

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання лабораторних робіт з дисципліни:

«Основи метрології та електричних вимірювань»

для студентів напрямків підготовки/спеціальностей:

6.050701 «Електротехніка та електротехнології»,

6.050601 «Теплоенергетика»,

Київ - 2013

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання лабораторних робіт з дисципліни:

«Основи метрології та електричних вимірювань»

для студентів напрямків підготовки/спеціальностей:

6.050701 «Електротехніка та електротехнології»,

6.050601 «Теплоенергетика»,

Київ
НТУУ «КПІ»
2013

Основи метрології та електричних вимірювань [Текст]: метод. вк. до викон. лабораторних робіт для студ. напрямків підготовки/спеціальностей «Електротехніка та електротехнології» та «Теплоенергетика» / Уклад: О.В. Коцар, О.О.Закладний, Ю.О.Расько – К.: НТУУ «КПІ», 2013. – 104 с.

Рекомендовано Вченою радою
Інституту енергозбереження та енергоменеджменту НТУУ «КПІ»
(Протокол № 6 від «28» січня 2013 р.)

Навчальне видання

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання лабораторних робіт з дисципліни:
«Основи метрології та електричних вимірювань»
для студентів напрямків підготовки/спеціальностей:
6.050701 «Електротехніка та електротехнології»,
6.050601 «Теплоенергетика»,

Затверджено на засіданні
кафедри електропостачання
Протокол № 2 від «21» січня 2013 р.

Укладачі: Коцар Олег Вікторович, канд.техн.наук, доц.
Закладний Олег Олександрович, канд.техн.наук.
Расько Юрій Олексійович, ас.

Відповідальний редактор: Є.А.Штогрин, канд.техн.наук, доц.

Рецензент: М.В.Плахотний, канд.техн.наук, доц.

ЗМІСТ

Вступ.....	4
Загальні теоретичні відомості.....	5
Вимоги безпеки під час роботи в лабораторії.....	7
Порядок виконання лабораторних робіт.....	11
Лабораторна робота №1-2. Вимірювання електричного опору на постійному струмі.....	13
Лабораторна робота №3. Дослідження трансформаторів струму.....	30
Лабораторна робота №4-5. Вимірювання напруги, струму та активної електричної потужності в однофазній електричній мережі змінного струму.....	47
Лабораторна робота №6. Вимірювання активної електричної енергії за допомогою однофазного індукційного лічильника електроенергії.....	72
Лабораторна робота №7. Дослідження безперервних та дискретних електричних сигналів за допомогою осцилографу та частотоміру.....	84
Лабораторна робота №8. Види вимірювань. Оброблення експериментальних даних під час спільних вимірювань.....	94

Вступ

В методичних вказівках розглянуто питання організації роботи в лабораторії електричних вимірювань, наведено порядок виконання лабораторних робіт з дисципліни «Основи метрології та електричних вимірювань», наведено технічні описи лабораторних установок та викладено вимоги з техніки безпеки під час роботи в лабораторії.

В лабораторії здійснюється один з найважливіших моментів навчального процесу – зв'язок теорії з практикою. Під час виконання лабораторних робіт студент набуває досвіду роботи із засобами вимірювань, їх застосування, аналізу та узагальнення результатів дослідів. На заняттях у лабораторії студент набуває досвіду самостійної роботи з оцінювання одержаних результатів, а також засвоєння правил постановки вимірювального експерименту, виконання вимірювань та оброблення результатів вимірювань.

Для виконання лабораторних робіт студент повинен самостійно, до початку лабораторної роботи, вивчити основні теоретичні відомості, які необхідні для її проведення, та підготувати протокол.

Загальні теоретичні відомості

Вимірювання є одним з шляхів вивчення природи, який поєднує теорію з практичною діяльністю людини. Вони кількісно характеризують матеріальний світ, що нас оточує, розкриваючи діючі в природі закономірності, і, тим самим, створюють базу наукових знань. «Наука починається тоді, коли починають вимірювати» (Д.І. Менделєєв). Видатний російський вчений Б.С. Якобі вважав, що «Мистецтво вимірювання є могутньою зброєю, створеною людським розумом для проникнення в закони природи та підпорядкування її сил нашому пануванню». Відомий також вислів засновника англійської метрології Томсона: «Кожна річ відома лише в тій мірі, в якій її можна виміряти».

Вимірювання застосовуються майже у всіх областях людської діяльності: для обліку матеріальних ресурсів, забезпечення якості продукції, уніфікації деталей і вузлів механізмів, вдосконалення технології, автоматизації виробництва, стандартизації, охорони здоров'я, забезпечення безпеки праці тощо. Роль вимірювань безперервно зростає у всіх галузях науки й техніки. Кожному відкриттю, кожному кроку вперед в науці й техніці передують велика кількість різноманітних вимірювань. Як наслідок, зростають вимоги до їх якості, достовірності й надійності. Разом з тим зростає і роль метрології в сучасному житті.

Успішна робота в лабораторії разом із оволодінням навичками вимірювань передбачає також знайомство з методами математичного оброблення результатів вимірювань. Досвід показує, що жодне вимірювання, як би ретельно воно не проводилося, не може бути вільне від помилок. Оскільки в основі будь-якої науки та її застосувань лежать вимірювання, дуже важливо вміти визначати помилки і зводити їх до необхідного мінімуму.

«Помилка» в науковому вимірюванні означає неминучу похибку, яка супроводжує будь-які вимірювання. Помилки, як такі, не можна віднести лише до промахів експериментатора. Найкраще, на що ви можете розраховувати, - це звести помилки до можливого мінімуму і надійно обчислити їх величини. Тому в метрології слово «помилка» використовується винятково в значенні «похибка», вважаючи ці два слова рівнозначними.

Теорія помилок – це наука, що займається вивченням і оцінкою похибок. Ці дві її функції дозволяють дослідникові визначити, наскільки великі похибки в його вимірюваннях, і допомагають зменшити їх, коли це необхідно. Аналіз похибок, або «помилок», є істотною частиною будь-якого наукового експерименту, тому теорія помилок займає важливе місце в курсі «Основи метрології та електричних вимірювань».

Вимоги безпеки під час роботи в лабораторії

1 Види і рівні електричних напруг в лабораторії електричних вимірювань.

1.1 Лабораторія електричних вимірювань живиться напругою 380 В змінного струму від розподільного щита 0,4 кВ, розташованого в стінній шафі лабораторії з надписом «Головний розподільний щит 0,4 кВ». Розподільний щит 0,4 кВ облаштований головним трифазним вимикачем (рубильником) та трифазними автоматичними вимикачами. Знеструмлення лабораторії може здійснюватись шляхом вимикання головного рубильника (розташований на правій зовнішній стінці головного розподільного щита 0,4 кВ) або автоматичного вимикача з надписом «Лабораторія» (розташований всередині головного розподільного щита 0,4 кВ). Під час керування автоматичним вимикачем з надписом «Лабораторія» слід остерігатися доторкання до кіл напруги 380 В.

1.2 Від розподільного щита 0,4 кВ через автоматичні вимикачі і розподільні коробки напруга рівнів 380 В, 220 В подається на стенди, де встановлені засоби вимірювань, та іншу апаратуру. Кожен стенд живиться напругою 220 В. Блок розеток, розташований збоку стенду, облаштований автоматичним вимикачем. Знеструмлення стенду здійснюється шляхом вимикання автоматичного вимикача.

2 Види робіт, що виконуються в лабораторії електричних вимірювань.

2.1 Роботи, що виконуються в лабораторії електричних вимірювань, поділяються на монтажні-підготовчі, навчальні, пошукові і ремонтно-відбудовні.

2.2 Монтажні-підготовчі роботи виконуються співробітниками кафедри і студентами старших курсів і включають електромонтажні і

налагоджувальні роботи з виготовлення навчальних стендів, макетів, щитків та їхнього налагодження.

2.3 Навчальні роботи виконуються студентськими бригадами або лаборантами і включають: з'єднання елементів установки між собою і з вимірювальними приладами за допомогою дротів, що мають наконечники або штекери; подачу необхідних за видом і рівнем робочих напруг на установку; виконання вимірювань, передбачених інструкцією до лабораторної роботи.

2.4 Пошукові роботи виконуються працівниками науково-дослідної частини кафедри та викладачами і включають конструкторсько-дослідницькі роботи із створення макетів нових вимірювальних схем.

2.5 Ремонтно-відбудовні роботи виконуються інженерами та лаборантами і включають усунення будь-яких неполадок в устаткуванні лабораторії.

3 Правила безпечного виконання налагоджувальних і навчальних робіт в лабораторії електричних вимірювань.

3.1 Налагоджувальні і навчальні роботи на лабораторному устаткуванні дозволяється виконувати бригадою, що складається не менше ніж з двох осіб.

3.2 Вмикання головного розподільного щита лабораторії 0,4 кВ і автоматичних вимикачів, розташованих в цьому щиті, дозволяється тільки керівнику робіт у лабораторії.

3.3 У лабораторіях робоча напруга небезпечна для життя, тому забороняється доторкатися до оголених струмоведучих частин лабораторних установок, розподільних щитів, струмопроводів.

3.4 Складання і перевірку монтажу схем робити тільки на знеструмленій установці. Перше пробне вмикання установки під напругою дозволяється тільки керівнику робіт.

3.5 Складання схеми варто виконувати так, щоб не допустити перетинання і заплутування дротів.

3.6 Категорично забороняється виконувати зовнішній монтаж схеми установки дротами без наконечників або штекерів.

3.7 Після складання схеми установки варто видалити все зайве: дроти, книги, прилади, для того, щоб робоче місце було зручне для обслуговування.

3.8 Подачу напруги на установку керівних робіт супроводжує чітким попередженням «ВМИКАЮ».

3.9 За наявності напруги на схемі установки забороняється робити будь-який перемонтаж схеми без зняття напруги.

3.10 Перевірку наявності напруги на схемі варто виконувати тільки за допомогою вольтметра або індикатора напруги. Доторкатися рукою до струмоведучих частин із метою перевірки наявності напруги суворо забороняється.

3.11 Під час роботи на установці необхідно стежити за тим, щоб не було замикань між її корпусом і струмоведучими частинами реостатів.

3.12 Налагодження при ввімкненій схемі необхідно здійснювати однією рукою, не торкаючись при цьому металевих предметів іншою рукою.

3.13 Реостати і вимірювальні прилади варто розташовувати так, щоб було зручно вести спостереження за шкалами приладів.

3.14 При виникненні будь-яких несправностей слід негайно відключити живлення установки і повідомити керівника робіт.

3.15 При зникненні електроенергії необхідно всі установки лабораторії вимкнути. Під час повторного подання напруги дозволяється продовжувати навчальні або налагоджувальні роботи на установках після чіткого попередження керівника робіт «НАПРУГУ ПОДАНО».

3.16 Після закінчення навчальних або налагоджувальних робіт напруга установок знімається, а зовнішній монтаж схеми демонтується.

4 Правила надання першої допомоги постраждалому від поразки електричним струмом.

4.1 У випадку, якщо людина в лабораторії потрапила під дію електричної напруги (струму), необхідно негайно знеструмити лабораторію шляхом вимикання головного розподільного щита лабораторії 0,4 кВ (потягнути рубильник на себе) та відключити всі лабораторні установки.

4.2 Для надання першої медичної допомоги постраждалому лабораторія забезпечена аптечкою з медикаментами. Її місце знаходження позначено ясно помітним знаком (червоний хрест) на стіні лабораторії.

4.3 Разом із наданням постраждалому першої медичної допомоги викликати швидку медичну допомогу.

Порядок виконання лабораторних робіт

Кожна з лабораторних робіт, що наведені в цих методичних вказівках, виконується протягом одного-двох лабораторних занять (2-4 години). До першого заняття кожної лабораторної роботи студент допускається за умови підготовки частини звіту, яка містить стислий технічний опис лабораторної установки та детальний опис вимірювального експерименту.

Для допуску до виконання лабораторної роботи студент повинен доповісти викладачу мету лабораторної роботи, надати опис лабораторної установки та порядок проведення вимірювального експерименту, а також вказати **заходи з електробезпеки**. За умови надання викладачу вищезазначених відомостей студент допускається до виконання лабораторної роботи.

Якщо лабораторна робота розрахована на 2 години, студент, протягом заняття, користуючись методичними вказівками та, за необхідністю, додатковими матеріалами (підручниками, конспектом лекцій, інструкціями з експлуатації вимірювальних приладів тощо), повинен надати викладачу всі відповіді для допуску до виконання лабораторної роботи, провести вимірювальний експеримент, надати отримані результати викладачу для перевірки, після перевірки викладачем обробити їх і занести до протоколу, надати усні відповіді на контрольні запитання і захистити одержані результати.

Якщо лабораторна робота розрахована на 4 години, протягом першого заняття цієї лабораторної роботи студент, користуючись методичними вказівками та, за необхідністю, додатковими матеріалами (підручниками, конспектом лекцій, інструкціями з експлуатації вимірювальних приладів тощо), повинен надати викладачу всі відповіді для допуску до виконання лабораторної роботи, провести вимірювальний

експеримент, занести результати спостережень до протоколу досліджень, надати отримані результати викладачу для перевірки та, після перевірки викладачем, обробити їх і занести до протоколу досліджень. Протягом другого заняття тієї само лабораторної роботи студент повинен надати усні відповіді на контрольні запитання і захистити одержані результати.

За умови вірного оформлення протоколу лабораторної роботи, надання відповідей на контрольні запитання, правильності одержаних результатів і відповідей на запитання викладача за темою лабораторної роботи вона вважається захищеною.

Лабораторна робота №1-2

Вимірювання електричного опору на постійному струмі

Мета роботи: набуття практичних навичок постановки вимірювального експерименту, проведення спостережень, визначення ціни поділки шкали вимірювального приладу, запису та оброблення результатів багатократних спостережень незмінної фізичної величини; вивчення методів вимірювання електричного опору на постійному струмі; дослідження джерел методичних похибок під час вимірювання електричного опору на постійному струмі.

