трансформатора струму;

в) кут зсуву фаз  $\varphi$ .

Переконатися в тому, що реактивна потужність не дорівнює нулю:

$$Q = \sqrt{3}(P_1 - P_2)K_H = \sqrt{3} \cdot I \cdot U_n \cdot \sin \varphi.$$

Результати усіх вимірювань і обчислень записати в таблицю і показати викладачеві. Отримавши його дозвіл, розібрати схему установки.

П р и м і т к а . Див. примітку до пункту 7 опису виконання попередньої роботи.

## 2.5. Контрольні запитання

1. Як позначені лінійні й вимірювальні затискачі вимірювальних трансформаторів струму, що застосовувалися в роботі?

2. У які фази трипровідного вимірюваного кола і як вмикали трансформатори струму?

3. До яких затискачів вимірювальних трансформаторів струму під'єднували вимірювальні технічні системи?

4. Як визначали ціну поділки шкал амперметрів і ватметрів, увімкнених через вимірювальні трансформатори струму?

5. Як вимірювали активну потужність трифазного струму при рівномірному активному навантаженні?

6. Наскільки відрізнялися покази ватметрів при вимірюванні

активної потужності при нерівномірному активному навантаженні?

7. Чим відрізняється вимірювання активної потужності трифазного струму при реактивному навантаженні від вимірювання при активному навантаженні?

8. Чи відрізнялися величини активної потужності трифазного струму, визначені за показниками ватметрів, від величин, обчислених за показниками амперметрів і вольтметрів? Якщо відрізнялися, то з якої причини?

9. Як визначають величину реактивної потужності трифазного струму при вимірюваннях із умиканням приладів через вимірювальні трансформатори струму?

10. Як визначають кут зсуву фаз при вимірюванні активної потужності трифазного струму з реактивним навантаженням кола?

## Лабораторна робота №3

### ВМИКАННЯ В КОЛО І ПОВІРКА ОДНОФАЗНОГО ЛІЧИЛЬНИКА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

**Мета роботи.** Ознайомитися з конструкцією індукційного однофазного лічильника електричної енергії. Навчитися вмикати лічильник у коло навантаження і перевіряти правильність показів при різних величинах кута зсуву фаз між струмом і напругою у вимірюваному колі

#### *3.1. Технічні системи й обладнання*

1. Однофазний лічильник електричної енергії.
2. Ватметр однофазний.
3. Амперметр і вольтметр.
4. Реостат (потенціометр).
5. Силовий понижуючий трансформатор.
6. Два повзункових регулювальних реостати.
7. Однополюсний перемикач на два положення.
8. Секундомір електричний або годинник із секундною стрілкою.
9. З'єднувальні провідники з наконечниками .

#### *3.2. Теоретичні відомості*

Індукційні технічні системи складаються з індукційного вимірювального механізму (ВМ) з відліковим пристроєм і вимірювальною схемою.

Принцип дії індукційних ВМ заснований на взаємодії магнітних потоків електромагнітів і вихрових струмів, які індукуються магнітними потоками в рухомій частині, виконаній у вигляді алюмінієвого диска.

У даний час із індукційних приладів виготовляють *лічильники електричної енергії* для кіл змінного струму.

Будова і схема вмикання індукційного лічильника показані на рис. 3.1, де 1 – тристержневий магнітопровід з обмоткою напруги; 2 – лічильний механізм; 3 – закріплений на осі алюмінієвий диск; 4 – постійний магніт для створення гальмівного моменту; 5 – П-подібний магнітопровід зі струмовою обмоткою.

Аналіз роботи індукційного лічильника показує, що обертовий момент пропорційний потужності змінного струму

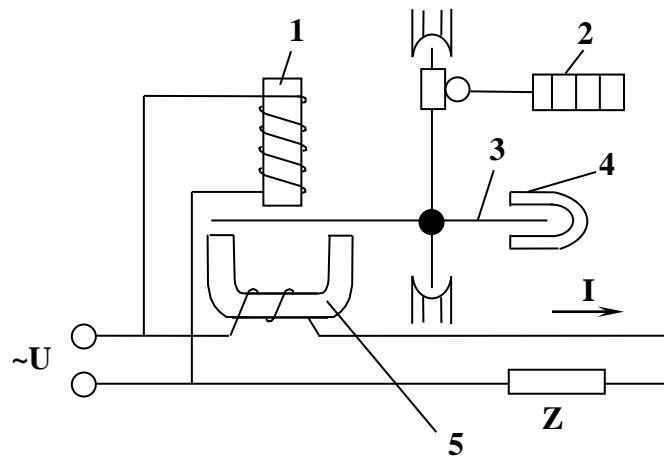
$$M_{об} = k \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi, \quad (3.1)$$

де  $k$  – постійний коефіцієнт.

На рухому частину лічильника (алюмінієвий диск) діє гальмівний момент, пропорційний частоті обертання диска. Цей момент створюється в результаті дії наведеного струму в диску, який обертається між полюсами постійного магніту, і визначається виразом

$$M_z = k_1 \frac{d\alpha}{dt}, \quad (3.2)$$

де  $k_1$  – постійний коефіцієнт;  $d\alpha/dt$  – частота обертання диска.



**Рис. 3.1.** Будова і схема вмикання індукційного лічильника

Прирівнюючи обертовий і гальмівний моменти, отримаємо

$$k \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi = k_1 \frac{d\alpha}{dt}. \quad (3.3)$$

Число обертів диска  $N$  за час  $\Delta t$  вимірювання енергії визначається інтегралом по часу від частоти обертання диска  $d\alpha/dt$

$$N = k_2 \int_0^{\Delta t} \frac{d\alpha}{dt} dt = k_2 \frac{k}{k_1} \int_0^{\Delta t} U \cdot I \cdot \cos \varphi \cdot dt = \frac{W}{C}, \quad (3.4)$$

де  $C = k_1 / k k_2$  – стала лічильника;  $W$  – енергія, що пройшла через лічильник за інтервал часу  $\Delta t$ .

Відлік енергії проводиться за показами лічильного механізму – лічильника обертів, градуйованого в одиницях енергії. Одиниці електричної енергії (зазвичай 1 кВт·год), реєстрованої рахунковим механізмом, відповідає певному числу обертів рухомої частини лічильника. Це співвідношення, назване передаточним числом  $A$ , вказується на лічильнику.

Величину, зворотну передаточному числу, тобто відношення зареєстрованої енергії до числа обертів диска, називають номінальною сталою  $C_{\text{ном}}$ . Значення  $A$  і  $C_{\text{ном}}$  залежать тільки від конструкції лічильного механізму й для даного лічильника залишаються незмінними.

Під дійсною сталою лічильника  $C_0$  розуміють кількість енергії, що дійсно пройшла через лічильник за один оберт рухомої частини. Дійсна стала на відміну від номінальної залежить від струму навантаження, а також від зовнішніх умов (температури, частоти й т.д.). Знаючи  $C_0$  і  $C_{\text{ном}}$ , можна визначити відносну похибку лічильника:

$$\gamma_W = (W' - W) / W = (C_{\text{ном}} - C_0) / C_0, \quad (3.5)$$

де  $W'$  – енергія, виміряна лічильником, кВт·год;

$W$  – дійсне значення енергії, що пройшла через лічильник, кВт·год.

Лічильники активної енергії випускають класів точності 0,5; 1,0; 2; 2,5; лічильники реактивної енергії – 1,5; 2 й 3. Клас точності лічильників нормує відносну основну похибку й інші метрологічні характеристики.

Державним стандартом встановлюється межа чутливості (у відсотках) лічильника, зумовлена виразом  $\Delta S = 100 \cdot I_{\text{мін}} / I_{\text{ном}}$ , де  $I_{\text{мін}}$  – мінімальне значення струму, при якому диск лічильника починає неспинно обертатися;  $I_{\text{ном}}$  – номінальне для лічильника значення струму в струмовій обмотці. При цьому напруга й частота струму в колі повинні бути номінальними, а  $\cos \varphi = 1$ .

Відповідно до ГОСТу 6570 – 75 межа чутливості не повинна перевищувати 0,4 % – для лічильників класу точності 0,5 й 0,5 % – для класів 1,0; 1,5 і 2. Для



лічильників реактивної енергії класів 2,5 й 3 значення  $\Delta S$  повинно бути не більше 1 %.

Обертання диска за відсутності струму в навантаженні й за наявності напруги в паралельному колі лічильника називають самоходом. Відповідно до ГОСТу 6570 – 75 самоходу не повинно бути при будь-якій напрузі від 80 до 110 % номінальної.

Похибка лічильника залежить від режиму його роботи, тому державним стандартом нормується різна відносна похибка при різних навантаженнях.