1 ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

1.1 Похибки вимірювань

Вимірювання фізичних величин не можна виконати абсолютно точно через недосконалість методів і засобів вимірювань, а також через вплив зовнішнього середовища та індивідуальних особливостей спостерігача. Внаслідок дії багатьох детермінованих і випадкових факторів, які проявляються як у процесі виготовлення та експлуатації засобів вимірювань, так і під час виконання вимірювань, покази вимірювальних приладів неминуче відрізняються від істинного значення вимірюваної величини. Ці відхилення характеризуються похибками вимірювань.

Абсолютною похибкою вимірювань Δx називається різниця між показом засобу вимірювань x' та істинним значенням вимірюваної величини A :

$$\Delta x = |x' - A|. \quad (1.1)$$

де: x' — покази засобу вимірювань; A — істинне значення вимірюваної величини. Оскільки істинне значення вимірюваної величини A невідоме, то невідомі й похибки вимірювання. Тому для отримання хоча б наближених відомостей про них слід у формулу (1.1) замість істинного значення фізичної величини A підставляти її дійсне значення x_0 :

$$\Delta x = |x' - x_0|. \quad (1.2)$$

Під дійсним значенням фізичної величини x_0 розуміють таке її значення, яке настільки наближене до істинного, що для вибраної практичної мети можна використовувати його замість істинного значення.

В загальному випадку результат будь-якого вимірювання величини x представляють у вигляді:

$$(\text{вимірювана величина } x) = x_{\text{найкр}} \pm \Delta x \quad (1.3)$$

Це твердження означає, що, по-перше, найкращою оцінкою експериментатора для вимірюваної величини x є число $x_{\text{найкр}}$, і, по-друге, що він визначеною мірою впевнений, що вимірювана величина x знаходиться в інтервалі між значеннями $x_{\text{найкр}} - \Delta x$ і $x_{\text{найкр}} + \Delta x$. Похибку Δx прийнято вважати позитивною величиною, тому $x_{\text{найкр}} + \Delta x$ є завжди найбільш вірогідним значенням вимірюваної величини x , а $x_{\text{найкр}} - \Delta x$ — найменшим.

«Якість» вимірювань характеризується не тільки похибкою Δx , а також її відношенням до $x_{\text{найкр}}$, яке отримало назву **відносної похибки вимірювань δx** :

$$(\text{відносна похибка } \delta x) = \frac{\Delta x}{|x_{\text{найкр}}|}, \quad (1.4)$$

де: $|x_{\text{найкр}}|$ - абсолютна величина $x_{\text{найкр}}$.

Оскільки для більшості вимірювань Δx набагато менше за вимірювану величину $x_{найкр}$ і відношення $\frac{\Delta x}{|x_{найкр}|}$ зазвичай дуже мале число, прийнято наводити відносну похибку у відсотках:

$$(\text{відносна похибка } \delta x) = \frac{\Delta x}{|x_{найкр}|} 100\% \quad (1.5)$$

Відносна похибка певною мірою характеризує «якість» вимірювань незалежно від значення вимірюваної величини. Прийнято вважати що:

- відносна похибка в 10% або біля того – це зазвичай характеристика доволі грубих вимірювань;
- відносна похибка в 1-2% характеризує достатньо точні вимірювання;
- відносна похибка менше 1% – це дуже добрий результат, який зазвичай важко отримати в навчальній лабораторії.

Варто зазначити, що абсолютна та відносна похибки – це одна й та само похибка вимірювань відображена в різний спосіб.

Похибки вимірювань зумовлені впливом багатьох факторів, які можна поєднати в дві великі групи. До першої відносяться фактори незмінні, або такі, що змінюються в процесі вимірювального експерименту за відомим законом, наприклад, повільні зміни впливаючих величин або похибки зразкових мір, що застосовуються під час вимірювань. Складові результуючої похибки вимірювань, що зумовлені впливом факторів цієї групи, називаються **систематичними похибками вимірювань**. Їхня особливість полягає в тому, що вони лишаються незмінними або закономірно змінюються під час повторних спостережень однієї й тієї само незмінної фізичної величини. Доки систематичні похибки переважають, їх в більшості випадків можна обчислити або виключити з результатів вимірювань за рахунок належної постановки експерименту та додаткового оброблення результатів вимірювань шляхом введення

поправок. *Поправкою* називається значення величини, яке алгебраїчно додається до результату вимірювання з метою вилучення систематичної похибки.

До другої групи відносяться фактори, що проявляються нерегулярно і так само несподівано зникають, або проявляються з інтенсивністю, яку важко передбачити. До таких факторів відносяться, наприклад, перекошення елементів засобів вимірювань в їхніх направляючих, нерегулярні зміни моментів тертя в опорах, малі флуктуації впливаючих величин, неуважність спостерігачів тощо. Частка, або складова результуючої похибки вимірювань, що визначена впливом факторів цієї групи, називається *випадковою похибкою вимірювань*. Її головна особливість полягає в тому, що вона випадково змінюється під час повторних спостережень однієї й тієї самої незмінної фізичної величини. Тому випадкові похибки не можуть бути виключені з результатів вимірювань шляхом застосування поправок подібно до систематичних похибок. Однак, за виконання кінцевої кількості повторних спостережень однієї і тієї ж самої незмінної фізичної величини, застосовуючи методи теорії вимірності та математичної статистики, ми можемо певною мірою уточнити результат вимірювання, зменшивши в такий спосіб випадкову складову результуючої похибки вимірювань.

Під час розроблення засобів вимірювань і належної постановки вимірювального експерименту в цілому інтенсивність прояву більшості факторів другої групи може бути зведена до загального рівня, так що всі вони впливають на формування випадкової похибки більш менш однаково. Проте деякі з них, наприклад, раптове падіння напруги в мережі електроживлення, можуть проявитися несподівано відчутно, внаслідок чого результуюча похибка може прийняти розміри, які явно виходять за межі, зумовлені ходом вимірювального експерименту в цілому. Такі похибки у складі випадкової називаються *грубими*. До них тісно

примикають *промахи* - похибки, що залежать від спостерігача і пов'язані з невірним поводженням із засобами вимірювань, невірним відліком показів або помилками під час документування результатів.

Таким чином, ми можемо класифікувати два типи похибок вимірювань:

- *систематичні похибки*, що лишаються незмінними або закономірно змінюються під час повторних спостережень одієї і тієї самої незмінної фізичної величини;

- *випадкові*, в тому числі *грубі похибки й промахи*, що змінюються випадковим чином під час повторних спостережень одієї і тієї самої незмінної фізичної величини.

Під час вимірювань обидва види похибок проявляються одночасно, і результуючу похибку вимірювань можна представити у вигляді суми:

$$\Delta = \Delta^c + \Delta^o \quad (1.6)$$

де: Δ^o - випадкова похибка вимірювань, Δ^c - систематична похибка вимірювань.

Можна стверджувати, що наявність систематичних похибок вимірювань характеризує *вірність* виконання вимірювань: результати вимірювань настільки вірні, наскільки вони не спотворені систематичними похибками, і тим вірніше, чим менше ці похибки. Наявність випадкових похибок характеризує *точність* вимірювань: результати вимірювань настільки точні, наскільки вони не спотворені випадковими похибками, і тим точніше, чим більше ми маємо підстав вважати ці похибки малими.

Слід зауважити, що вираз (1.3) в загальному випадку справедливий, якщо систематичні похибки виключені з результатів вимірювань, а величина Δx визначається виключно випадковими похибками.

Систематичні похибки не залежать від числа спостережень. Виділяють наступні види систематичних похибок:

- інструментальні похибки;
- похибки, що виникають в результаті невірною встановлення засобу вимірювань;
- похибки, зумовлені зовнішніми впливами;
- похибки методу вимірювань (теоретичні похибки);
- суб'єктивні похибки.

1.2 Похибки методу вимірювань (теоретичні похибки)

В багатьох методах вимірювань можна знайти теоретичні похибки, які є наслідком тих чи інших припущень або спрощень, застосування емпіричних формул та функціональних залежностей. Прикладом може слугувати вимірювання електричного опору на постійному струмі за допомогою вольтметра і амперметра (рис. 1.1, 1.2) з подальшим обчисленням величини електричного опору за законом Ома:

$$R_x = U / I \quad (1.7)$$

На рис. 1.1 сила струму I_A , виміряна амперметром А, більша за силу струму I_x , який протікає через резистор R_x на величину I_v , зумовлену кінцевим опором вольтметра V. Внаслідок цього величина електричного опору R_x , обчислена за (1.7) за результатами вимірювань (рис. 1.1), буде меншою за дійсну. На рис. 1.2 величина напруги U_V , що виміряна вольтметром V, буде більшою за падіння напруги U_x на резисторі R_x на значення U_A , зумовлене опором амперметра А. Внаслідок цього величина електричного опору R_x , обчислена за (1.7) за результатами вимірювань (рис. 1.2) буде більшою за дійсну на величину опору амперметра R_A . Поправки в обох випадках обчислюються за значенням електричних опорів вольтметра V (рис. 1.1) і амперметра А (рис. 1.2).

Таким чином можна стверджувати, що *методична похибка вимірювання* є складовою загальної похибки, зумовленої недосконалістю моделі об'єкта вимірювання. У багатьох методах вимірювання можна знайти методичні похибки, які виникають через недосконалість методу, неточність формул, що прийняті для опису явища, покладеного в основу вимірювання тощо. До них відносяться також похибки, зумовлені впливом засобів вимірювання на об'єкт, властивість якого змінюється. Наприклад, через падіння напруги на внутрішньому опорі джерела живлення вимірювальної схеми на виводах вольтметра напруга буде менша за виміряну. Похибка вимірювання, що виникає внаслідок цього явища, є методичною. За вірно поставленого вимірювального експерименту методична похибка буде мінімальною. Методична похибка відноситься до систематичних похибок вимірювань.

1.3 Методи вимірювання електричного опору на постійному струмі

Метод вимірювання електричного опору на постійному струмі за допомогою вольтметра і амперметра полягає у наступному: за допомогою амперметра вимірюють струм, що протікає електричним опором, а за допомогою вольтметра вимірюють падіння напруги на цьому опорі. Тоді за законом Ома для ділянки кола визначаємо значення електричного опору, який досліджується:

$$R_X = U_V / I_A, \quad (1.8)$$

де U_V – падіння напруги, що виміряна вольтметром V; I_A – сила електричного струму, виміряна амперметром А.

Метод заміщення є різновидом методу порівняння з мірою, за якого вимірювану величину заміщують відомою величиною. Величина відтворюється мірою таким чином, щоб покази покажчика вимірювальних приладів залишалися б незмінними. Прикладом застосування методу заміщення є вимірювання електричного опору за допомогою магазину

опорів і мосту постійного струму. Спочатку вимірюваний опір вмикають в плече мосту і урівноважують його. Потім вимірюваний опір заміщують магазином опорів і врівноважують міст, регулюючи опір магазину. Опір магазину, за якого міст врівноважений, дорівнює вимірюваному опору.

1.4 Оброблення результатів багатократних спостережень

Повторивши кілька разів вимірювання, одержимо ряд числових значень вимірюваної величини, які в загальному випадку відрізняються один від одного. Для наближення до істинного значення вимірюваної величини обчислюють середнє арифметичне значення результатів окремих спостережень:

$$\bar{x} = \frac{(x_1 + \dots + x_n)}{n} = \frac{\sum x_i}{n} \quad (1.9)$$

Якщо замість істинного значення вимірюваної величини взяти середнє арифметичне, то відхилення і-го результату спостережень від середнього арифметичного

$$v_i = x_i - \bar{x} \quad (1.10)$$

Середнє квадратичне відхилення результату окремого спостереження

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum v_i^2}{n-1}} \quad (1.11)$$

Середнє квадратичне відхилення середнього арифметичного результатів спостережень

$$s_o = \frac{s}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum v_i^2}{n \times (n-1)}} \quad (1.12)$$

Середнє квадратичне відхилення зручне тим, що вимірюється в одиницях вимірюваної величини. Дисперсія результатів окремих спостережень

$$D(x) = \sum (x_i - a)^2 \times P_i = \sum \Delta_{oi}^2 \times P_i = s^2 \quad (1.13)$$

Як видно з (1.13), дисперсія вимірюється в квадратах одиниць вимірюваної величини.

Отримані результати використовуються під час запису результату вимірювання наступним чином. Результат вимірювання, отриманий шляхом статистичного оброблення результатів багатократних спостережень незмінної фізичної величини, визначається за (1.3):

$$(\text{вимірювана величина } x) = \bar{x} \pm s_0; (P=0,6826), \quad (1.14)$$

де: $x_{\text{найкр}} = \bar{x}$, $\Delta x = s_0$ означає, що результат вимірювання x з вірогідністю $P=0,6826$ (68,26%) знаходиться в інтервалі: $[\bar{x} - s_0; \bar{x} + s_0]$, який називається довірчим інтервалом. З практичної точки зору це означає, що в середньому один з трьох результатів вимірювань фізичної величини може проявитися за межами цього інтервалу. З метою підвищення надійності вимірювання (довірчої вірогідності) розширюють довірчий інтервал. Теорія похибок доводить, що для отримання довірчої вірогідності $P=0,9545$ (95,45%) необхідно визначити довірчий інтервал як $[\bar{x} - 2s_0; \bar{x} + 2s_0]$, тобто $\Delta x = 2s_0$. Для отримання довірчої вірогідності $P=0,9907$ (99,07%) необхідно визначити довірчий інтервал як $[\bar{x} - 2,6s_0; \bar{x} + 2,6s_0]$, тобто $\Delta x = 2,6s_0$. З практичної точки зору це означає, що за $P=0,9545$ в середньому один з двадцяти двох результатів вимірювань фізичної величини може проявитися за межами довірчого інтервалу, що є цілком прийнятним для робочих вимірювань. За $P=0,9907$ в середньому один зі ста семи результатів вимірювань фізичної величини може проявитися за межами цього інтервалу, що є ознакою високоточних зразкових вимірювань.

Якщо необхідно визначити похибку (довірчий інтервал) для окремого спостереження вимірюваної величини x_i , користуються середнім квадратичним відхиленням результату окремого спостереження s :

$$(\text{вимірювана величина } x) = x_i \pm s; (P=0,6826), \quad (1.15)$$

де: $x_{\text{найкр}}=x_i$; $\Delta x=s$. Відповідно, для $P=0,9545$ $\Delta x=2s$, а для $P=0,9907$ $\Delta x=2,6s$.

Дисперсія характеризує ступінь розсіювання результатів спостережень.

2 ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ

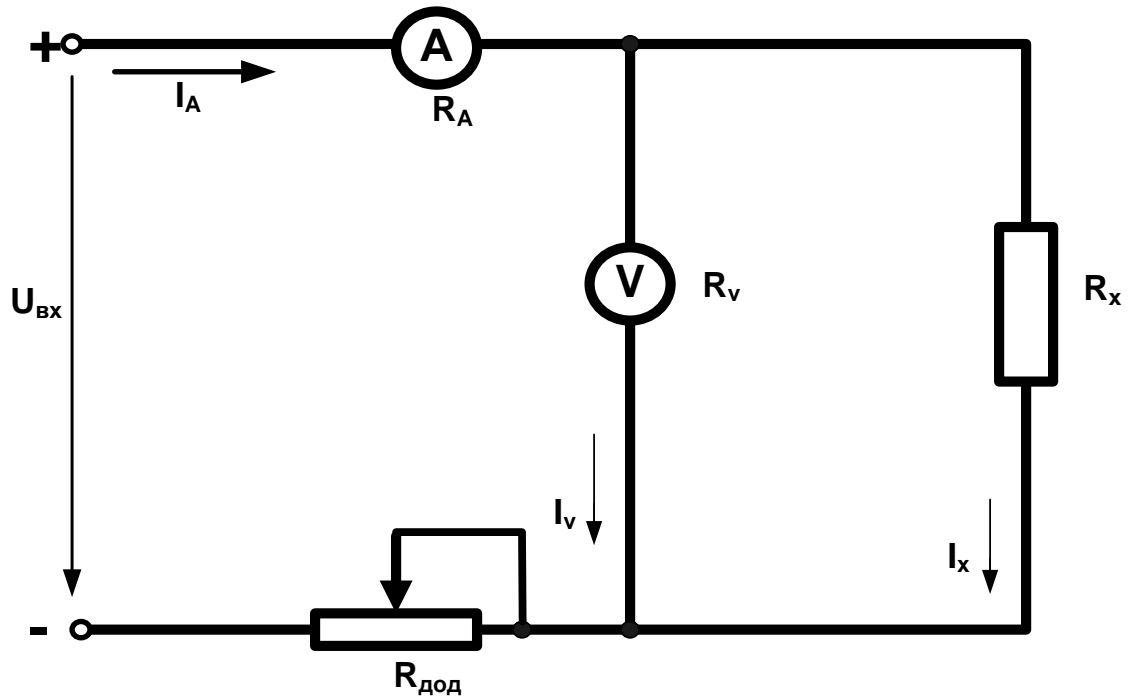


Рис.1.1. Вимірювання малого опору на постійному струмі ($R_x \ll R_v$). Схема лабораторної установки.

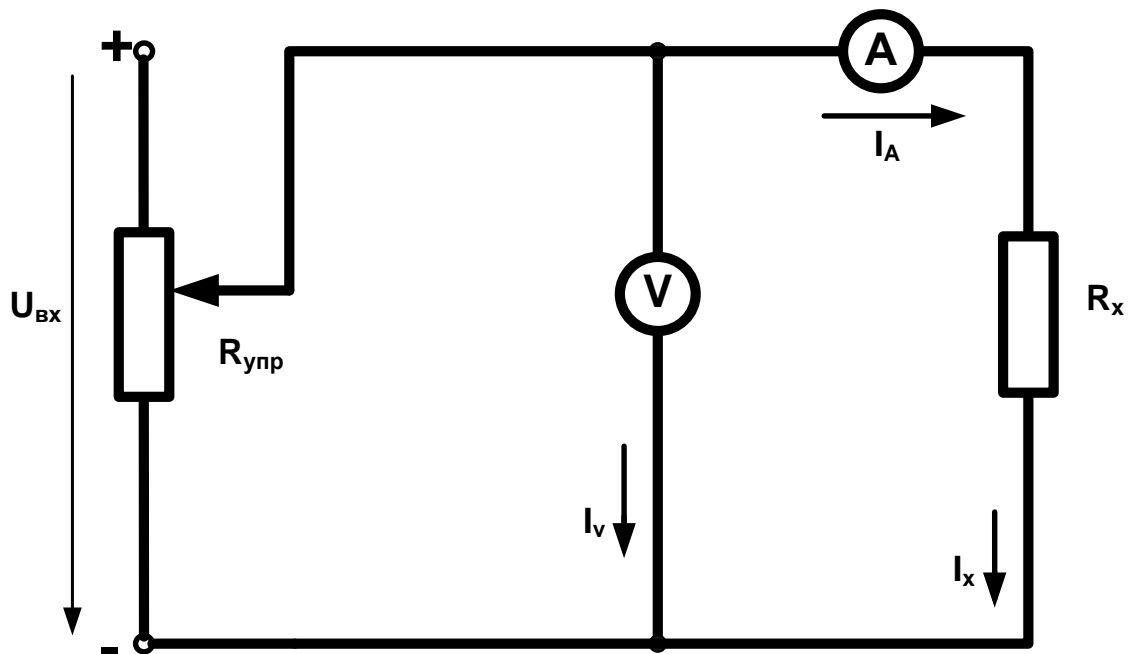


Рис.1.2. Вимірювання великого опору на постійному струмі ($R_x \gg R_v$). Схема лабораторної установки.

2.1 Порядок виконання лабораторної роботи

1. Постановка вимірювального експерименту.
2. Визначення ціни поділки шкали вимірювальних приладів.
3. Проведення серії спостережень незмінної фізичної величини.
4. Виконання основних правил запису результатів спостережень.
5. Дослідження методів вимірювання електричного опору на постійному струмі:

а) вимірювання електричного опору на постійному струмі методом амперметра та вольтметра;

б) вимірювання електричного опору на постійному струмі методом заміщення.

2.2 Опис вимірювальної установки

Принципову електричну схему вимірювальної установки наведено на рис.1.1, 1.2. Вимірювальна установка дозволяє виконувати вимірювання електричного опору на постійному струмі методом амперметра і вольтметра та методом заміщення без монтажу/демонтажу вимірювальної схеми. Всі комутації у вимірювальних колах схеми вимірювань здійснюються за допомогою органів керування.

2.3 Завдання лабораторної роботи

Виконати вимірювання:

а. малого електричного опору ($\leq 10 \text{ Ом}$) методом амперметра і вольтметра;

б. малого електричного опору ($\leq 10 \text{ Ом}$) методом заміщення;

с. великого електричного опору ($\geq 10 \text{ кОм}$) методом амперметра і вольтметра;

д. великого електричного опору ($\geq 10 \text{ кОм}$) методом заміщення.

Виконати статистичну обробку результатів спостережень та знайти параметри розподілу результатів вимірювань і похибок. Закон розподілу випадкової величини вважати нормальним.

Зробити висновки за результатами досліджень та надати відповіді на контрольні запитання.

2.4 Виконання лабораторної роботи

Ознайомитись із засобами вимірювань, що входять до складу вимірювальної установки.

За допомогою органів керування вимірювальної установки скласти необхідну схему для:

a. вимірювання малого електричного опору ($\leq 10 \text{ Ом}$) методом амперметра і вольтметра;

b. вимірювання малого електричного опору ($\leq 10 \text{ Ом}$) методом заміщення;

c. вимірювання великого електричного опору ($\geq 10 \text{ кОм}$) методом амперметра і вольтметра;

d. вимірювання великого електричного опору ($\geq 10 \text{ кОм}$) методом заміщення.

Провести випробування схеми. Визначити та встановити границі вимірювань вимірювальних приладів. Визначити і занести (у вигляді дробу) до табл. 1.1, 1.2 для кожного вимірювального експеримента ціну поділки шкали амперметра і вольтметра, що входять до складу вимірювальної установки. Якщо в ході вимірювального експерименту необхідно буде змінити границю вимірювань, ціну поділки шкали відповідного вимірювального приладу визначають знову і заносять до табл. 1.1, 1.2.

Виконати вимірювання. По кожному з пунктів a - d провести не менше шести спостережень. Результати спостережень занести до табл. 1.1, 1.2 у відносних одиницях (поділках шкали). Під час спостережень

положення показчиків на шкалах вимірювальних приладів визначати за допомогою інтерполяції.

Форма таблиці 1.1.

№ спостереження	U		I		$R_x, \text{ Ом}$	$R_M, \text{ Ом}$
	ціна поділки шкали	поділки шкали	ціна поділки шкали	поділки шкали		
1						
2						
3						
4						
5						
6						

Форма таблиці 1.2

№ спостереження	U		I		$R_x, \text{ Ом}$	$R_M, \text{ Ом}$
	ціна поділки шкали	поділки шкали	ціна поділки шкали	поділки шкали		
1						
2						
3						
4						
5						
6						

де: U, I – відповідно покази вольметра і амперметра під час вимірювання електричного опору методом вольметра і амперметра (поділки шкали); R_M – покази магазину опорів під час вимірювання електричного опору методом заміщення.

Для кожного спостереження з таблиці 1.1, 1.2 обчислити величину електричного опору R_x за законом Ома (1.8). Під час обчислень

використати ціну поділки шкали відповідного вимірювального приладу, що відповідає вибраному спостереженню.

Для кожного вимірювального експерименту за п.п. а - д виконати статистичну обробку результатів спостережень та визначити наступні параметри розподілу випадкової величини: середнє значення r , відхилення від середнього v , дисперсію $D(r)$, середнє квадратичне відхилення результату спостереження s_{xr} , середнє квадратичне відхилення середнього арифметичного результатів спостережень s_{0r} . Результати занести до табл. 1.3-1.6.

Форма таблиці 1.3.

№ спостереження	u	i	r_j	$r = \sum r_j / N$	$v_j = r_j - r$	$D(r)$	s_{xr}	s_{0r}
1								
2								
3								
4								
5								
6								

Форма таблиці 1.4.

№ спостереження	u	i	r_j	$r = \sum r_j / N$	$v_j = r_j - r$	$D(r)$	s_{xr}	s_{0r}
1								
2								
3								
4								
5								
6								

Форма таблиці 1.5.

№ спостереження	R_j	$R=\sum R_j/N$	$v_j=R_j-R$	$D(R)$	S_{xR}	S_{0R}
1						
2						
3						
4						
5						
6						

Форма таблиці 1.6.

№ спостереження	R_j	$R=\sum R_j/N$	$v_j=R_j-R$	$D(R)$	S_{xR}	S_{0R}
1						
2						
3						
4						
5						
6						

Під кожною таблицею навести результат вимірювання у вигляді (1.3) з довірчою вірогідністю $P=0,9545$. Під час запису результату вимірювання виконати приведення похибок та результатів.

Зробити висновки за результатами досліджень. Оформити протокол досліджень. Надати відповіді на контрольні запитання.

3 КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. В чому полягає метод вимірювання електричного опору на постійному струмі за допомогою вольтметра і амперметра? На якому законі електротехники він базується? Навести пояснення.

2. В чому полягає метод вимірювання електричного опору на постійному струмі методом заміщення? Навести пояснення.

3. В якому вигляді наводяться результати вимірювань? Навести пояснення.

4. Чим зумовлені похибки вимірювань? Як виражається абсолютна похибка вимірювань? Як виражається відносна похибка вимірювань?

5. Чим зумовлені систематичні та випадкові похибки вимірювань? Навести визначення та розгорнуті пояснення.

6. В чому полягає методична похибка вимірювань? До якого типу похибок відноситься методична похибка вимірювань? Чим зумовлені методичні похибки вимірювань в цій лабораторній роботі?

7. Що таке закон розподілу випадкової величини? Що розуміється під параметрами закону розподілу випадкової величини: середнє значення, відхилення від середнього, дисперсія, середнє квадратичне відхилення результату спостереження, середнє квадратичне відхилення середнього арифметичного результатів спостережень. Навести визначення та пояснення.

8. Навести закон розподілу результатів вимірювань та похибок для кожного вимірювання, виконаного в ході цієї лабораторної роботи, в графічному вигляді з позначенням параметрів розподілу, визначених під час обробки результатів спостережень. Надати розгорнуті пояснення.

Дослідження трансформаторів струму

Мета роботи: вивчити схеми підключення вимірювальних приладів через трансформатори струму (ТС). Набути досвіду складання схем і виконання електричних вимірювань із застосуванням ТС.

1 ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

1.1 Принципова схема та схема заміщення ТС

Принципова схема електромагнітного ТС і його схема заміщення наведені на рис. 2.1 а,б. Основними елементами ТС, що беруть участь в перетворенні струму, є первинна 1 і вторинна 2 обмотки, які намотано на магнітопровід 3. Первинна обмотка вмикається послідовно (у розріз **струмопроводу** високої напруги 4) і обтікається струмом лінії 1. До вторинної обмотки підключаються вимірювальні прилади (наприклад: амперметр, обмотка струму ватметра, обмотка струму лічильника електроенергії) або реле.