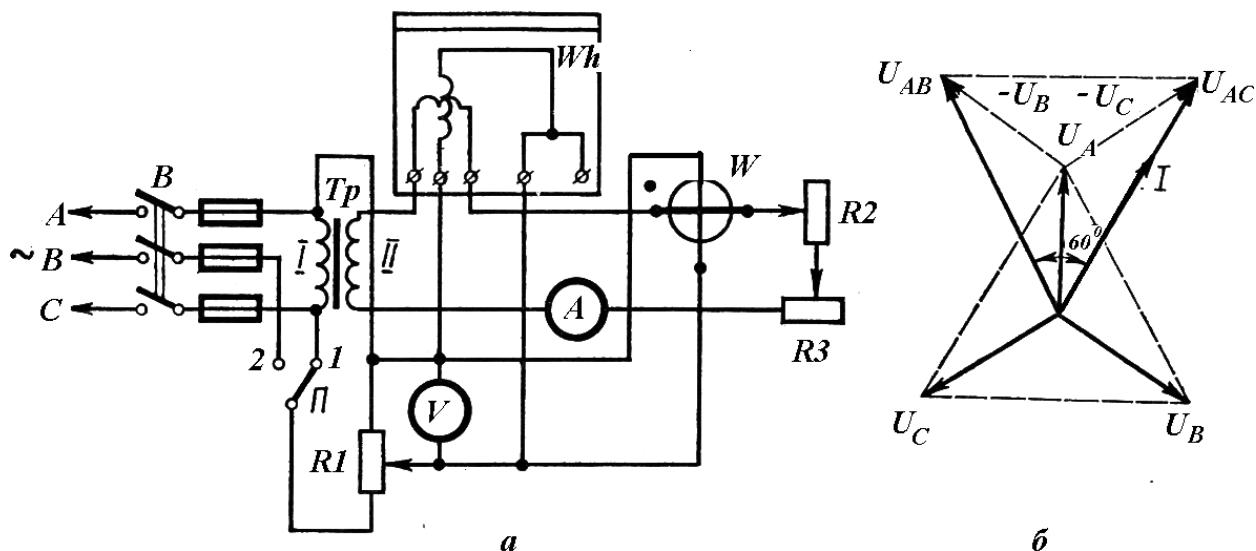
Під дією зовнішніх факторів у лічильника з'являються додаткові похибки, також нормовані державним стандартом. Додаткові похибки виникають унаслідок викривлення форми кривої струму й напруги, коливань напруги й частоти, різкого перепаду потужності, споживанням навантаження, і деякими іншими факторами.

Крім однофазних індукційних лічильників, промисловість випускає також трифазні лічильники активної й реактивної енергії. Трифазні лічильники являють собою три (триелементні) або два (двоелементні) лічильники, об'єднані однією віссю обертання. Двоелементні лічильники застосовують при вимірюванні енергії в трипровідних трифазних колах, а триелементні лічильники – у чотирипровідних колах.

### 3.3. Схема установки

Для дослідження в роботі застосовують однофазний лічильник електричної енергії з номінальною силою струму 5 А. Його вмикають за схемою з двома незалежними колами живлення (рис. 3.2 а). При такому вмиканні приладів зменшується потужність, яка необхідна для живлення послідовного кола, і відпадає необхідність у громіздких навантажувальних реостатах.

У схемі застосований понижуючий трансформатор  $T_p$ , первинна обмотка I, яка ввімкнена між фазами А і С (лінійна напруга 220 В). До вторинної II понижуючої обмотки приєднане коло, що складається з послідовно з'єднаних струмових обмоток лічильника  $Wh$ , ватметра  $W$ , двох регулювальних реостатів  $R_2$ ,  $R_3$  і контрольного амперметра  $A$ . Понижуюча обмотка повинна забезпечувати напругу 4-6 В при силі струму в колі близько 6 А.



**Рис. 3.2. Перевірка індукційного лічильника:**

***а* – схема вмикання приладів; *б* – векторна діаграма вимірювального кола**

Ватметр може бути електродинамічної або феродинамічної системи. Його струмову обмотку вмикають на межу вимірювань 5 А, а обмотку напруги — на 300 В. Для заданих вимірювань можна застосувати ватметр одного з наступних типів: Д539/1, Д539/2, Д539/3, Д539/4, Д529/4, Д529/5 і подібних їм.

Контрольний амперметр *A* типу Э59/3 або Э59/4 ввімкнений на межу вимірювання 0-5 А.

У паралельні частини кола входять вольтметрові обмотки ватметра *W*, лічильника *Wh*, вольтметр *V* і повзунковий тризатискний реостат *R1*. До його повзунка приєднані всі обмотки вказаних приладів. Вольтметр *V* увімкнений на межу вимірювання 300 В. Нижній (на схемі) затискач реостата *R1* з'єднаний з рухомим контактом перемикача *П*, що має два положення. У положенні 1 реостат з'єднаний з фазою *C*. У цьому випадку при ввімкненому вимикачі *B* струм *I* у послідовному колі схеми збігається за фазою з напругою  $U_{AC}$ , прикладеною до паралельно ввімкнених вимірювальних приладів (рис. 3.2 б).

Навантаження кола чисто активне і  $\cos\varphi = 1$ . У положенні 2 перемикача *П* послідовне коло залишається під напругою  $U_{AC}$ , а до паралельного кола подається напруга  $U_{AB}$ , що випереджає напругу  $U_{AC}$  на кут  $60^\circ$ . Тому сила струму *I* у послідовному колі відстає по фазі від напруги  $U_{AB}$  на кут  $60^\circ$  і коефіцієнт потужності  $\cos\varphi = 0,5$ .

Таке вмикання реостата R1 дозволяє досліджувати роботу лічильника в різних умовах і з'ясувати вплив зміни кута зсуву фаз на його покази. Опір реостата R1 повинен бути до 10000 Ом для сили струму 1 А.

Живлення вимірювальної установки, як показано на схемі, здійснюється від мережі трифазного струму з лінійною напругою 220 В.

### 3.4. Хід роботи

1. Ознайомитися з приладами, наданими для виконання роботи. Визначити і записати їх основні технічні характеристики.

З'ясувати специфічні дані приладів. У лічильника електричної енергії визначити лінійні й навантажувальні затискачі, накреслити їхнє розташування в клемній коробці.

Ознайомитися з даними, наведеними на щитку лічильника, і записати в робочий зошит: номінальну силу струму, номінальну напругу, число обертів диска на 1 кВт·год, одиниці вимірювання енергії електричного струму, які реєструються лічильником.

У ватметра визначити генераторні й навантажувальні затискачі (послідовної й паралельної обмоток). Ознайомитися зі шкалою приладу, визначити ціну поділки шкали і можливі перемикання меж вимірювання. Усі дані записати в робочий зошит.

2. На робочому столі скласти схему установки (рис. 3.2 а). Перевірити її самому і показати для перевірки викладачеві. Отримавши його дозвіл, можна виконувати роботу.

а) при проходженні струму тільки в паралельному колі диск лічильника, зробивши після вмикання не більш одного оберту, повинен залишатися нерухомим при напрузі 80–110 % від номінальної;

б) відносна похибка однофазних лічильників при  $\cos\varphi=1$  і струмі, що дорівнює 10 % номінального, для лічильників 1-го класу повинна бути не більше  $\pm 1$  %, 2-го класу – не більше  $+2$  % і 3-го класу – не більше  $\pm 3,5$  %, при струмі 10 % – 200 % (від номінального і до максимального), якщо такий зазначений на лічильнику, похибка може бути для лічильників 2-го класу  $\pm 2$  %, для 3-го класу –  $\pm 2,5$  %.

Примітка. Якщо при встановленні однофазний лічильник вмикають у коло однофазного струму, то фазний провід обов'язково приєднують до 1-го (генераторного) затискача в

клемній коробці, а нульовий провід — до 3-го затискача. До 2-го і 4-го затискачів під'єднують навантаження.

3. З'ясувати, чи є в лічильника холостий хід. Для цього при вимкненому вимикачі В встановити повзунок реостата  $R1$  у верхнє (за схемою) положення і відключити провід від вихідного затискача струмової обмотки ватметра  $W$ , що з'єднує з ним навантажувальний реостат  $R2$ . Потім вимикачем В увімкнути електромережу. Переміщаючи повзунок реостата вниз (за схемою), збільшити напругу, яка подається в коло, до 110 % номінальної напруги лічильника. Його диск при цьому не повинен обертатися. Якщо ж він обертається, то це означає, що в лічильника є холостий хід і він непридатний для використання.

4. Випробувавши лічильник на відсутність холостого ходу, зменшити напругу, що подається від мережі, до номінального значення напруги лічильника і вимкнути електромережу. Потім з'єднувальний провід від навантажувального реостата  $R2$ , від'єднаний від затискача ватметра  $W$ , знову приєднати до ватметра і виконати вказівки наступних пунктів.