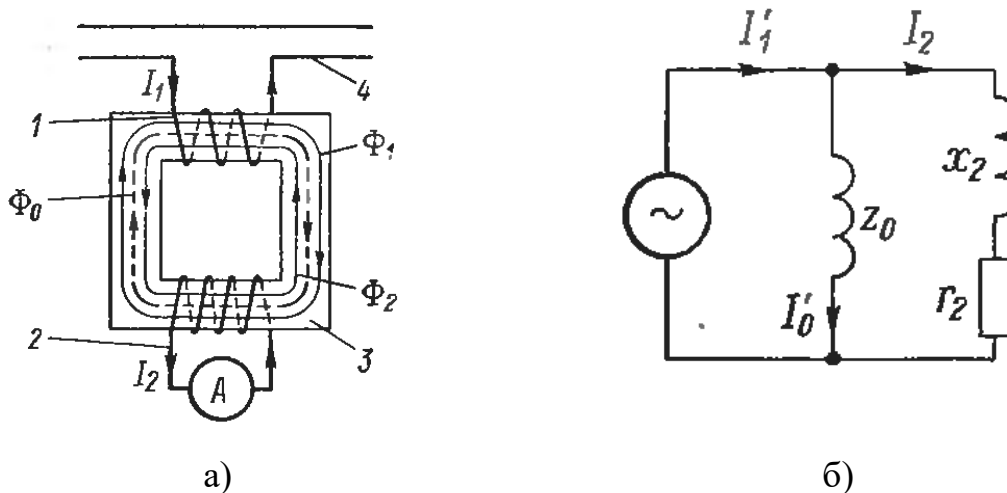


Рис 2.1 Схема трансформатора струму: а – принципова, б - заміщення

УВАГА! Під час роботи ТС вторинна обмотка завжди повинна бути замкнута.

Первинну обмотку разом із колом високої напруги називають **первинним колом**, а зовнішнє коло, що одержує вимірювальну інформацію від вторинної обмотки ТС (тобто навантаження і сполучні дроти), називають **вторинним колом**. Коло, утворене вторинною обмоткою і приєднаними до неї приладами, називають **гілкою вторинного струму**.

З принципової схеми ТС видно, що між первинною і вторинною обмотками немає електричного зв'язку. Вони ізольовані одна від одної на повну робочу напругу. Це дозволяє здійснити безпосереднє приєднання вимірювальних приладів або реле до вторинної обмотки і тим самим виключити вплив високої напруги на обслуговуючий персонал. Оскільки обидві обмотки намотано на один магнітопровід, вони є магнітозв'язаними.

На рис. 2.1,а зображено лише елементи, які беруть участь в перетворенні струму. Звичайно ТС має багато інших елементів, що забезпечують необхідний рівень ізоляції, захист від атмосферних впливів, належні монтажні та експлуатаційні характеристики. Проте вони не беруть безпосередньої участі у перетворенні струму і в подальшому не розглядатимуться.

Після ввімкнення ТС в електричну мережу первинною обмоткою 1 потече струм I_1 , який називається **первинним струмом**. Він залежить тільки від параметрів первинного кола. Тому під час аналізу явищ, що відбуваються в ТС, первинний струм можна вважати заданою величиною. Під час протікання I_1 первинною обмоткою в магнітопроводі утворюється змінний магнітний потік Φ_1 , який змінюється з тією самою частотою, що й струм I_1 . Магнітний потік Φ_1 охоплює витки як первинної, так і вторинної обмоток. Перетинаючи витки вторинної обмотки, магнітний потік Φ_1 індукуює в ній електрорушійну силу (е.р.с.) E_2 . Якщо вторинна обмотка

замкнута на навантаження, тобто до неї приєднано вторинне коло, то в такій системі «вторинна обмотка — вторинне коло» під дією індукованої е.р.с. E_2 виникатиме струм I_2 . Цей струм за законом Ленца матиме напрямок, протилежний напрямку первинного струму I_1 . Струм I_2 , що протікає вторинною обмоткою, утворює в магнітопроводі змінний магнітний потік Φ_2 , який направлений зустрічно магнітному потоку Φ_1 .

В результаті алгебраїчного додавання магнітних потоків Φ_1 і Φ_2 у магнітопроводі утворюється результуючий магнітний потік $\Phi_0 = \Phi_1 - \Phi_2$, величина якого складає 1-3% величини магнітного потоку Φ_1 . Результуючий магнітний потік Φ_0 є тією ланкою, за допомогою якої здійснюється передавання енергії від первинної обмотки до вторинної під час перетворення струму.

Якщо позначити число витків первинної обмотки через ω_1 а вторинної обмотки — через ω_2 , то під час протікання ними відповідно струмів I_1 , і I_2 , у первинній обмотці утворюється **первинна** магніторушійна сила (м.р.с.): $F_1 = I_1\omega_1$, а у вторинній обмотці — **вторинна** м.р.с. $F_2 = I_2\omega_2$. З наведених виразів видно, що м.р.с. вимірюється в амперах. За відсутності втрат енергії в процесі перетворення струму F_1 і F_2 мають чисельно дорівнювати одна одній, але бути направлені в протилежні сторони $|F_1| = |F_2|$.

ТС, в якому процес перетворення струму не супроводжується втратами енергії, називається **ідеальним**. Для ідеального ТС справедливе векторне рівняння

$$\dot{F}_1 = -\dot{F}_2, \quad (2.1)$$

або:

$$I_1\omega_1 = I_2\omega_2 \quad (2.2)$$

З рівняння (2.2) витікає, що:

$$I_1 / I_2 = \omega_2 / \omega_1 = n, \quad (2.3)$$

тобто, струми в обмотках ідеального ТС обернено пропорційні кількості витків.

Відношення первинного струму до вторинного (I_1/I_2) або кількості витків вторинної обмотки до кількості витків первинної обмотки (ω_2/ω_1) називається *коефіцієнтом трансформації n* ідеального ТС.

Враховуючи рівняння (2.3),

$$I_1 = I_2 \frac{\omega_2}{\omega_1} = I_2 n, \quad (2.4)$$

тобто, первинний струм I_1 дорівнює добутку вторинного струму I_2 та коефіцієнта трансформації n ідеального ТС.

В реальних ТС перетворення струму супроводжується втратами енергії, яка витрачається на утворення магнітного потоку Φ_0 в магнітопроводі, на нагрівання та перемагнічування магнітопроводу, а також на нагрівання дротів вторинної обмотки і вторинного кола. Ці втрати енергії порушують наведене вище рівняння для абсолютних значень м.р.с. F_1 і F_2 . У реальному ТС первинна м.р.с. повинна забезпечити утворення необхідної вторинної м.р.с., а також додаткової м.р.с., що витрачається на намагнічування магнітопроводу і покриття інших втрат енергії. Отже, для реального ТС рівняння (1) матиме наступний вигляд:

$$\dot{F}_1 = \dot{F}_2 + \dot{F}_0 \quad (2.5)$$

де: F_0 — повна м.р.с. намагнічування, що витрачається на проведення магнітного потоку Φ_0 магнітопроводом, на нагрівання та перемагнічування останнього.

Відповідно до цього рівняння (2.2) набуде вигляду

$$I_1 \omega_1 = I_2 \omega_2 + I_0 \omega_1 \quad (2.6)$$

де: I_0 - струм намагнічування, що утворює магнітний потік Φ_0 , і який є частиною первинного струму I_1 . Поділивши всі члени рівняння (2.6) на ω_1 отримаємо:

$$I_1 = I_2 \frac{\omega_2}{\omega_1} + I_0 \quad (2.7)$$

За первинного струму, що не перевищує номінальний струм ТС, струм намагнічування I_0 становить не більше 1—3% первинного струму I_1 , і ним можна знехтувати. Тоді вираз (2.7) матиме такий само вигляд, що й вираз (2.4).

Таким чином, вторинний струм ТС пропорційний первинному струму. З виразів (2.4) і (2.7) витікає, що для пониження вимірюваного струму необхідно, щоб кількість витків вторинної обмотки ω_2 була більшою за кількість витків первинної обмотки ω_1 .

Порівнюючи формули (2.2) і (2.5), бачимо, що вони відрізняються складовою F_0 (або $I_0\omega_1$). Отже, реальний ТС дещо спотворює результати вимірювань, тобто привносить до результатів вимірювань похибки.

Іноді користуються так званим приведенням струму до первинної або вторинної обмотки. Так, наприклад, якщо поділити первинний струм I_1 на коефіцієнт трансформації n , то отримаємо первинний струм, приведений до вторинної обмотки I_1' . Аналогічно, приведений струм намагнічування позначається I_0' . Тоді отримаємо:

$$I_1' = I_2 + I_0' \quad (2.8)$$

Шляхом такого приведення ТС замінюється еквівалентним трансформатором з коефіцієнтом трансформації, що дорівнює одиниці.

З рівняння (2.8) виходить, що певна частина приведенного первинного струму I_1 витрачається на намагнічування магнітопроводу, а решта трансформується у вторинний струм I_2 , тобто первинний струм I_1 розгалуджується по двох паралельних колах: навантаження і намагнічування. Цьому відповідає схема заміщення, яка наведена на рис.2.1б, де в коло гілки намагнічування Z_0 від струму I_1 відгалужується струм I_0 . Решта струму $I_1 - I_0$ – струм I_2 – протікає вторинним колом. Опір первинної обмотки ТС на схемі заміщення не показаний, оскільки він не спричиняє впливу на роботу трансформатора.

1.2 Векторна діаграма ТС

Для побудови векторної діаграми ТС (рис.2.2) мають бути відомі наступні величини: 1) кількість витків вторинної обмотки ω_2 , активний $r_{2обм}$ та індуктивний $x_{2обм}$ опори вторинної обмотки ТС (Ом); 2) середня довжина магнітного шляху l_m (м) і розрахунковий поперечний перетин S_M (м²) магнітопроводу ТС; 3) матеріал магнітопроводу та його магнітні властивості; 4) вторинне навантаження $z_{2M} = \sqrt{r_{2M}^2 + x_{2M}^2}$, що є повним опором всіх приладів і реле, ввімкнених у вторинне коло ТС, а також сполучних дротів (Ом); активний $r_{2н}$ та індуктивний $x_{2н}$ опір вторинного кола (Ом).

Векторну діаграму ТС зобразимо в прямокутній системі координат. Вісь абсцис приймемо такою, що співпадає з вектором вторинного струму I_2 .

Побудову векторної діаграми виконаємо наступним чином. Від початку координат (пункт О) відкладемо вправо вектор вторинного струму I_2 (та пропорційну йому м.р.с. F_2) і вектор активної складової падіння напруги у вторинній обмотці $I_2 r_{2обм}$, що співпадає за напрямом з вектором струму I_2 . З кінця вектора $I_2 r_{2обм}$ під прямим кутом до нього відкладемо вектор індуктивної складової падіння напруги у вторинній обмотці $I_2 x_{2обм}$.

З кінця цього вектора паралельно I_2 відкладемо вектор активної складової падіння напруги на навантаженні $I_2 r_{2н}$. Вектор індуктивної складової на навантаженні $I_2 x_{2н}$ проводимо з кінця вектора $I_2 r_{2н}$ перпендикулярно до нього. Результируючий вектор утворює е.р.с. E_2 вторинної обмотки (В):

$$E_2 = I_2 \sqrt{(r_{2обм} + r_{2м})^2 + (x_{2обм} + x_{2м})^2}. \quad (2.9)$$

Фазовий зсув між вторинною е.р.с. E_2 і вторинним струмом I_2

$$\alpha = \arctg \frac{x_{2обм} + x_{2м}}{r_{2обм} + r_{2м}}. \quad (2.10)$$

З курсу теоретичних основ електротехніки відомо, що магнітний потік випереджає створену ним е.р.с. на 90° . Магнітна індукція B збігається за напрямом із магнітним потоком Φ . Її максимальне значення (Тл):

$$B_{\max} = \frac{E_2}{4,44 f S_M \omega_2} = \frac{0,225 E_2}{f S_M \omega_2}, \quad (2.11)$$

де: E_2 визначається за (2.9), В; S_M – розрахункове значення площі поперечного перетину магнітопроводу, m^2 ; f — частота струму I_1 , Гц. Нанесемо на векторну діаграму напрям векторів магнітного потоку Φ_0 та магнітної індукції B_{\max} . Знаючи напрям цих векторів, можна побудувати вектор повної м.р.с. намагнічування F_0 . Він повинен випереджати вектори Φ_0 і B_{\max} на **кут втрат** Ψ . Цей кут характеризує відношення активної складової м.р.с. намагнічування F_{0a} в магнітопроводі до її реактивної складової F_{0p} . Кут втрат можна визначити за експериментальною кривою, що визначена для магнітного матеріалу, з якого виготовлено магнітопровід ТС.

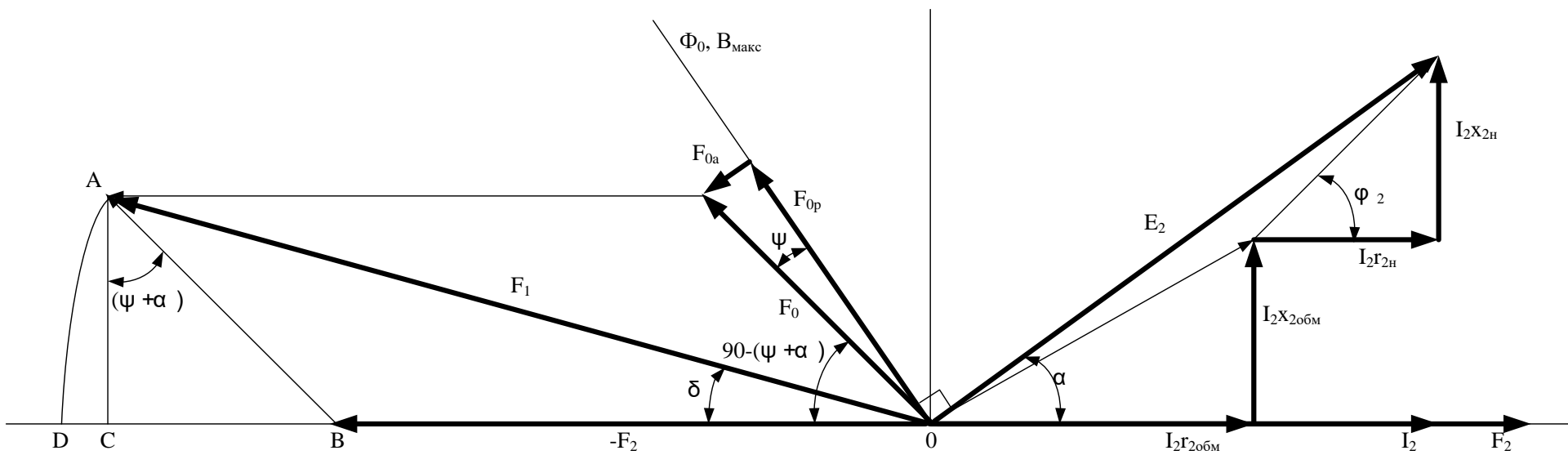


Рис.2.2. Векторна діаграма трансформатора струму

Ця крива є залежністю кута втрат Ψ (град) від магнітної індукції B_{\max} : $\psi = f(B_{\max})$. Для прикладу на рис.2.3 наведено залежність питомої м.р.с. намагнічування $F_{y\delta}$ і кута втрат Ψ для електротехнічної сталі марки 3413 від магнітної індукції B_{\max} .

Абсолютне значення повної м.р.с. намагнічування:

$$F_0 = F_{y\delta} l_m, \quad (2.12)$$

де: $F_{y\delta}$ — питома м.р.с. намагнічування (що приходить на 1 м довжини середнього магнітного шляху в магнітопроводі), А/м; l_m — середня довжина магнітного шляху в магнітопроводі, м.

Питома м.р.с. $F_{y\delta}$ визначається за кривою намагнічування, яка є залежністю максимальної магнітної індукції від питомої м.р.с. намагнічування $B_{\max} = f(F_{y\delta})$. Криві намагнічування знімаються експериментально для магнітопроводу зі сталі визначеної марки. Під час розрахунку ТС найчастіше користуються так званою перевернутою кривою намагнічування. Цю залежність питомої м.р.с. $F_{y\delta}$ від магнітної індукції B_{\max} наведено на рис.2.3.

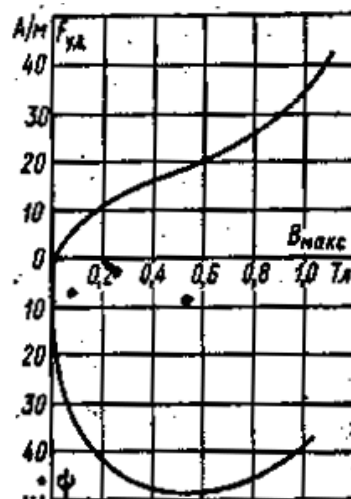


Рис.2.3. Типова залежність питомої м.р.с. $F_{y\delta}$ і кута втрат ψ від індукції B_{\max}

Визначивши за (2.12) значення повної м.р.с. намагнічування F_0 , будемо її вектор під кутом випередження Ψ до променя Φ_0 . Знаючи вектори F_2 і F_0 , можна визначити вектор первинної м.р.с. F_1 . Для цього ліворуч від початку координат на осі абсцис відкладаємо вектор $-F_2$. Геометричним додаванням векторів $-F_2$ і F_0 визначимо вектор первинної м.р.с. F_1 .

Дана векторна діаграма ТС побудована, оперуючи магніторушійними силами. Можна також побудувати векторну діаграму ТС, виходячи з базисного вектора струму I_2 . Звичайно, всі струми мають бути приведені до первинної або вторинної обмотки, відповідно до формули (2.8).

Векторна діаграма наочно ілюструє співвідношення між основними параметрами ТС (струми, опори тощо). Видно, що в реальному ТС первинна м.р.с. дещо більша за вторинну, оскільки частка енергії, що підводиться до первинної обмотки, витрачається на утворення м.р.с. намагнічування F_0 . Отже, первинний струм дещо більший за вторинний. Крім того, кут між векторами первинної і вторинної м.р.с. (і відповідно між струмами I_1 та I_2 дещо менший за 180° . Таким чином, реальний ТС вносить певну похибку як до вимірюваного значення вторинного струму, так і до його фази.

1.3 Похибки трансформатора струму

Похибкою струму ТС називається похибка, яка привноситься трансформатором під час вимірювання струму і виникає внаслідок того, що дійсний коефіцієнт трансформації не дорівнює номінальному.

Похибка струму визначається як алгебраїчна різниця дійсного значення вторинного струму I_2 і приведеного до вторинного кола первинного струму I_1' : $I_1' = I_1 / n_n$ і виражається у відсотках приведеного до вторинного кола дійсного значення первинного струму:

$$f_i = \frac{I_2 - I_1 / n_n}{I_1 / n_n} 100, \quad (2.13)$$

де: n_n — номінальний коефіцієнт трансформації ТС.

Похибка струму, яка відповідає номінальним параметрам, називається номінальною похибкою струму ТС і виражається формулою:

$$f_{in} = \frac{I_2 n_n - I_{1n}}{I_{1n}} 100, \quad (2.14)$$

де: I_{1n} — номінальний первинний струм ТС, А; I_2 — дійсе значення вторинного струму ТС, А.

Виразимо похибку струму лише через вторинний струм. Для цього чисельник і знаменник у формулі (2.14) поділимо на n_n :

$$f_{in} = \frac{I_2 - I_{2n}}{I_{2n}} 100. \quad (2.15)$$

Отже, номінальна похибка струму є різницею вторинних струмів – дійсного і номінального, – віднесеною до номінального вторинного струму і вираженою у відсотках. Прийнято вважати похибку струму негативною, якщо дійсний струм є меншим за номінальний, і навпаки.

Для практичних розрахунків доцільно вивести формулу, в якій похибка струму була б представлена як функція основних параметрів і конструктивних даних ТС. Для виведення такої формули повернемося до векторної діаграми рис.2.2. Арифметична різниця векторів F_1 і $-F_2$, що характеризує похибку струму, дорівнює відрізку BD , оскільки $OA=OD$. Для спрощення виведення цієї формули опустимо перпендикуляр з пункту A на вісь абсцис. Точку їх перетину позначимо C . Кут δ складає лише декілька мінут. Тому відрізок DC досить малий і ним можна знехтувати.

Можна припустити, що арифметична різниця векторів F_1 і $-F_2$ дорівнює BC . З трикутника ABC виходить, що $\angle BAC = \psi + \alpha$, тоді:

$$\angle BC = F_0 \sin(\psi + \alpha). \quad (2.16)$$

Номінальне значення похибки струму (%) може бути отримане з рівняння (2.16), якщо обидві його частини поділити на F_1 і помножити на 100:

$$f_{in} = \frac{F_0}{F_1} \sin(\psi + \alpha) \cdot 100. \quad (2.17)$$

Оскільки вектор F_2 завжди менший за вектор F_1 , то похибці струму, що визначена за (2.17), присвоюється знак мінус. Позитивна похибка струму, що зустрічається у ТС, виходить в результаті штучних заходів, спрямованих на зменшення похибки або зміну її характеру.

Шляхом нескладних перетворень формулу (2.17) можна представити у вигляді:

$$f_{in} = \frac{33,8 l_m z_2^{0,6} l_{2,m}^{1,2}}{(I_1 / I_{1n})^{0,4} f^{0,6} F_{1n}^{1,6} S_M^{0,6}} \sin(\psi + \alpha) \cdot 100, \quad (2.18)$$

де: l_m — середня довжина магнітного потоку в магнітопроводі, м; Z_2 — опір гілки вторинного струму (повний опір у вторинному колі та вторинній обмотці ТС) Ом; f - частота змінного струму, Гц; S_M — перетин магнітопроводу, м²; Ψ — кут втрат, ... °; α — фазовий зсув між вторинною е.р.с. E_2 і вторинним струмом I_2 , град.

Кутовою похибкою ТС δ називається фазовий зсув між векторами первинного I_1 і вторинного I_2 струмів за такого вибору їхніх напрямків, щоб для ідеального ТС цей кут дорівнював нулю. Тобто, це кут між вектором первинного струму I_1 і повернутим на 180° вектором вторинного струму I_2 .

Кутова похибка виражається в мінутах (...') або сантирадіанах (срад) і вважається позитивною, коли вектор вторинного струму I_2 , повернутий на 180° , випереджає вектор первинного струму I_1 .

Кутова похибка може бути визначена з прямокутного трикутника OAC (рис.2.2): Катет $|AC| = F_0 \cos(\Psi + \alpha)$, отже:

$$\sin \delta = \frac{F_0}{F_1} \cos(\psi + \alpha). \quad (2.19)$$

Для кутів, що не перевищують декількох градусів, синус кута може бути прийнятий чисельно рівним самому куту, вираженому в радіанах (рад):

$$\delta = \frac{F_0}{F_1} \cos(\psi + \alpha) \quad (2.20)$$

або в сантирадіанах (срад):

$$\delta = \frac{F_0}{F_1} \cos(\psi + \alpha) \cdot 100. \quad (2.20a)$$

Щоб виразити кутову похибку в мінутах (...'), у (2.20) слід ввести коефіцієнт переведення радіан в мінути:

$$\delta = 3440 \frac{F_0}{F_1} \cos(\psi + \alpha). \quad (2.21)$$

Залежність кутової похибки (...') від конструктивних розмірів ТС

$$\delta = \frac{119332 I_{2M}^{0,6} I_{1M}^{1,2}}{(I_1 / I_{1n})^{0,4} f^{0,6} F_{1n}^{1,6} S_M^{0,6}} \cos(\psi + \alpha). \quad (2.22)$$

1.4 Режим роботи трансформатора струму

ТС працює в режимі близькому до короткого замикання, оскільки до його вторинної обмотки підключаються послідовно струмові обмотки вимірювальних приладів з малим опором. Навантаженням ТС є повний опір послідовно сполучених струмових обмоток всіх вимірювальних приладів і сполучних дротів. Первинна обмотка ТС, виводи якої позначаються Л1, Л2 (лінія), має невелике число витків (може бути один виток у вигляді прямої мідної шини) і включається у вимірюване коло послідовно (рис 2.1,а). Вторинна обмотка, виводи якої позначаються І1, І2 (вимірювання), має велике число витків, і до неї послідовно підключають амперметри, струмові обмотки ватметрів, лічильників та інших вимірювальних приладів.

Похибки ТС зростають зі збільшенням навантаження. У паспорті ТС вказується максимально допустимий повний опір всіх приладів і дротів, ввімкнених послідовно у вторинне коло за номінального вторинного струму.

2 ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ

2.1 Опис вимірювальної установки

На рис.2.4 наведено схему для визначення похибки коефіцієнта трансформації трансформатора струму. Струм у первинній обмотці трансформатора струму регулюється за допомогою ЛАТР. Градуйований реостат r_2 дозволяє змінювати опір вторинного кола трансформатора струму.

Вимірявши струми I_1 , I_2 , можна визначити дійсний коефіцієнт трансформації $n_d = I_1 / I_2$.

Похибка коефіцієнта трансформації струму

$$\delta_n = [(n_n - n_d) / n_d] \cdot 100\%$$

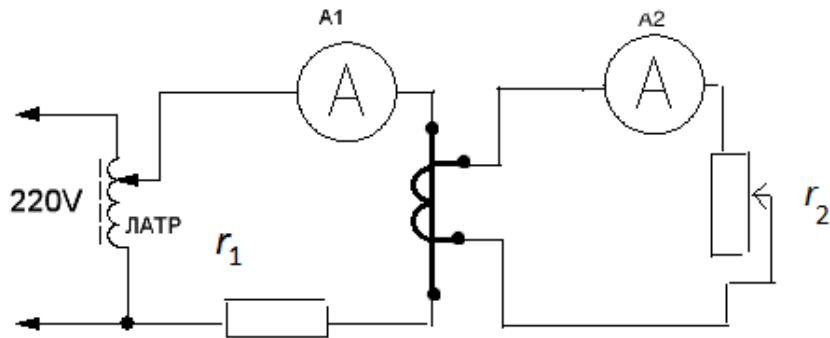


Рис. 2.4 Схема вимірювальної установки

2.2 Порядок виконання роботи

1. Ознайомитись з вимірювальними приладами на лабораторному стенді. Записати номінальні значення величин, класи точності та інші технічні дані.
2. Перевірити можливість використання наявної апаратури в наведеній схемі.
3. Під наглядом викладача скласти вимірювальну схему (рис. 2.4).
4. Для різних значень первинного струму в межах 20-100% номінального значення, при номінальному опорі вторинної обмотки трансформатора визначити коефіцієнт трансформації та його похибку. Результати записати до табл. 2.1.
5. Для первинного струму, який дорівнює 50% номінального, та опорі вторинного кола трансформатора струму, що відповідає 20, 50, 100, 150 та 200 % номінального, визначити коефіцієнти трансформації та їх похибки.
6. За отриманими даними побудувати криві похибки трансформатора: а) в залежності від $\delta_n = f(I_1)$ при $r_2 = \text{const}$; б) в залежності від опорі вторинного кола $\delta_n = f(r_2)$ при $I_1 = \text{const}$.

Форма таблиці 2.1

№ дослідю	I_1		I_2		$n_{\partial} = I_1 / I_2$	n_n	$\delta_n, \%$	$r_2, \text{Ом}$
	поділок	A	поділок	A				
1								
2								
3								
...								

3 КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Призначення трансформаторів струму.
2. Електрична принципова схема трансформатору струму.
3. Схема заміщення трансформатору струму.
4. Векторна діаграма трансформатору струму. Побудувати та надати пояснення.
5. Похибки трансформатору струму. Визначення похибок ТС на основі векторної діаграми ТС.
6. Основні типи трансформаторів струму.
7. Застосування трансформаторів струму для вимірювання струму, потужності та електричної енергії.
8. Основні відомості щодо використання трансформаторів струму в колах релейного захисту.

Лабораторна робота №4-5

Вимірювання напруги, струму та активної електричної потужності в однофазній електричній мережі змінного струму

Мета роботи: набути практичних навичок електричних вимірювань напруги, струму, активної потужності. Ознайомитися з конструкцією та принципом дії електромеханічних вимірювальних механізмів. Дослідити похибки засобів вимірювань.

1 ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

1.1 Похибки засобів вимірювань

Залежно від умов виникнення похибки засобу вимірювань (ЗВ) розрізняють:

основну похибку — похибка ЗВ, який використовується в нормальних умовах застосування, тобто при температурі навколишнього середовища $20\pm 5^{\circ}\text{C}$, відсутності зовнішнього електричного і магнітного полів, окрім магнітного поля Землі, тощо;

додаткову похибку — похибка ЗВ, що виникає в результаті відхилення значення однієї з впливаючих величин від нормального значення. Іншими словами - це похибка, що виникає внаслідок відхилення умов застосування ЗВ від нормальних значень.