5. Визначити похибки лічильника залежно від величини навантаження при  $\cos \varphi = 1$ .

Перемикач П установити в положення 1, повзунок реостата  $R1$  перемістити в крайнє (верхнє за схемою) положення. Реостати  $R2$  і  $R3$  ввести цілком. Увімкнувши вимикач В і переміщаючи повзунок реостата  $R1$ , встановити напругу, яка контролюється вольтметром  $V$ , дорівнює номінальній напрузі лічильника.

За допомогою реостатів  $R2$  і  $R3$  створити навантаження, яке контролюється амперметром  $A$ , що дорівнює 10 % номінального навантаження лічильника, і порахувати кількість оборотів  $N$  диска за час  $t = 120\text{--}180$  с. Виміряні при цьому величини силу струму  $I$ , напругу  $U$ , потужність  $P$ , час  $t$ , оберти диска лічильника  $N$  і величину  $\cos \varphi$  записати у таблицю 3.1.

6. Повторити спостереження за вказівками попереднього пункту при навантаженнях 25, 50, 75 і 100 % номінального навантаження лічильника, що перевіряється. Покази приладів записати в ту ж таблицю.

7. Визначити похибки лічильника залежно від величини навантаження при  $\cos \varphi = 0,5$ .

Перемикач П встановити у положення 2 і повторити усі вимірювання, зазначені в пунктах 5 і 6. Результати вимірювання записати в таблицю. Вимкнути живлення установки.

Таблиця 3.1

## Результати спостережень при перевірці лічильника

№ з/п	Виміряні величини							Обчислені величини			Примітка
	$I$	$U$	$P$	$t$	$P \cdot t$	$N$	$\cos \varphi$	$K_H$	$K$	$\gamma_w$	
	А	В	Вт	с	Вт · с	оберт.	–	$\frac{\text{Вт} \cdot \text{с}}{\text{об}}$	$\frac{\text{Вт} \cdot \text{с}}{\text{об}}$	%	
1.	1	220		120			1				
2.	2	220		120			1				
3.	3	220		120			1				
4.	4	220		120			1				
5.	5	220		120			1				
6.	1	220		120			0,6				
7.	2	220		120			0,6				
8.	3	220		120			0,6				
9.	4	220		120			0,6				
10.	5	220		120			0,6				

8. Для кожного спостереження за вказівками пунктів 5, 6, 7 вирахувати дійсну  $K$  і номінальну  $K_H$  постійні лічильника за такими формулами:

$$K = \frac{Pt}{N_t}; \quad K_H = \frac{W}{N},$$

де  $K$  – дійсна стала лічильника  $\frac{\text{Вт} \cdot \text{с}}{\text{об}}$ ;

$P$  – потужність, споживана навантаженням (за показами ватметра), Вт;

$t$  – час, за який враховувалися оберти диска лічильника, с;

$N_t$  – кількість обертів диска лічильника за час  $t$ , об;

$K_H$  – номінальна стала лічильника,  $\frac{\text{Вт} \cdot \text{с}}{\text{об}}$ ;

$W$  – одиниця енергії, яка вимірюється лічильником за  $N$  обертів (зазначена на щитку лічильника), Вт·с;

$N$  – кількість обертів диска лічильника, зазначена на його щитку, що відповідає 1 кВт·год виміряної лічильником енергії.

Наприклад, на щитку лічильника зазначено: 1 кВт·год = 2400 об, тобто  $W = 1 \text{ кВт} \cdot \text{год} = 1000 \text{ Вт} \times 60 \text{ хв} \times 60 \text{ с} = 3\,600\,000 \text{ Вт} \cdot \text{с}$ ;  $N = 2400 \text{ об}$ . Отже, номінальна стала лічильника

$$K_H = \frac{3600000}{2400} = 1500 \frac{\text{Вт} \cdot \text{с}}{\text{об}}.$$

Номинальна стала однакова для всіх спостережень. За обчисленими величинами номінальної і дійсної сталих для кожного спостереження визначити відносну похибку лічильника

$$\gamma_w = \frac{K_H - K}{K} \cdot 100 \%.$$

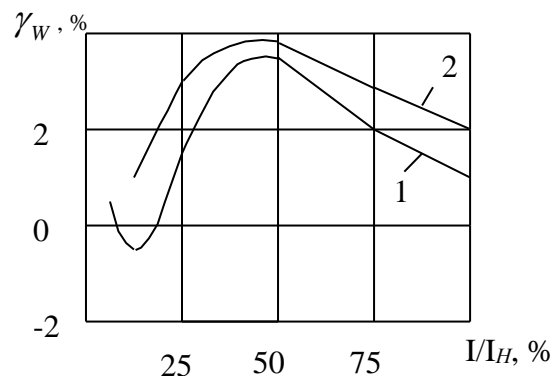
Всі обчислені величини записати у відповідні графи таблиці .

9. За результатами вимірювань і обчислень, записаних у таблиці, побудувати на загальному графіку залежність відносної похибки лічильника  $\gamma_w$  від величини сили струму навантаження, заданого в % від номінального, при  $\cos \varphi = 1$  і  $\cos \varphi = 0,5$

$$\gamma_{w1} = f_1\left(\frac{I}{I_H} \%\right) \text{ при } \cos \varphi = 1; \quad \gamma_{w2} = f_2\left(\frac{I}{I_H} \%\right) \text{ при } \cos \varphi = 0,5.$$

Зразковий графік зображений на рис. 3.3.

10. Таблицю з даними вимірювань і обчислень показати викладачеві. Отримавши його дозвіл, розібрати схему установки.



**Рис. 3.3. Графік залежності відносної похибки лічильника від його навантаження : 1 – при  $\cos \varphi = 1$ ; 2 – при  $\cos \varphi = 0,5$**

### 3.5. Контрольні запитання

1. Як вмикають у вимірюване коло лічильник електричної енергії і яких правил треба дотримуватися при його вмиканні?
2. У чому полягає перевірка лічильника і для чого вона необхідна?
3. При яких умовах визначають наявність самоходу в індукційного лічильника?
4. Які заходи вживають для усунення самоходу в індукційних лічильниках?
5. Яка різниця між номінальною і дійсною постійними лічильника і як їх визначають?
6. Яке призначення вимірювальних приладів, увімкнених у схему перевірки лічильника електричної енергії?
7. Як проводиться регулювання навантаження і напруги в схемі установки для перевірки лічильника?
8. Як обчислюють відносну похибку лічильника? Чи відповідає лічильник, що застосовувався в лабораторній роботі, технічним вимогам по величині його відносної похибки?
9. Чому змінюється величина  $\cos\varphi < p$  при переведенні перемикача П з положення 1 у положення 2?
10. З якими недоліками лічильники електричної енергії непридатні для вмикання у вимірюване коло?

## Лабораторна робота № 4

### ВИМІРЮВАННЯ АКТИВНОЇ І РЕАКТИВНОЇ ЕНЕРГІЇ В ТРИПРОВОДОВОМУ КОЛІ ТРИФАЗНОГО СТРУМУ

**Мета роботи.** Ознайомитися з будовою двоелементних лічильників активної і реактивної енергії змінного струму. Навчитися вмикати лічильники у вимірювальне коло і вимірювати ними енергію у трипроводному колі трифазного струму при активному і реактивному навантаженнях. Зробити необхідні елементарні обчислення, пов'язані з вимірюваннями.

#### *4.1. Технічні системи й обладнання*

1. Двоелементний лічильник активної енергії трифазного струму.
2. Двоелементний лічильник реактивної енергії трифазного струму.
3. Два однофазних ватметра.
4. Три амперметри і вольтметр для вимірювання в колах змінного струму.
5. Навантажувальний трифазний ламповий реостат.
6. Вимикач триполюсний, змонтований на панелі із запобіжниками і вивідними затискачами.
7. Два триполюсних вимикачі, змонтованих на панелях із вивідними затискачами, без запобіжників.
8. Годинник із секундною стрілкою.
9. З'єднувальні провідники з наконечниками.

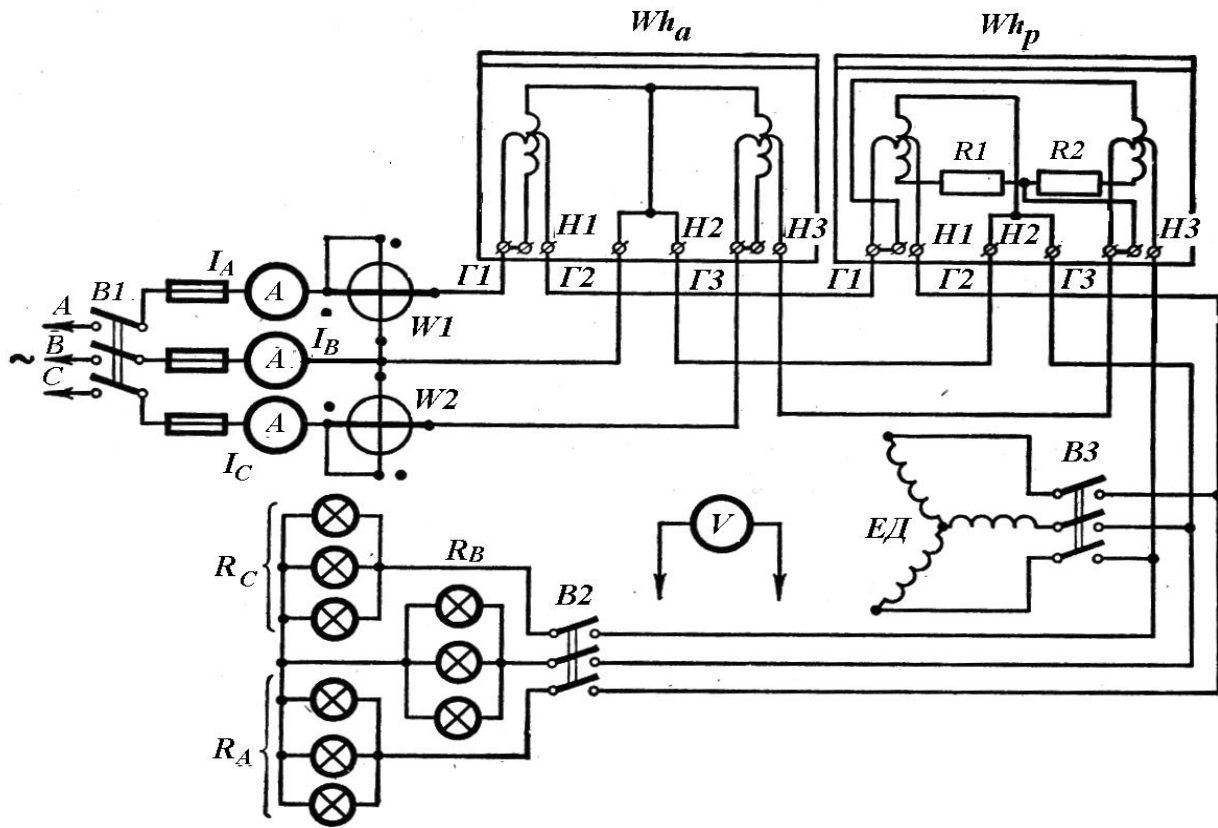
#### *4.2. Теоретичні відомості та схема установки*

У роботі застосовуються двоелементні лічильники індукційної системи, призначені для безпосереднього включення у вимірюване трипровідникове коло трифазного струму (рис. 3.1).

В якості лічильника активної енергії можна застосувати лічильник марки САЗ-И670 або попереднього випуску САЗ-И43 з номінальною силою струму  $I_n = 5$  А і номінальною напругою  $U_n = 220$  В. У клемній коробці приладу розташовані генераторні ( $G1, G2, G3$ ) і навантажувальні ( $H1, H2, H3$ ) затискачі.



Першому елементові належать затискачі  $\Gamma 1$  і  $H1$ , а другому —  $\Gamma 3$  і  $H3$ . Обмотку струму першого елемента лічильника включають послідовно у фазний провід  $A$ , а другого елемента послідовно у фазний провід  $C$ . Обмотка напруги першого елемента приєднана до фазних проводів  $A$  і  $B$ , а другого — до фазних проводів  $C$  і  $B$ .



**Рис. 4.1 – Схема ввімкнення лічильників активної і реактивної енергії з контрольними приладами у вимірювальне коло трифазного струму**

Як лічильник реактивної енергії застосовується лічильник марки СРЗ-И671 або попереднього випуску СРЗ-И44 з номінальною силою струму  $I_n = 5$  А і номінальною напругою  $U_n = 220$  В. У клемній коробці цього лічильника, як і в попереднього, розміщені генераторні і навантажувальні затискачі. Схема включення обмоток цього лічильника відрізняється від попереднього. Послідовно в кожній паралельній вітці включений додатковий резистор ( $R1$  і  $R2$ ), завдяки чому кут зсуву фаз між напругою на паралельному колі кожного елемента і відповідним робочим магнітним потоком складає  $60^\circ$ , на відміну від лічильників активної енергії, у яких цей кут близький до  $90^\circ$ . Завдяки такій схемі лічильник враховує реактивну енергію.

Перший і другий елементи цього лічильника включають у вимірюване коло так, як і попереднього приладу.

Послідовно у фазні проводи  $A$  і  $C$  ввімкнені обмотки струму контрольних ватметрів  $W1$  і  $W2$  класу точності 0,5 типу Д529/4 або Д539/4 на номінальну силу струму 5 А. Паралельні обмотки включені на межу вимірювання 300 В і приєднані між фазними проводами  $A - B$  і  $C - B$ .

У кожен фазний провід ввімкнений контрольний амперметр А електромагнітної системи типу 359/3 з межами вимірювань 0,5 – 10 А. Для виміру фазної і лінійної напруги призначений вольтметр  $V$  електромагнітної системи Э59, ввімкнений на межу вимірювання 0 – 300 В. До його затискачів приєднані проводи, що закінчуються щупами з ізольованими ручками.

Активним навантаженням у вимірювальному колі служить трифазний ламповий реостат ( $R_A, R_B, R_C$ ) потужністю 600 – 800 Вт на фазу. Як реактивне навантаження використовують трифазний асинхронний електродвигун ЕД потужністю до 1 кВт.

Для включення навантажень передбачені триполюсні вимикачі  $B2$  і  $B3$ , а для підключення до мережі трифазного струму — вимикач  $B1$ , з'єднаний через запобіжники з вимірюваним колом.

### **4.3. Хід роботи**

1. Ознайомитися з приладами, наданими для роботи, визначити їхній тип, систему та інші характеристики. З'ясувати номінали і ціну поділки шкал, класи точності амперметрів і вольтметра.

Визначити номінальну постійну лічильників активної і реактивної енергії за передаточним числом, зазначеним на щитках приладів, номінальну силу струму і напруги, клас точності. Визначити кількість затискачів, розміщених у коробці підключення, з'ясувати, які з них з'єднані з послідовними, а які - з паралельними обмотками лічильників.

Порівняти надані для роботи прилади з рекомендованими в описі схеми установки. Якщо дані не збігаються, проконсультуватися з викладачем.

2. На робочому столі (або на стенді) зібрати схему вимірювальної установки. Перед ввімкненням приладів визначити послідовність фаз у трифазному колі. При вмиканні приладів у схему звернути увагу на правильність приєднання проводів до генераторних і навантажувальних затискачів приладів. Зібрану схему ретельно перевірити і показати для перевірки викладачеві. Одержавши його дозвіл, виконати необхідні вимірювання за вказівками наступних пунктів.

3. Виміряти активну енергію, споживану електричними лампами. Для цього при виключених вимикачах  $B1, B2, B3$  ламповими реостатами  $R_A, R_B, R_C$  створити однакові навантаження (вкрутити лампи в патрони реостатів). Загальна потужність ламп повинна скласти 60 - 70 % усієї потужності лампових реостатів.

Вимикачем  $B1$  підключити живлення до вимірюваного кола. Вимикачем  $B2$  приєднати лампові реостати ( $R_A, R_B, R_C$ ). При цьому переконатися, що диск лічильника реактивної енергії не обертається. Покази амперметрів  $I_A, I_B, I_C$  повинні бути однакові.

Виміряти лінійну напругу  $U_L$  і лінійний струм  $I_L$  за показами одного з амперметрів, тобто  $I_L = I_\phi$  (три амперметри включені для того, щоб переконатися в рівності струмів у всіх фазах:  $I_A = I_B = I_C$ ). Виміряти так само ватметрами  $W1$  і  $W2$  потужність, а лічильником – активну енергію, споживану колом за 5 хв. Для цього підрахувати кількість обертів  $N_a$  лічильника активної енергії за час  $t = 5$  хв. Покази зазначених приладів записати в таблицю 4.1 і відключити живлення.