Залежно від зміни в часі вимірюваної величини розрізняють:

статичну похибку — похибка ЗВ під час вимірювання незмінної в часі величини;

динамічна похибка — різниця між похибкою ЗВ в динамічному режимі (тобто при зміні вимірюваної величини в часі) і статичною похибкою ЗВ, що відповідає значенню вимірюваної величини в даний момент часу.

За способом вираження похибок вимірювальних приладів розрізняють абсолютну, відносну і приведену похибки.

Абсолютна похибка вимірювального приладу Δ — це різниця між показом приладу x_n і дійсним значенням вимірюваної величини x , тобто

$$\Delta = x_n - x \quad (3.1)$$

Відносна похибка вимірювального приладу δ — це відношення абсолютної похибки вимірювального приладу до дійсного значення вимірюваної величини. Відносна похибка, що зазвичай виражається у відсотках, визначається за формулою:

$$\delta = \frac{x_n - x}{x} 100 \% \quad (3.2)$$

Приведена похибка γ — це виражене у відсотках відношення абсолютної похибки Δ до нормованого значення x_N

$$\gamma = \frac{x_n - x}{x_N} 100 \% \quad (3.3)$$

Для приладів з нульовою відміткою біля краю або поза шкалою нормоване значення дорівнює кінцевому значенню діапазону вимірювань. Для приладів з двосторонньою шкалою, тобто з відмітками шкали, розташованими по обидві сторони від нуля, воно дорівнює арифметичній сумі кінцевих значень діапазону вимірювань.

У вимірювальних приладах залежність абсолютної похибки від вимірюваної величини x може бути представлена певною смугою невизначеності, обумовленою випадковою похибкою і зміненням характеристик приладів в результаті дії впливаючих факторів та внаслідок старіння. Тому значення абсолютної похибки, зазвичай, обмежене двома

прямими, симетричними відносно осі абсцис, відстань між якими збільшується разом із зростанням вимірюваної величини.

Граничні значення абсолютних похибок Δ_{\max} можуть бути як позитивними, так і негативними, але однаковими за модулем. Їхня залежність від вимірюваної величини x характеризується прямими (рис. 3.1). Рівняння прямої, яка не проходить через початок координат, може бути виражено за допомогою двох постійних коефіцієнтів a і b

$$|\Delta_{\max}| = |a| + |bx| \quad (3.4)$$

де: a називають граничним значенням **адитивної** похибки, bx - граничним значенням **мультиплікативної** похибки.

Абсолютні адитивні похибки не залежать від вимірюваної величини x , а мультиплікативні — прямо пропорційні значенню x .

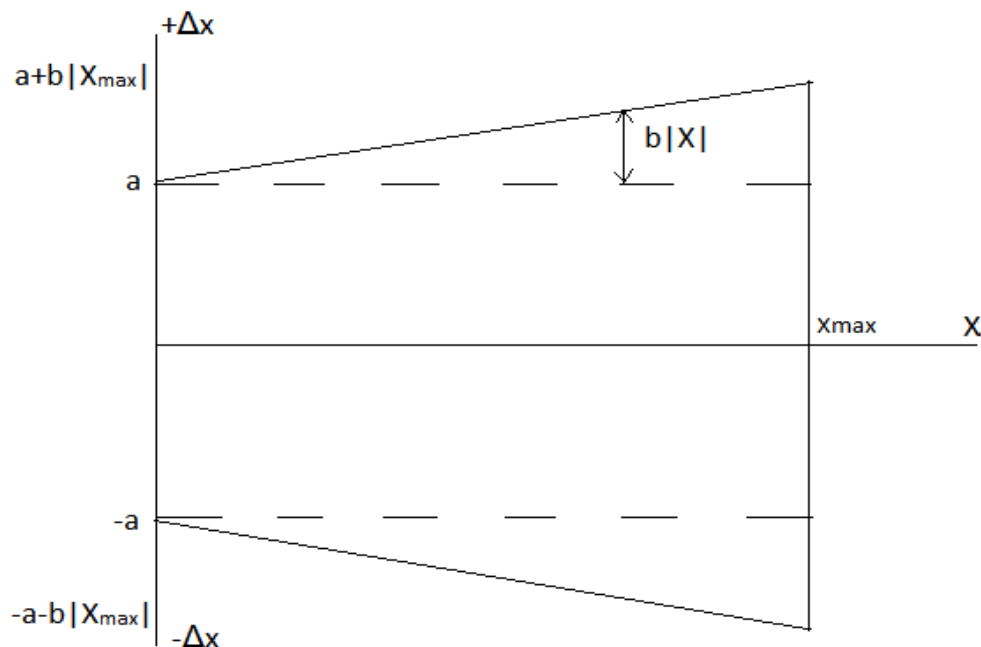


Рис. 3.1. Мультиплікативна та адитивна похибки

Причини виникнення адитивної похибки – тертя в опорах, неточність відліку, дрейф, вібрації тощо. Причини мультиплікативної похибки - вплив зовнішніх чинників і старіння елементів та вузлів приладів.

Граничне значення відносної похибки приладу δ'_{max} , виражене у відсотках значення вимірюваної величини, яке пов'язане з граничним значенням абсолютної похибки Δ_{max} залежністю:

$$|\delta'_{max}| = \frac{|\Delta_{max}|}{x} 100 = \left(\frac{|a|}{x} + |b| \right) 100 \% \quad (3.5)$$

Згідно ГОСТ 8.401—80 вимірювальним приладам присвоюється клас точності. **Клас точності** — це узагальнена характеристика приладу, яка визначається границями його допустимих основної і додаткових похибок. Межі змін показів, що допускаються, від впливу зовнішніх чинників для будь-якого приладу встановлюються залежно від класу його точності згідно стандартів на окремі види приладів. Клас точності може виражатися одним числом або дрібом.

У приладів, адитивна похибка яких привалює над мультиплікативною, абсолютна і приведена похибки виявляються постійними в будь-якій точці шкали. У таких приладів клас точності виражається одним числом, а основна приведена похибка в робочому діапазоні шкали, що виражена у відсотках, не перевищує значення відповідного класу точності. До таких приладів належать більшість стрілочних і самописних приладів.

Клас точності приладів, у яких адитивна і мультиплікативна складові основної похибки вимірюються, позначається у вигляді двох чисел, розділених похилою, наприклад, клас точності позначається як: 0,1/0,05. Граничне значення основної відносної похибки приладів, виражене у відсотках, у цьому випадку може бути визначене за формулою:

$$|\delta_{\max}| = \left[c + d \left(\left| \frac{x_k}{x} \right| - 1 \right) \right] \quad (3.6)$$

де: x_k — кінцеве значення діапазону вимірювань; $c=b+a/x_k$ і $d= a/x_k$ — певні постійні числа, причому відношення c/d позначає клас точності вимірювального приладу.

Оскільки відносна, абсолютна і приведена похибки взаємопов'язані, то, знаючи одну з них, легко визначити інші.

Для засобів з рівномірною шкалою, якщо їхня допустима приведена основна похибка встановлюється виразом (3.3), клас точності позначається числом, що визначає границі допустимої приведеної основної похибки, вираженої у відсотках. Наприклад, якщо $\gamma=\pm 1,5\%$ в документації вказують «клас точності 1,5», а на засобі вимірювання - цифру 1,5.

Якщо границі допустимої відносної похибки визначаються за формулою (3.2), наприклад $\delta = \pm 0,5\%$; то позначення в документації - «клас точності 0,5», на приладі - $\textcircled{0,5}$.

Якщо границі допустимої відносної похибки визначаються у % за формулою (3.6), наприклад: $\delta = \pm [0,02 + 0,01(|x_k/x| - 1)]$; то позначення в документації - «клас точності 0,02/0,01», на приладі - 0,02/0,01.

До приладів, клас точності яких виражається дробом, належать цифрові прилади, а також мости і компенсатори як з ручним, так і з автоматичним урівноваженням.

1.2 Характеристики вимірювальних приладів

Загальними характеристиками вимірювальних приладів є їхні похибки, варіація показів, чутливість до вимірюваної величини, споживана потужність, час встановлення показів і надійність.

Варіація показів — це найбільша різниця показів вимірювального приладу за одного і того ж самого значення вимірюваної величини. Варіація визначається при плавному підході стрілки до випробовуваної відмітки шкали під час її руху одного разу - від початкової, а другого разу - від кінцевої позначок шкали. Варіація показів характеризує ступінь стійкості показів вимірювального приладу за одних і тих самих умов вимірювання однієї і тієї ж самої величини. Варіація приблизно дорівнює подвоєній похибці від тертя, оскільки причиною варіації в основному є тертя в опорах рухомої частини вимірювального приладу.

Чутливістю вимірювального приладу до вимірюваної величини x називається похідна від переміщення вказівника a за вимірюваною величиною x :

$$S = da/dx = F(x) \quad (3.7)$$

Чутливість вимірювального приладу має розмірність, залежну від характеру вимірюваної величини, тому, коли користуються терміном «чутливість», говорять «чутливість приладу до струму», «чутливість приладу до напруги» тощо. Наприклад, чутливість вольтметра до напруги дорівнює 10 под./В.

Величина, що обернена чутливості, називається ціною поділки шкали (сталою) вимірювального приладу. Вона дорівнює числу одиниць вимірюваної величини, що приходяться на одну поділку шкали.

Під час приєднання приладу до вимірювальних кіл, що знаходяться під напругою, він споживає від них певну потужність. У більшості випадків ця потужність мала з погляду економії електроенергії. Але при вимірюванні в малопотужних колах в результаті споживання вимірювальними приладами потужності може змінитися режим роботи самих вимірювальних кіл, що призведе до збільшення похибки

вимірювання. Тому мале споживання потужності від вимірювальних кіл, в яких здійснюється вимірювання, є перевагою приладу.

Під **часом встановлення показів** вимірювального приладу розуміється проміжок часу, що пройшов з моменту підключення або зміни вимірюваної величини до моменту, коли відхилення показника від сталого значення не перевищує 1,5% довжини шкали. Час встановлення показів для більшості типів вимірювальних приладів із показниками у вигляді стрілки не перевищує 4 с.

Цифрові вимірювальні прилади характеризуються **часом вимірювання**, під яким розуміють час, що проходить від моменту змінення вимірюваної величини або початку циклу вимірювання до моменту отримання нового результату на відліковому пристрої з нормованою похибкою.

Під **надійністю** вимірювального приладу розуміють здатність його зберігати завдані характеристики за певних умов роботи протягом завданого часу. Якщо значення однієї або декількох характеристик вимірювального приладу виходить за межі завданих граничних значень, то говорять, що має місце відмова.

1.3 Теорія електромеханічних вимірювальних механізмів

Магнітоелектричні вимірювальні механізми. Робота магнітоелектричних вимірювальних механізмів (рис.3.2) заснована на взаємодії потоку постійного магніту і струму, що протікає котушкою (рамкою). Обертальний момент, що виникає при цьому, відхиляє рухому частину механізму відносно нерухомої. Залежно від того, який з вказаних елементів (постійний магніт або рамка) є рухомою частиною, розрізняють магнітоелектричні вимірювальні механізми з рухомою рамкою і з рухомим магнітом.

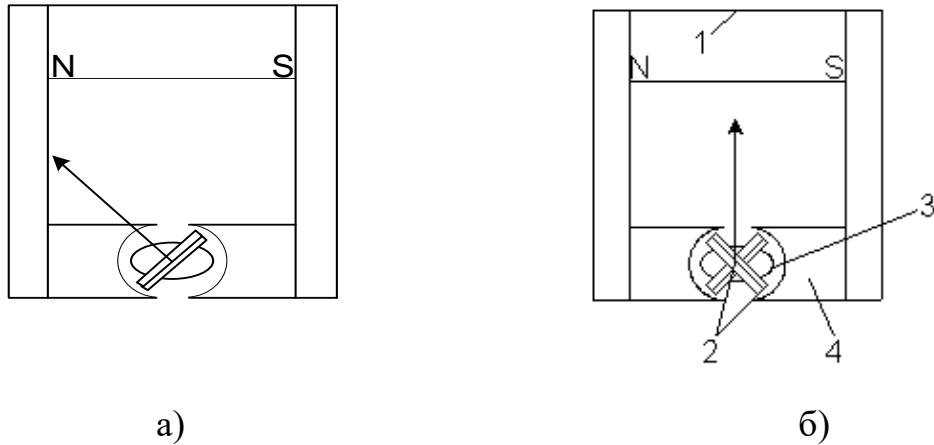


Рис. 3.2. Магнітоелектричний вимірювальний механізм: а – з механічним протидіючим моментом; б – з електричним протидіючим моментом (логометри): 1 – постійний магніт, 2 – рухома частина (дві жорстко закріплені на осі рамки); 3 – осердя, 4 – полюсні наконечники

Обертальний момент магнітоелектричного вимірювального механізму можна визначити за формулою:

$$M_{об} = dW_M / d\alpha = Id\psi / d\alpha, \quad (3.8)$$

де: $W_M = I\psi$ – енергія магнітного поля; I – струм, що протікає повз рамку; ψ – потокощеплення постійного магніту; $d\alpha$ – кут повороту рамки в радіальному магнітному полі.

Протидіючий момент пропорційний куту повороту рухомої частини α , тобто: $M_{пр} = -W\alpha$, де: W - питомий протидіючий момент, постійний для даного пристрою.

Стале відхилення рухомої частини визначається рівнянням: $M_{об} = -M_{пр}$ або: $\psi_0 I = W\alpha$, звідки:

$$a = \frac{\psi_0}{W} I = \frac{Bsw}{W} I \quad (3.9)$$

де: B – магнітна індукція; s – активна площа обмотки рамки; w – кількість витків обмотки.

Вважаючи $B=const$, з (3.9) робимо висновок, що вимірювальні прилади магнітоелектричного типу мають рівномірну шкалу.