**Таблиця 4.1**

**Результати вимірювань активної і реактивної енергії**

№ п/п	Вимірювані величини							Вид навантаження
	$U_L$	$I_L$	$P_1$	$P_2$	$N_a$	$N_p$	$t$	
	В	А	Вт	Вт	Об	Об	С	

**Обчисленні величини**

№ п/п	$K_{на}$	$K_{нр}$	$P$	$Q$	$\cos\phi$	$\sin\phi$	$W_a$	$W_p$	$W'_a$	$W'_p$	Вид
	$\frac{Вт \cdot с}{об}$	$\frac{Вт \cdot с}{об}$	Вт	Вар	—	—	Вт* год	Вар* год	Вт* год	Вар* год	

4. У лампових реостатах ( $R_A, R_B, R_C$ ) вкрутити всі лампи (на повну потужність реостата). Включити живлення і виконати всі вимірювання,

зазначені в попередньому пункті. Результати записати в таблицю і відключити живлення.

5. Виміряти активну і реактивну енергії в трифазному колі. Від вимірюваного кола вимикачем  $B2$  від'єднати активне навантаження, від'єднати  $B3$  під'єднати реактивне навантаження — електродвигун, потім включити живлення кола. Коли оберти двигуна досягнуть номінального значення, переконатися, що диски обох лічильників обертаються в одному напрямку і покази амперметрів однакові.

Виконати усі вимірювання, зазначені в пункті 3. Крім того, порахувати оберти лічильників активної енергії  $N_a$  і реактивної енергії  $N_p$  за час  $t = 5$  хв. Покази приладів і відлічене число обертів записати в таблицю. Від'єднати живлення кола.

6. У навантажувальний ламповий реостат знову вкрутити таку кількість ламп, щоб потужність становила 60 - 70 % загальної потужності реостата. Від'єднати електродвигун і ввімкнути живлення. Ввімкнути до кола електродвигун. Коли його оберти досягнуть номінального значення, вимикачем  $B2$  ввімкнути ламповий реостат. Переконатися що диски обох лічильників обертаються в одному напрямку і покази амперметрів однакові. Потім виконати усі вимірювання, вказані в попередньому пункті. Покази приладів і відлічені оберти дисків лічильників записати в таблицю 4.1. Вимкнути живлення.
7. За результатами вимірювань, записаних у таблиці 4.1 відповідно кожному проведеному спостереженню, обчислити наступні величини:

7.1. Активну потужність трифазного кола  $P = P_1 + P_2$  Вт;

7.2. Реактивну потужність трифазного кола  $Q = \sqrt{3}(P_1 - P_2)$ , вар;

7.3. Номінальну постійну лічильника активної енергії  $K_{на} = W/N_1$

Значення  $W_{на}$  і  $N_1$  написані на щитку лічильника (наприклад, 1кВт·год = 650 обертів диска, де  $W_{на} = 1000 \cdot 60 \cdot 60$  Вт·с, а  $N_1 = 650$  обертів);

7.4. Номінальну постійну лічильника реактивної енергії  $K_{нр} = W_p/N_2$

Значення  $W_{нр}$  і  $N_2$  також написані на щитку лічильника (наприклад, 1кВт·год = 800 обертів диска, де  $W_{нр} = 1000 \cdot 60 \cdot 60$  Вт·с, а  $N_2 = 800$  обертів);

7.5. Коефіцієнт потужності  $\cos\varphi = P/(\sqrt{3} U_L \cdot I_L)$ ;

7.6. Кут  $\varphi$  по величині  $\cos\varphi$  (із таблиці 4.1);  $\frac{Вт \cdot с}{об}$

7.7.  $\sin\varphi$  по величині кута  $\varphi$ ;

7.8. Активну енергію, споживану колом,  $W_a = P \cdot t$ , Вт·год;

- 7.9. Реактивну енергію трифазного кола,  $W_p = Q \cdot t$ , вар;  
 7.10. Активну енергію, зареєстровану лічильником  $W'_a$ , Вт·год;  
 7.11. Реактивну енергію, зареєстровану лічильником  $W'_p$ , вар·год.

Результати обчислень записати у відповідні графи таблиці 1.

8. Визначити середньозважений коефіцієнт потужності  $\cos\varphi_{св}$ .

Як відомо,  $\cos\varphi$ , обчислений за формулою в підпункті 7.5, це миттєве значення коефіцієнта потужності трифазного кола при одночасному відліку по шкалах вимірювальних приладів величин, що входять у формулу.

Якщо на практиці в трифазному колі (особливо при нерівномірному навантаженні) коефіцієнт потужності змінюється, то визначають середньозважений коефіцієнт потужності  $\cos\varphi_{сз}$  за якийсь проміжок часу. Це величина, на яку треба помножити повну потужність кола, щоб визначити її активну потужність.

Середньозважений коефіцієнт потужності визначають за визначений проміжок часу (година, доба, місяць і т.п.) за показниками лічильників активної і реактивної енергії за цей період по одній з наступних формул:

$$\cos\varphi_{св} = \frac{W'_a}{\sqrt{W'_a + W'_p}}, \text{ або } \operatorname{tg}\varphi_{св} = \frac{W'_p}{W'_a},$$

де  $W_a$  і  $W_p$  — покази лічильників активної і реактивної енергії за визначений проміжок часу;

$W'_a$  і  $W'_p$  — активна та реактивну енергія, зареєстрована відповідними лічильниками.

За даними вимірювань пункту 6 і обчислень  $W_a$  і  $W_p$  (пункт 7) визначити середньозважений коефіцієнт потужності за наведеними вище формулами. Порівняти отримані величини і записати їх у примітці до таблиці 4.1.

9. Порівняти величини енергії, отримані за результатами обчислень пункту 7: активної  $W_a$  і  $W'_a$  і реактивної енергії  $W_p$  і  $W'_p$ . Пояснити причини нерівності їх, якщо таке виявиться.

#### 4.4. Контрольні запитання

1. У чому полягає особливість лічильників електричної енергії, використаних у лабораторній роботі?

2. Чим відрізняється лічильник активної енергії від лічильника реактивної енергії трифазного струму?
3. Як вмикають у коло трифазного струму лічильники активної і реактивної енергії?
4. Як обчислюють величину активної і реактивної електричної енергії, споживану трифазним колом, за показами ватметрів?
5. Як обчислюють величину активної і реактивної електричної енергії, споживану трифазним колом, за показами відповідних лічильників?
6. Чому не обертається диск лічильника реактивної електричної енергії при його ввімкненні в коло з чисто активним навантаженням?
7. Чому при вмиканні в трифазне коло реактивного навантаження (електродвигуна) обертаються диски лічильників активної і реактивної енергії?
8. Для чого у вимірюване трипровідне коло ввімкнені три амперметри?
9. Як обчислюють номінальні постійні лічильників активної і реактивної енергії?
10. Які причини приводять до різниці між результатами вимірювань енергії в колі трифазного струму за допомогою ватметрів і лічильників? Велика ця різниця?
11. Що називається середньозваженим коефіцієнтом потужності і як його визначають?

## Лабораторна робота № 5

### ВИМІРЮВАННЯ КОЕФІЦІЄНТА ПОТУЖНОСТІ ТА ЧАСТОТИ ЗМІННОГО СТРУМУ

**Мета роботи.** Практично ознайомитися з будовою і вмиканням у вимірюване коло частотоміра та фазометра. Виміряти частоту струму в колі та коефіцієнт потужності при різних видах навантажень.

#### *5.1. Технічні системи й обладнання*

1. Частотомір.
2. Фазометр.
3. Вольтметр і амперметр для вимірювань у колі змінного струму.
4. Ватметр.
5. Дві котушки індуктивності.
6. Патрон з електричною лампою, змонтований на панельці з вивідними затискачами.
7. Двополюсний вимикач, змонтований на панельці зі запобіжниками та вивідними затискачами.
8. Повзунковий тризатискний реостат або лабораторний автотрансформатор.
9. З'єднувальні провідники з наконечниками.

#### *5.2. Теоретичні відомості*

**Частотоміри.** У електродинамічних частотомірах застосовують логометричний вимірювальний механізм. Схема включення частотоміра представлена на рис. 5.1.

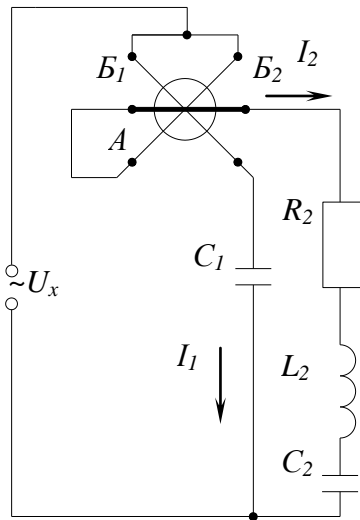
Параметри кола рухомої котушки  $B^1$  підбирають так, щоб фазовий зсув між струмом  $I_1$  і напругою  $U_x$  вимірюваної частоти був рівний  $90^\circ$ .

Підбором параметрів кола нерухомої котушки  $A$ , рухомої котушки  $B^2$  і елементів  $R_2$ ,  $L_2$  і  $C_2$  добиваються резонансу напруги в цьому колі при частоті

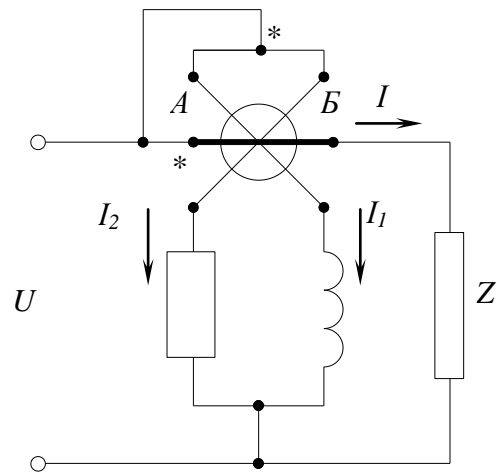
$f_{x0} = \frac{1}{(2\pi\sqrt{L_2C_2})}$ , рівного середньому значенню діапазону вимірювань

частотоміра. При цьому кут відхилення рухомої частини логометричного

вимірювального механізму виявляється функцією відношення реактивних опорів в колах рухомих котушок, тобто  $\alpha = F_1(X_2 / X_1)$ . Оскільки,  $X_1 = 1/(\omega_x C_1)$ ;  $X_2 = \omega_x L_2 - 1/(\omega_x C_2)$ , а  $\omega_x = 2\pi \cdot f_x$ , то  $\alpha = F(f_x)$ . Отже, шкала приладу може бути градуйована в одиницях частоти.



**Рис. 5.1. Схема включення електродинамічного частотоміра**



**Рис. 5.2. Схема включення електродинамічного фазометра**

Електродинамічні частотоміри випускають для вимірювань частоти у вузькому діапазоні змін (45—55, 450—550 Гц і т. д.) класів точності 1; 1,5.

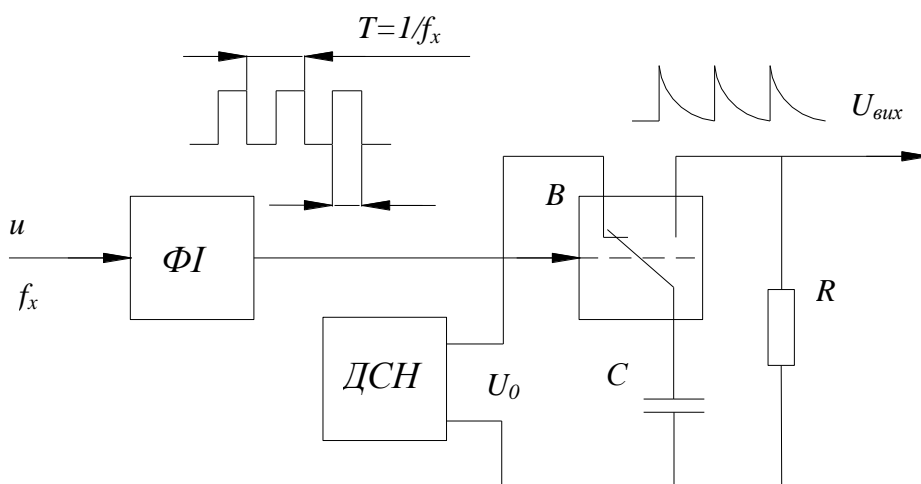
**Фазометри.** Схема включення електродинамічного фазометра з логометричним вимірювальним механізмом представлена на рис. 5.2.

Якщо  $I_1 = I_2$ , а фазовий зсув між струмами  $I_1$  і  $I_2$  рівний куту між рухомими котушками логометричного механізму, то кут відхилення рухомої частини приладу рівний фазовому зсуву між струмом і напругою в навантаженні Z. Отже, шкала фазометра може бути градуйована в значеннях кута  $\varphi$  чи  $\cos \varphi$ .

Електродинамічні фазометри випускають у вигляді переносних пристроїв з діапазоном вимірювань кута  $\varphi$ , рівним  $0—90^\circ$  чи  $0—360^\circ$ , і  $\cos \varphi$ , рівним  $0—1$  (для індуктивного чи ємнісного навантаження) класів точності 0,2; 0,5. Призначені вони, в основному, для роботи в колах промислової частоти.



**Частотоміри (електронні).** В електронних аналогових частотомірах застосовуються в основному два способи вимірювання частоти. Перший, використовуваний в області звукових частот, оснований на формуванні імпульсів, що мають постійну площу, обмежену кривою імпульсу струму й віссю часу на діаграмі. Частота цих імпульсів повинна дорівнювати частоті вимірюваного сигналу. Середнє значення напруги цих імпульсів пропорційне вимірюваній частоті. Відомі схеми вимірювальних перетворювачів частоти в напругу (ПЧН), що реалізують цей спосіб. Такі перетворювачі застосовують як у вимірювальних інформаційних системах, так і в електронних частотомірах, у яких на виході ПЧН встановлюють магнітоелектричний вимірювальний механізм. Спрощена схема перетворювача з використанням перезаряду конденсатора показана на рис.5.3, де ФІ – формувач імпульсів постійної тривалості  $\Delta t$  із частотою  $f_x$  вхідного сигналу  $u$ ; ДСН – джерело стабільної напруги  $U_0$ ; П – перемикач,  $C$  – конденсатор;  $R$  – навантаження, в ролі якого, зокрема, може бути використаний магнітоелектричний вимірювальний механізм. Вихідні імпульси формувача керують роботою перемикача П, по черзі підключаючи його до ДСН і до навантаження  $R$ . Якщо постійні часу ланок заряду й розряду конденсатора підібрані так, що він практично повністю встигає зарядитися від ДСН і розрядитися на  $R$ , то середнє значення вихідної напруги буде  $U_c = RU_0Cf_x$ , де  $U_0 = q$  – заряд конденсатора, що віддає в навантаження при кожному імпульсі.



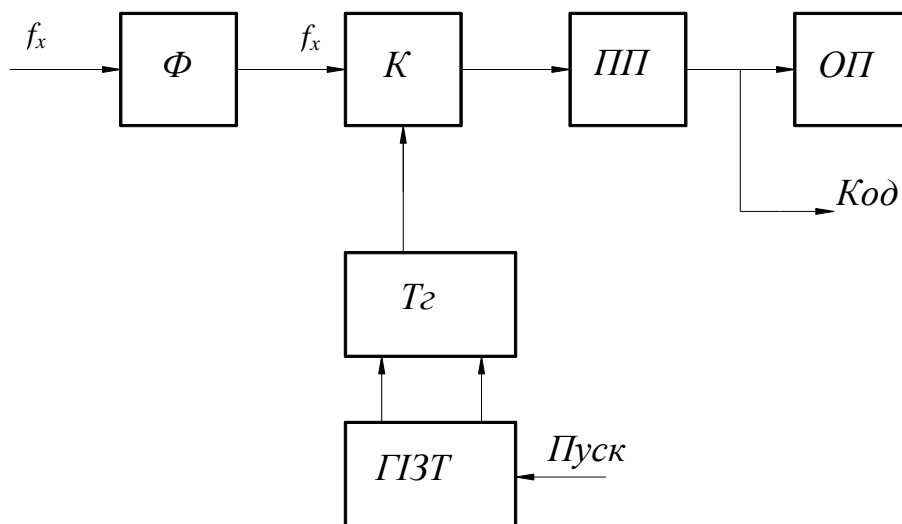
**Рис. 5.3.** Структурна схема перетворювача частоти в напругу

В основі другого, резонансного, способу вимірювання лежить порівняння частоти коливань досліджуваного джерела із власною частотою коливань резонансного контуру. Джерело напруги й невідомої частоти  $f_x$  може бути безпосередньо включене у коливальний контур або пов'язане з ним через елемент зв'язку М. Джерело напруги вимірюваної частоти є джерелом ЕРС у контурі. Змінюючи ємність конденсатора С, можна за показами індикатора резонансу ІР настроїти контур у резонанс, при якому  $f_{рез} = 1/(2\pi\sqrt{LC})$ . При відомій індуктивності  $L$  контуру шкала конденсатора С градується в одиницях частоти. Резонансні частотоміри використовують, як правило, для вимірювань в області високих частот.

**Частотоміри (цифрові).** Принцип дії приладу (рис.5.4) оснований на підрахунку імпульсів частотою  $f_x$  за інтервал часу  $t_{ин}$ . Генератор імпульсу заданої тривалості ГІЗТ через тригер Тг відкриває ключ К на час  $t_{ин}$ . За цей час імпульси частотою  $f_x$ , сформовані формувачем  $\Phi$ , пройдуть на вхід перерахункового пристрою ПП в кількості  $N = t_{ин} / T_x = t_{ин} f_x$ .