Магнітоелектричні вимірювальні механізми можуть застосовуватися виключно на постійному струмі. Якщо обмоткою рамки пропустити змінний струм: $i = I_m \sin \omega t$, середнє значення якого за період дорівнює нулю, повороту рухомої частини не відбудеться.

Перевагами магнітоелектричних вимірювальних механізмів є велика чутливість, мале власне споживання потужності, малий вплив зовнішніх магнітних полів завдяки сильному внутрішньому магнітному полю, пряма пропорційність між струмом в обмотці рамки та кутом відхилення вказівника шкали.

Недоліками магнітоелектричних вимірювальних механізмів є складність конструкції, висока собівартість виготовлення, а також висока чутливість до перенавантажень, яка пов'язана з підведенням робочого струму до рамки повз стрункі струмопроводи.

Вимірювальні прилади магнітоелектричного типу характеризуються високим класом точності (до 0,1 включно) і застосовуються в якості амперметрів і вольтметрів постійного струму з границями вимірювань відповідно від наноампер до кілоампер, від мікрвольт до кіловольт.

Широке застосування знаходять логометричні магнітоелектричні механізми (рис. 3.2,б), в яких в колі постійного магніту 1 знаходиться рухома частина 2, що складається з двох жорстко закріплених на вісі рамок. При цьому на рамки діють моменти, які направлені в протилежні сторони (обертальний і протидіючий).

Електромагнітні вимірювальні механізми. Робота

електромагнітних механізмів заснована на взаємодії магнітного поля, що створюється нерухомою котушкою, обмоткою якої протікає вимірюваний струм, з одним або декількома феромагнітними осерддями, закріпленими на вісі. Найбільшого поширення набули електромагнітні вимірювальні механізми з плоскою (рис. 3.3,а) і круглою котушками, а також із замкнутим магнітопроводом (рис. 3.3,б).

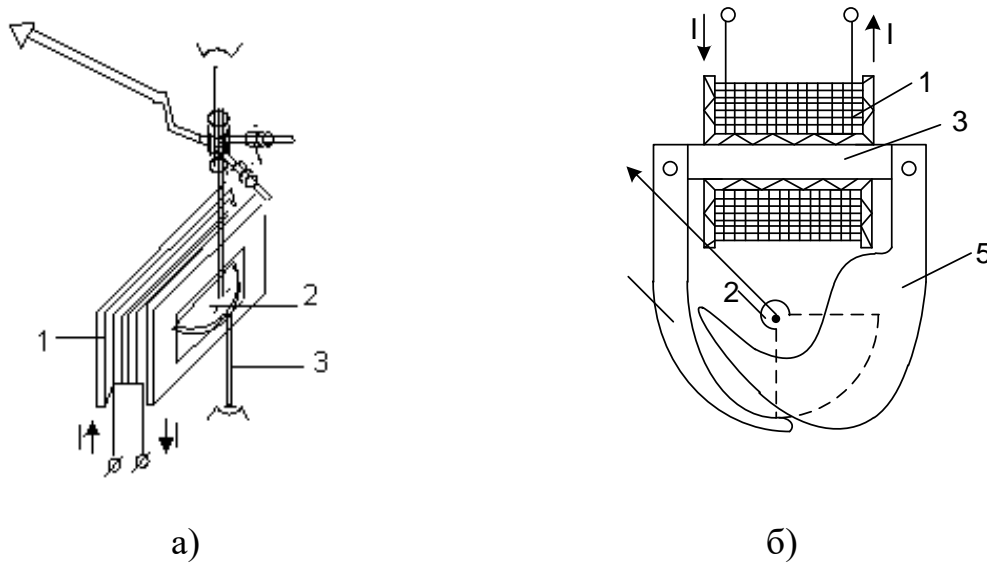


Рис. 3.3 Конструкція електромагнітного механізму: а – з плоскою котушкою: 1 - плоска нерухома катушка, 2 – осердя з пермалою, 3 – вісь; б - із замкнутим магнітопроводом: 1- катушка, 2 - рухоме осердя з магніто-м'якої сталі або пермалою, 3 – нерухомий магнітопровід, 4,5 – пара полюсних наконечників.

Під час протікання постійного струму котушкою електромагнітного вимірювального механізму виникає магнітне поле, яке, впливаючи на рухоме осердя 2, прагне розташувати його таким чином, щоб енергія магнітного поля була найбільшою:

$$W_M = \frac{1}{2} I^2 L \quad (3.10)$$

де: L — індуктивність котушки; I — струм в обмотці котушки.

При переміщенні рухомої частини змінюється індуктивність системи:

$$M = \frac{dW_M}{d\alpha} = \frac{1}{2} I^2 \frac{dL}{d\alpha}. \quad (3.11)$$

При протіканні обмоткою котушки змінного струму: $i = I_m \sin \omega t$ рухома частина, внаслідок інерційності, реагує на середнє значення обертового моменту:

$$M_{cp} = \frac{1}{2} \frac{dL}{d\alpha} \frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt = \frac{1}{2} \frac{dL}{d\alpha} I^2, \quad (3.12)$$

де: I — діюче значення змінного струму в обмотці котушки.

З умови статичної рівноваги: $M_{об} = -M_{пр}$, або:

$$\frac{1}{2} \frac{dL}{d\alpha} I^2 = W\alpha \quad (3.13)$$

можна отримати вираз для кута відхилення:

$$\alpha = \frac{1}{2W} \frac{dL}{d\alpha} I^2 \quad (3.14)$$

З (3.14) видно, що шкала вимірювального приладу електромагнітного типу нерівномірна, тобто між вимірюваною величиною (струмом) і кутом відхилення немає прямо пропорційної залежності. Вибором форми осердя вдається наблизити шкалу до рівномірної, починаючи з 15-20 % її кінцевого значення.

Покази вимірювальних приладів електромагнітного типу на постійному струмі різняться при зростаючих і спадаючих значеннях

струму. Ці відмінності обумовлені гістерезисом осердя, і в приладах, механізми яких мають осердя з електротехнічної сталі, складають 2-3%.

Недоліки електромагнітних вимірювальних механізмів: нерівномірна шкала, вплив зовнішніх магнітних полів на роботу механізмів без магнітопровода і велике власне споживання потужності.

Переваги електромагнітних вимірювальних механізмів: придатність до роботи на постійному та змінному струмі, стійкість до перевантажень струмом, простота конструкції, підвищена чутливість у вимірювального механізму із замкнутим магнітопроводом.

Завдяки зазначеним перевагам електромагнітні вимірювальні механізми використовуються в щитових амперметрах і вольтметрах класу точності 1,0 і нижче для виконання вимірювань в колах змінного струму.

Електродинамічні і феродинамічні вимірювальні механізми.

Робота вимірювальних механізмів електродинамічної системи (рис.3.4) заснована на взаємодії магнітних полів двох котушок із струмами: нерухомої 1 і рухомої 2. Рухома котушка укріплена на вісі або на розтяжках і може обертатися всередині нерухомої. При протіканні в обмотках котушок струмів I_1 і I_2 виникають електромагнітні сили, які намагаються повернути рухому частину таким чином, щоб магнітні потоки рухомої і нерухомої котушок співпали.

Енергія магнітного поля двох котушок із струмами I_1 та I_2

$$W_M = \frac{1}{2} L_1 I_1^2 + \frac{1}{2} L_2 I_2^2 + M_{12} I_1 I_2 \quad (3.15)$$

де: L_1, L_2 — індуктивності котушок; M_{12} — взаємна індуктивність між котушками. Обертальний момент:

$$M_{об} = \frac{dW_M}{d\alpha} = I_1 I_2 \frac{dM_{12}}{d\alpha}. \quad (3.16)$$

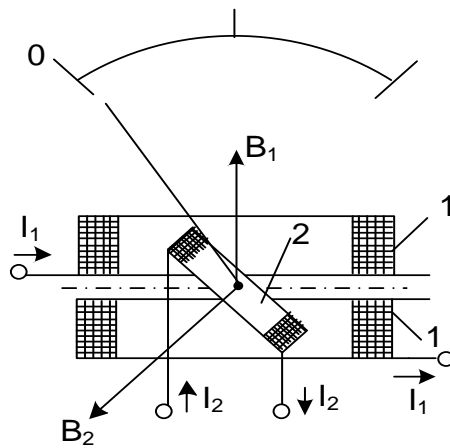


Рис. 3.4 Конструкція електродинамічного механізму:

1 – нерухома котушка, 2 – рухома котушка

При протіканні обмотками котушок змінних струмів: $i_1 = I_{1m} \sin \omega t$ та $i_2 = I_{2m} \sin(\omega t - \psi)$, рухома частина, внаслідок інерційності, реагує на середнє значення обертового моменту:

$$M_{об} = I_1 I_2 \cos \psi \frac{dM_{12}}{d\alpha} \quad (3.17)$$

де: I_1 і I_2 — діючі значення струмів; ψ — кут зсуву фаз між струмами в котушках.

Якщо протидіючий момент створюється пружними елементами, то для усталеного відхилення ($M_{об} = -M_{пр}$) отримаємо:

$$I_1 I_2 \cos \psi \frac{dM_{12}}{d\alpha} = W\alpha \quad (3.18)$$

звідки для механізму, що працює на змінному струмі:

$$a = \frac{1}{W} I_1 I_2 \cos \psi \frac{dM_{12}}{da} \quad (3.19)$$

Отже, характер шкали залежить від добутку: $I_1 I_2 \cos \psi$ та похідної: $\frac{dM_{12}}{da}$.

При протіканні котушками постійних струмів I_1 та I_2 :

$$\alpha = \frac{1}{W} I_1 I_2 \frac{dM_{12}}{d\alpha} \quad (3.20)$$

Основними перевагами вимірювальних приладів, побудованих на базі електродинамічних вимірювальних механізмів, є однакові покази на постійному та змінному струмі, що дозволяє градувати їхні шкали з високою точністю, а також стабільність показів в часі. Електродинамічні вимірювальні механізми не містять феромагнітних осердь.

Недоліки електродинамічних вимірювальних механізмів: невисока чутливість, велике власне споживання потужності, чутливість до перевантажень, залежність від впливу зовнішніх магнітних полів.

Вказані властивості електродинамічних вимірювальних механізмів дозволяють випускати на їхній базі лабораторні багатограничні вимірювальні прилади різного призначення високих класів точності 0,5; 0,2; 0,1 для вимірювань на постійному і змінному струмі.

Механізми **феродинамічної системи** відрізняються від розглянутих електродинамічних тим, що нерухома котушка має магнітопровід з магнітом'якого листового матеріалу (рис 3.5). Завдяки наявності магнітопроводу магнітний потік Φ , отже, обертальний момент істотно зростають, тому магніторушійна сила котушки може бути знижена і, отже, зменшено власне споживання вимірювальним механізмом потужності.

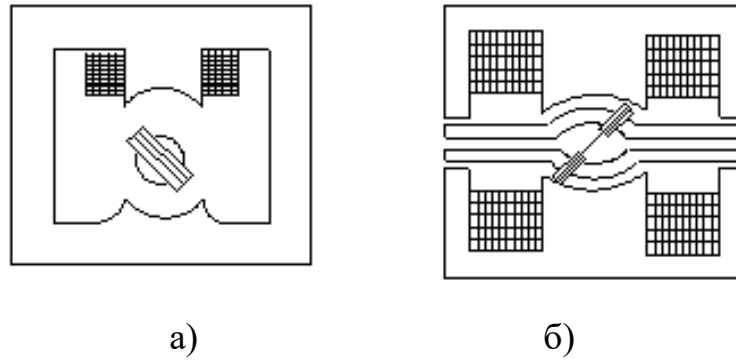


Рис. 3.5. Конструкція феродинамічних механізмів: а – однокотушкова;
б – двокотушкова

Рухома котушка у феродинамічних механізмах виконується безкаркасною, щоб уникнути появи в каркасі індукованих струмів. Протидіючий момент створюється пружинами. Власне магнітне поле у феродинамічних механізмах сильне, тому зовнішні магнітні поля на них впливають слабо. Крім того магнітопровід нерухомої катушки одночасно є екраном феродинамічного механізму.

Наявність осердя (нелінійного елемента) викликає виникнення похибок, обумовлених гістерезисом, вихровими струмами та іншими причинами. Не дивлячись на те, що у феродинамічних механізмах осердя набираються з пластин електротехнічної сталі або пермалою, які для зменшення похибок від вихрових струмів ізолюються, феродинамічні вимірювальні механізми менш точні, ніж електродинамічні.

Оскільки в повітряному зазорі, де переміщується рухома котушка, магнітне поле рівномірне та радіальне, то $\frac{dM_{12}}{d\alpha} = \text{const}$. Обертальний момент можна представити виразом:

$$M_{об} = cB_1I_2 \cos(B_1, I_2) \quad (3.21)$$

де: c - коефіцієнт, що визначається конструктивними параметрами вимірювального механізму та вибором системи одиниць.

Оскільки під час роботи механізму використовується лінійна ділянка кривої намагнічування матеріалу магнітопровода, то індукція B_1 пропорційна струму I_1 . Кутом зсуву фаз між B_1 і I_1 , що обумовлений втратами в матеріалі магнітопровода, нехтують. Таким чином, обертальний момент визначається за формулою:

$$M_{об} = c_1 I_1 I_2 \cos \psi \quad (3.22)$$

Звідки:

$$\alpha = \frac{c_1}{W} I_1 I_2 \cos \psi \quad (3.23)$$

Перевагами феродинамічних вимірювальних механізмів є менші, ніж у електродинамічних, чутливість до впливу зовнішніх магнітних полів і власне споживання потужності, великий обертаючий момент. Проте, їхня точність нижча, а частотний діапазон більш вузький в порівнянні з електродинамічними вимірювальними механізмами.

Вказані властивості вимірювальних приладів феродинамічного типу визначають область їхнього застосування — вони використовуються, як щитові і переносні прилади змінного струму, а також самописучі прилади (самописці).

Широке застосування знаходять електродинамічні і феродинамічні логометричні механізми різноманітних конструкцій і типів. На їхній основі виготовляються прилади для вимірювання кута зсуву фаз, частоти, ємності, індуктивності тощо.