*Складові похибки приладу:*

- 1) похибка квантування, що залежить від  $T_x/t_{ин}$ ;
- 2) похибка від неточності формування  $t_{ин}$ .



**Рис. 5.4. Схема частотоміра**

**Вимірювальні перетворювачі фази в напругу (електронні)** можуть бути побудовані за принципом формування прямокутних імпульсів, тривалість яких пропорційна вимірюваній фазі. На рис.4 показана спрощена схема, і діаграма, що пояснює роботу такого перетворювача. Схема містить

два формувачі імпульсів  $\Phi I_1$  і  $\Phi I_2$ , що виробляють короткі імпульси в моменти переходу напруг  $u_1$  й  $u_2$  через нуль від негативних значень до позитивного. Сформовані імпульси керують електронним ключем П, що замикається при надходженні імпульсу від  $\Phi I_1$  і розмикається при надходженні імпульсу від  $\Phi I_2$ . У результаті цього на навантаженні виділяються імпульси тривалістю  $T$  й амплітудою  $U_0$ . Середнє значення напруги цих імпульсів  $U_c = U_0/T = \varphi_x U_0/360$ .

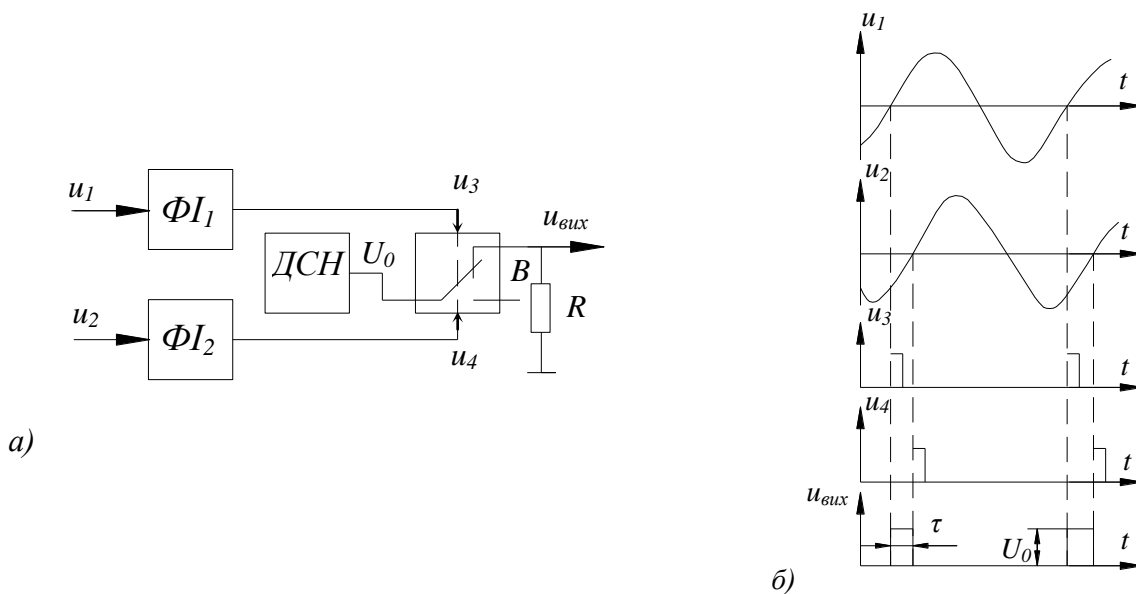
**Фазометри (цифрові).** Велике поширення одержали цифрові фазометри, що мають частотний діапазон вхідних напруг до 150 МГц. Зведена похибка цифрових фазометрів  $\pm(0,1 - 0,5) \%$ .

Кут фазового зсуву  $\varphi_x$  між напругами  $U_{x1}$  і  $U_{x2}$  легко перетворюється в часовий інтервал  $t_x$ . Тому схема фазометра відрізняється від схеми ЦВП для виміру інтервалу часу формувачами  $\Phi_1$  і  $\Phi_2$ , що формують старт- і стоп-імпульси в моменти переходу кривих напруг  $U_{x1}$  і  $U_{x2}$  через нуль, і блоком виділення часового інтервалу БВЧІ (рис.5.5, а), що із серії імпульсів виділяє тільки два імпульси. Часовий інтервал  $t_x$  між цими імпульсами (рис.5.5, б) вимірюється. Покази приладу

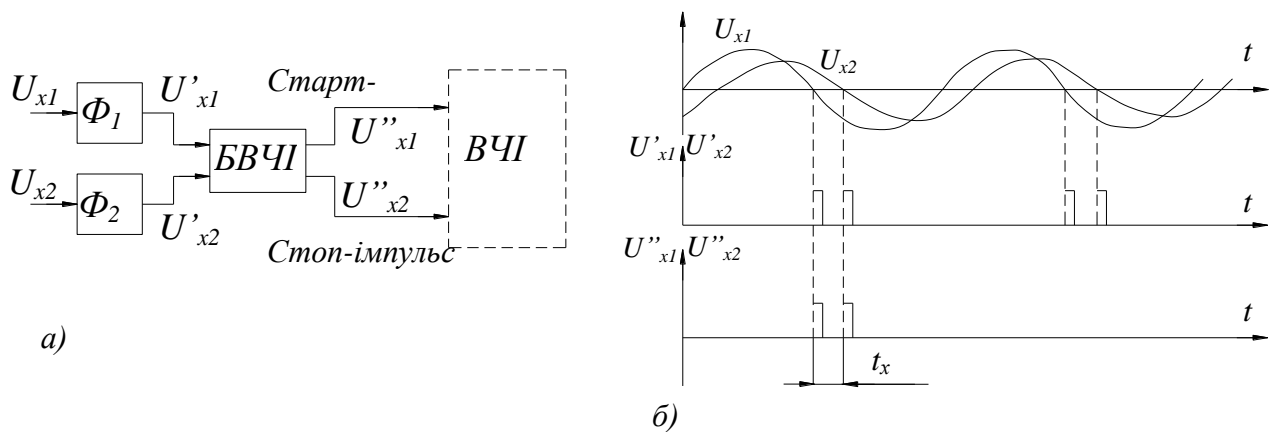
$$N = t_x / T_0 = t_x f_0 = \varphi_x T_x f_0 / (2\pi) = \varphi_x f_0 / (2\pi f_x),$$

де  $T_x = 1/f_x$  – період

зміни напруг  $U_{x1}$  й  $U_{x2}$ .



**Рис. 5.5. Структурна схема (а) та часова діаграма сигналів (б) перетворювача фази в напругу**



**Рис. 5.6. Схема (а) і діаграми напруг (б) блоку виділення часового інтервалу**

Складові похибки приладу: 1) похибка квантування, що залежить від співвідношення  $f_x$  й  $f_0$ ; 2) похибка реалізації, обумовлена нестабільністю  $f_0$ ; 3) похибка, що залежить від точності формування і передачі тимчасового інтервалу  $t_x$ .

Недоліком цього фазометра є те, що для визначення фази потрібне значення  $f_x$ .

Застосовують також фазометри з усередненням вимірюваних часових інтервалів, вільні від зазначеного недоліку.

### 5.3. Схема установки

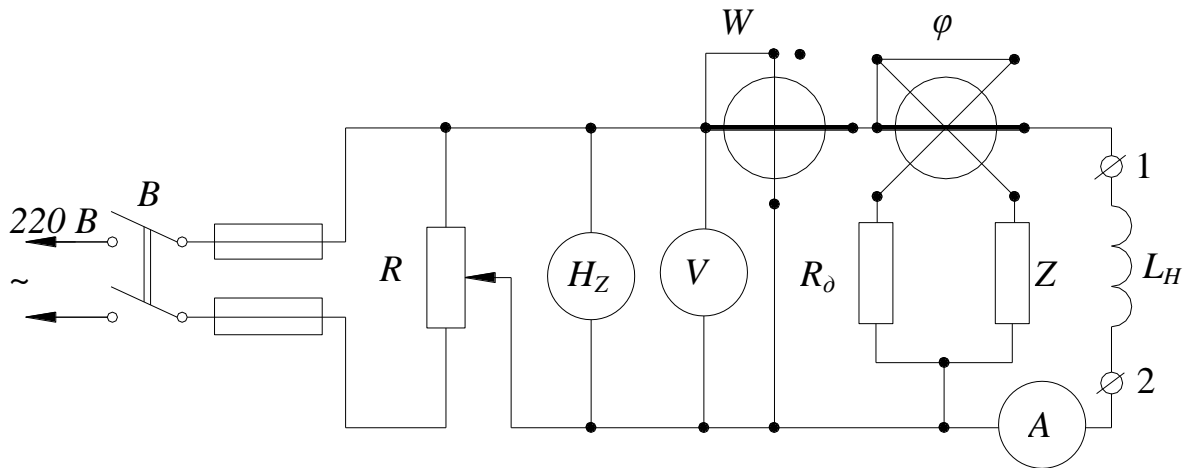
Послідовна ділянка вимірюваного кола складається з послідовно з'єднаних обмоток контрольного ватметра  $W$ , фазометра  $\Phi$ , котушки  $L_H$  (навантаження кола) і амперметра  $A$ .

Ватметр типу Д527/1 з межами вимірювань по струму 0-0,5-1 А і по напрузі 150 В або типу Д529 з межами виміру по струму 0-0,25-0,5 А і по напрузі 150 В. Фазометр лабораторний ЕЛФ, включений на напругу 100 В.

Контрольний амперметр електромагнітної системи типу Э59/6 з межами вимірювань 0-0,25-0,5-1 А.

Для навантаження кола використовують котушку індуктивності: одну з індуктивністю порядку 1,5 Гн і робочим струмом 0,3 А, другу - з індуктивністю порядку 0,6-0,8 Гн і робочим струмом 0,5-0,7 А. Крім того, при вимірюванні застосовується активне навантаження – електрична лампа 127 В × 50 Вт.

У вимірюване коло включені паралельно: технічний частотомір  $H_z$  типу Д126 (приєднаний затискачами на 127 В), контрольний вольтметр електромагнітної системи  $V$  типу Э59/1 на межу виміру до 150 В і паралельні обмотки контрольного ватметра  $W$  і фазометра  $\Phi$ . Вимірюване коло приєднують до регульовального повзункового реостата  $R$ , розрахованого на силу струму 1 А.



**Рис. 5.7. Принципова схема установки для вимірювання коефіцієнта потужності та частоти змінного струму**

Воно повинно бути порядку 800 Ом. Замість реостата можна застосувати лабораторний автотрансформатор ЛАТР-1. Для підключення кола до електромережі використовують двополіусний вимикач  $B$ . До його рухомих контактів через запобіжники приєднують вимірюване коло із включеними в нього вимірювальними приладами.

Перед виконанням лабораторної роботи, у залежності від величини навантаження, струмові обмотки приладів треба включати на визначені межі вимірювання, відповідно до рекомендацій, викладених в описі виконання роботи.

#### **5.4. Хід роботи**

1. Ознайомитися з приладами, наданими для роботи. З'ясувати їх основні технічні характеристики. Детально розглянути частотомір і фазометр. Визначити затискачі, які належать послідовним і паралельним обмоткам приладів, в'яснити межі вимірювань, ціну поділки шкал і клас точності.

2. На робочому столі зібрати схему установки для вимірювання частоти та коефіцієнта потужності. Звернути увагу на те, щоб стрілки амперметра, вольтметра і ватметра були встановлені на нульових позначках шкал. Якщо знадобиться, то коректором їх встановлюють у зазначене положення.

До схеми приєднати котушку індуктивності  $L_H$  на 1,5 Гн. Повзунок реостата поставити у вихідне (верхнє за схемою) положення. Підготовлену до вимірювань установку показати для перевірки викладачеві. Одержавши його дозвіл, виконати вимірювання за вказівками наступних пунктів.

3. Виміряти частоту і коефіцієнт потужності  $\cos \varphi$  при включеній котушці індуктивності  $L_H$  на 1,5 Гн. Контрольний амперметр встановити на межу виміру сили струму 0-0,5 А. Вимикачем В підключити до вимірюваного кола мережу змінного струму. Переміщаючи повзунок реостата  $R$  донизу (за схемою) і спостерігаючи за показами вольтметра, довести напругу. Покази всіх приладів записати в таблицю.

Таблиця 5.1.

Результати вимірювань коефіцієнта потужності та частоти

№ спостереження	Виміряні величини									Обраховані величини		Примітка
	$I$		$U$		$P$		$f$	$\cos \varphi$	$\varphi$	$\cos \varphi_1$	$\varphi_1$	
	под	А	под	В	под	Вт	Гц	-	град	-	град	

Повзунок реостата  $R$  встановити в початкове положення і виключити живлення.

- До затискачів 1-2 котушки індуктивності приєднати електричну лампу 127 В × 50 Вт. Контрольний амперметр включити на межу виміру 0-1 А і зробити вимірювання за вказівками попереднього пункту. Покази приладів записати в ту ж таблицю і вимкнути живлення.
- Замість котушки індуктивності  $L_H = 1,5$  Гн й електричної лампи включити котушку індуктивності  $L_H = 0,6-0,8$  Гн. Контрольний амперметр залишити включеним на межі вимірювання 0-1 А. Знову зробити вимір за вказівками пункту 3. Покази приладів записати в таблицю і відключити

живлення.

6. Виключити зі схеми частотомір  $Hz$ . До його затискачів, позначених зірочкою і 220 В, приєднати провідники, які закінчуються щупами з ізольованими ручками, і, доторкаючись ним до нерухомих контактів вимикача, виміряти частоту. Результат записати в таблицю. У графі „Примітки” вказати, що прилад був включений на 220 В.
7. За показниками контрольного ватметра  $W$ , амперметра  $I$  і вольтметра  $V$  обчислити для кожного виміру величини  $\cos\varphi = P/(IU)$  і кути  $\varphi$  та  $\cos\varphi$ . Результати обчислень записати в ту ж таблицю і показати викладачеві. Одержавши його дозвіл, розібрати схему.
8. За даними вимірювань коефіцієнта потужності побудувати векторні діаграми для кожного виміру.
9. Порівняти вимірювані величини частот при включеннях частотоміра у вимірюване коло і безпосередньо в мережу змінного струму. Порівняти також величини вимірюваного й обчисленого коефіцієнта потужності і кутів зсуву фаз при кожному вимірюванні. Якщо виявиться різниця між їхніми величинами, з'ясувати причину розбіжності результатів.

### 5.5. Контрольні питання

1. Як включають у вимірюване коло частотомір і як роблять відлік вимірюваного значення частоти?
2. Чи була різниця в показах частотоміра при включеннях його на різні напруги - 127 В і 220В? Якщо була, чим вона пояснюється?
3. Які верхні панелі фазометра ЕЛФ і яке їхнє призначення?
4. Як можна визначити генераторні затискачі фазометра ЕЛФ?
5. Як включають фазометр ЕЛФ у вимірюване коло?
6. У яких одиницях проградуєвана шкала фазометра ЕЛФ і які величини можна відраховувати по ній?
7. Як вимірювали коефіцієнт потужності і кут зсуву фаз при виконанні лабораторної роботи?
8. Які номінальні дані характеризують фазометр ЕЛФ?
9. Чим пояснюється різниця між величинами коефіцієнтів потужності, вимірюваних фазометром і обчислених за показами ватметра, вольтметра й амперметра?

## Рекомендована література

1. Шаповаленко О.Г. Основи електричних вимірювань. / О.Г. Шаповаленко, В.М. Бондар. – К.: Либідь, 2002. – 319 с.
2. Поліщук Є.С. Метрологія та вимірювальна техніка: підручник / Є.С.Поліщук, М.М.Дорожовець, В.О.Яцук, В.М.Ванько, Т.Г.Бойко; за ред. проф. Є.С.Поліщука. – Львів: Видавництво Львівська політехніка, 2012. – 544 с.
3. Головка Д.Б., Рего К.Г., Скрипник Ю.О. Основи метрології та вимірювань. – Київ: Либідь, 2001.– 408 с.
4. Методи і засоби вимірювань електричних та неелектричних величин: навчальний посібник / Д.М.Нестерчук, С.О.Квітка, С.В.Галько. – Мелітополь: Виданвничо-поліграфічний центр «Люкс», 2017. - 206 с.
5. Orobchuk V. Development and research of Wi-Fi network for receiving and transmitting telemechanical information in the training laboratory / Bogdan Orobchuk, Vadym Koval // Scientific Journal of TNTU. — Tern. : TNTU, 2020. — Vol 99. — No 3. — P. 124–132.

## Допоміжна

1. Таланчук П.М., Скрипник Ю.О., Дубровний В.О. Засоби вимірювання в автоматичних інформаційних системах. – К.: Райдуга, 1994.
2. Кухарчук В.В. Метрологія та вимірювальна техніка: навч. посібник. / В.В.Кухарчук, В.Ю.Кучерук, В.П.Долгополов, Л.В.Грумінська. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. – 252 с.
3. Готович В.А. Концепція створення автоматизованих систем визначення якості електроенергії / В.П. Коваль, С.В. Марценко, В.А. Готович // Матеріали І науково-технічної конференції "Інформаційні моделі, системи та технології", секція: інформаційні системи, 20 травня 2011 р.: Збірник тез доповідей "Інформаційні моделі, системи та технології". - Тернопіль : ТНТУ, 2011.