Електростатичні вимірювальні механізми. В електростатичних вимірювальних механізмах (рис. 3.6) переміщення рухомої частини відбувається під впливом енергії електричного поля двох або декількох електрично заряджених провідників. Отже, в цьому механізмі, на відміну від механізмів інших систем, переміщення рухомої частини здійснюється

внаслідок дії безпосередньо прикладеної напруги. Тому головною галуззю застосування електростатичних механізмів є прилади, що вимірюють напругу, - вольтметри.

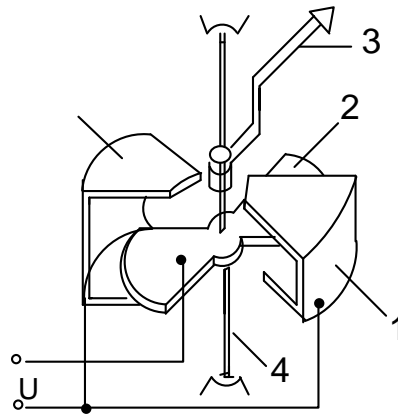


Рис 3.6 Електростатичний вимірювальний механізм:

- 1 – нерухомий електрод, 2 – рухомий сектороподібний електрод,
3 – вказівник, 4 – вісь вимірювального механізму

Переміщення рухомої частини у всіх конструкціях електростатичних вимірювальних механізмів пов'язане зі зміною ємності системи.

Поширення набули два види механізмів: зміна ємності в одних здійснюється за рахунок зміни активної площі електродів, а в інших — за рахунок зміни відстані між електродами. Перші застосовуються в щитових і переносних вольтметрах для вимірювання напруги в діапазоні від десятків до сотень вольт, другі — в щитових кіловольтметрах.

Під впливом підведеної до електродів напруги U створюється електричне поле. Сили електричного поля прагнуть повернути рухому частину таким чином, щоб енергія електричного поля:

$$W_e = \frac{1}{2} U^2 C, \quad (3.24)$$

де: C - ємність між рухомим і нерухомим електродами, була б найбільшою. Тобто, щоб рухомий електрод втягувався в простір між нерухомими електродами, обертаючи вказівник.

Обертальний момент електростатичного вимірювального механізму дорівнює:

$$M_{об} = dW_e/d\alpha = \frac{1}{2}CU^2/d\alpha \quad (3.25)$$

При змінній напрузі $u = U_m \sin \omega t$, що прикладена до електродів, рухома частина, внаслідок інерційності, реагуватиме на середнє за період значення обертального моменту:

$$M_{cp} = \frac{1}{2W} \frac{dC}{d\alpha} U^2 \quad (3.26)$$

де: U - діюче значення змінної напруги.

Вираз для кута повороту можна отримати з умови статичної рівноваги $M_{об} = -M_{пр}$:

$$\alpha = \frac{1}{2W} \frac{dC}{d\alpha} U^2 \quad (3.27)$$

Отже, кут повороту рухомої частини електростатичного вимірювального механізму пропорційний квадрату діючого значення напруги і множнику $dC/d\alpha$, тобто між вимірюваною величиною (напругою) і кутом відхилення немає прямо пропорційної залежності. Вибором відповідної форми електродів та їхніх розмірів забезпечують практично рівномірну шкалу в діапазоні 15-100 % верхньої межі вимірювань.

Переваги електростатичних вимірювальних механізмів:

- мале споживання на змінному струмі (на постійному струмі в сталому режимі дорівнює нулю);

- на роботу механізму практично не впливають температура, частота, форма кривої напруги, зовнішні магнітні поля;

- простота конструкції;













- мала вартість.

Недоліки електростатичних вимірювальних механізмів: мала чутливість; залежність від зовнішніх електричних полів, малий обертальний момент.

Зазначені властивості вимірювальних приладів електростатичного типу обумовлюють їхнє застосування в широкому частотному діапазоні в малопотужних колах, а також в колах високої напруги до сотень кіловольт.

Умовні позначення електровимірювальних механізмів приладів наведено в табл.3.1.

Таблиця. 3.1

Назва механізму	Умовне позначення	Назва механізму	Умовне позначення
Магнітоелектричний з рухомою рамкою		Електродинамічний	
Магнітоелектричний логотричного типу		Феродинамічний	
Магнітоелектричний з рухомим магнітом		Електродинамічний логотричного типу	
Електромагнітний		Феродинамічний логотричного типу	
Електромагнітний поляризований		Електростатичний	
Електромагнітний логотричного типу		Індукційний	

2 ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ

Під час виконання лабораторної роботи №4-5 застосовується вимірювальна установка, яка зображена на рис. 3.7.

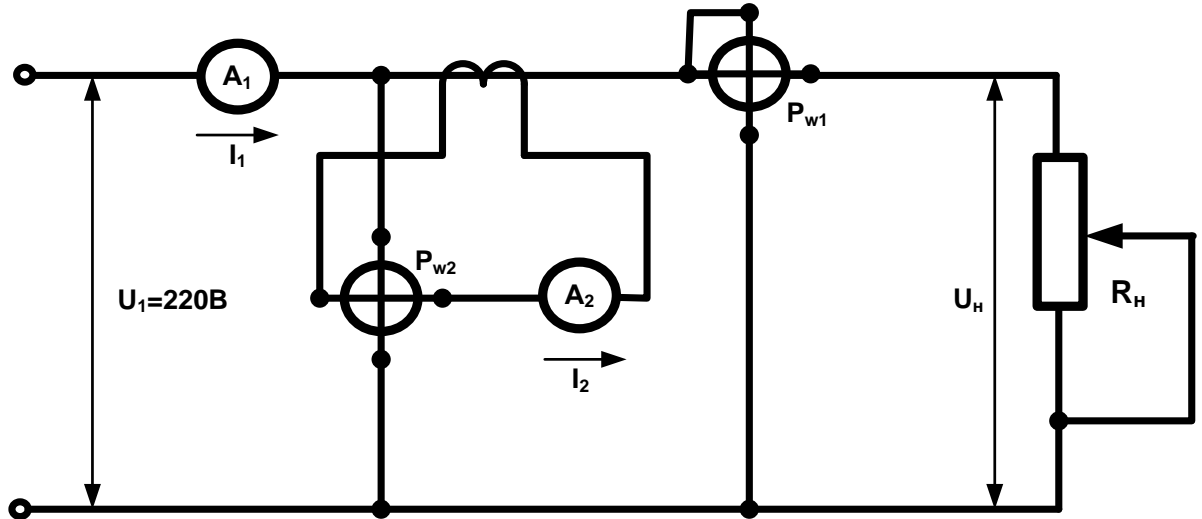


Рис 3.7. Схема вимірювальної установки

1. Проводяться вимірювання напруги U_H , струмів I_1 , I_2 та потужностей P_1 і P_2 в однофазному колі в наступному порядку:

1.1. У початковому стані лабораторної установки лінійний автотрансформатор (ЛАТР) виведено «на нуль» - вихідна напруга дорівнює «0»; опір навантажувального реостата максимальний - реостат повністю введений.

1.2. Після подачі на ЛАТР напруги 220 В за допомогою ЛАТР виставляють перше значення вторинної напруги, приблизно 15 В або 20 В, яке контролюється за допомогою вольтметра $U_{вх}$. Знімають покази приладів U_H , I_1 , I_2 , P_1 , P_2 . Потім, послідовно виводячи опір навантажувального реостата таким чином, щоб решта діапазону зміни струму I_1 від значення в першій точці до максимального, що дорівнює 1 А, була розділена на п'ять приблизно однакових інтервалів, знімають покази приладів ще в п'яти точках.

1.3. Знову вводять максимальний опір реостата, за допомогою ЛАТР встановлюють вхідну напругу вимірювальної схеми приблизно на 10 В більшу (≈ 25 В або ≈ 30 В) і проводять вимірювання в п'яти точках в послідовності, аналогічній п.п. 1.2.

1.4. Аналогічні вимірювання проводять ще для трьох фіксованих вхідних напруг, які отримують, збільшуючи кожне попереднє значення напруги приблизно на 10 В.

1.5. У процесі виконання вимірювань в табл. 3.2 записують: а) ціни поділок шкал приладів (постійні приладів «С») на різних границь вимірювань; б) число поділок «N» (з частками поділів застосовуючи інтерполяцію положення вказівника на шкалі приладу), на які відхиляються стрілки приладів. Значення вимірюваних величин розраховуються за числами «N» і цінами поділок шкал «С» під час обробки результатів.

Форма таблиці 3.2

№ спостереження	$U_{вх}$	U_n		I_1		I_2		P_1		P_2	
	В	С	N	С	N	С	N	С	N	С	N
1											
2											
3											
4											
5											
6											

2. Гранично допустимі значення відносних похибок вимірювальних приладів, розраховують, виходячи з класів точності приладів, границь вимірювань і значень виміряних величин U_n, I_1, I_2, P_1, P_2 :

$$\delta x_{i(зр)} = \gamma_{пр.х} \times \frac{x_{\max}}{x_i}, \quad (3.28)$$

де: x_{\max} – верхні границі вимірювань вимірювальних приладів; x_i – значення вимірюваної величини x в i -й точці експерименту; $\delta x_{i(гр)}$ - гранично допустимі значення відносних похибок вимірювального приладів; $\gamma_{пр.х}$ - приведені похибки приладів, що дорівнюють їхнім класам точності у %.

Результати розрахунків записати в табл. 3.3. Виконувати розрахунки, заповнювати таблиці, будувати графіки рекомендується в Microsoft Excel.

Форма таблиці 3.3

№ п/п	$U_{ні}$	$\delta U_{ні}$ (гр)	I_{1i}	I_{1i} (гр)	I_{2i}	I_{2i} (гр)	P_{1i}	P_{1i} (гр)	P_{2i}	P_{2i} (гр)	$P_i = U_{ні} \times I_{1i}$	P_i (гр)	P_i (гр, квад)
	В	%	А	%	А	%	Вт	%	Вт	%	Вт	%	%
1													
2													
3													
4													
5													
6													

3. За даними табл. 3.3 в Microsoft Excel побудувати графіки змінення гранично допустимих похибок використаних в експерименті вимірювальних приладів: $\delta U_{ні(гр)} = f(U_{ні})$; $\delta I_{1i(гр)} = f(I_{1i})$; $\delta I_{2i(гр)} = f(I_{2i})$; $\delta P_{1i(гр)} = f(P_{1i})$; $\delta P_{2i(гр)} = f(P_{2i})$.

4. За даними табл. 3.3 розрахувати значення опосередковано вимірюваної потужності і гранично допустимі похибки цих вимірювань:

$$P_i = U_{ні} \times I_{1i}; \delta P_{i(зр)} < \delta U_{ні(зр)} + \delta I_{1i(зр)}; \quad (3.29)$$

$$\delta P_{i(зр,квад)} = \sqrt{(\delta U_{ні(зр)})^2 + (\delta I_{1i(зр)})^2}. \quad (3.30)$$

Результати розрахунків занести в табл. 3.3. Побудувати графіки: δP_i
 $(зр) = f[P_i = U_{ni} \times I_{li}]$; $\delta P_i(зр,квад.) = f[P_i = U_{ni} \times I_{li}]$.

5. Розрахувати дійсні значення коефіцієнта трансформації трансформатора струму (умовно вважаємо, що струми в первинній та вторинній обмотках виміряні точно):

$$K_{i\phi} = I_{1i} / I_{2i} . \quad (3.31)$$

6. Розрахувати значення похибки струму трансформатора струму для всіх вимірних струмів:

$$\gamma_{1,i} = \frac{K_n - K_{i,\phi}}{K_{i,\phi}} \times 100\% , \quad (3.32)$$

де: $K_n = I_{1н} / I_{2н}$ - номінальне значення коефіцієнта трансформації трансформатора струму.

Результати розрахунків п.5. - 6. записати в табл. 3.4.

Форма таблиці 3.4

№ спостереження	$K_{i\phi}$	$g_{1,i}$	$\delta K_{\phi,i}$
1			
2			
3			
4			
5			
6			

7. Побудувати графік зміни похибки струму в залежності від відносного значення (до номінального струму) струму вторинної обмотки:

$$g_{I,i} = F(I_{2,i} / I_{2H}) \quad (3.33)$$

8. Розрахувати граничні значення відносної похибки **коефіцієнта трансформації трансформатора струму**, що зумовлені **допустимими похибками амперметрів**:

$$\delta K_{\phi,i} = \sqrt{(\delta I_{1,i})^2 + (\delta I_{2,i})^2} . \quad (3.34)$$

Результати занести до табл. 3.4.

3 КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Похибки засобів вимірювань.

2. Клас точності засобів вимірювань.

3. Характеристики вимірювальних приладів.

4. Класифікація електромеханічних вимірювальних механізмів.

5. Магнітоелектричні вимірювальні механізми: конструкція, принцип дії, обертальний момент, протидіючий момент вимірювального механізму традиційного типу, протидіючий момент вимірювального механізму логометричного типу, кут повороту, переваги та недоліки, галузь застосування.

6. Електромагнітні вимірювальні механізми: конструкція, принцип дії, обертальний момент, протидіючий момент вимірювального механізму традиційного типу, протидіючий момент вимірювального механізму логометричного типу, кут повороту, переваги та недоліки, галузь застосування.

7. Електродинамічні вимірювальні механізми: конструкція, принцип дії, обертальний момент, протидіючий момент вимірювального механізму традиційного типу, протидіючий момент вимірювального механізму логометричного типу, кут повороту, переваги та недоліки, галузь застосування.

8. Феродинамічні вимірювальні механізми: конструкція, принцип дії, обертальний момент, протидіючий момент вимірювального механізму традиційного типу, протидіючий момент вимірювального механізму логометричного типу, кут повороту, переваги та недоліки, галузь застосування.

9. Електростатичні вимірювальні механізми: конструкція, принцип дії, обертальний момент, кут повороту, переваги та недоліки, галузь застосування.

Лабораторна робота №6

Вимірювання активної електричної енергії за допомогою однофазного індукційного лічильника електроенергії

Мета роботи – ознайомлення з конструкцією, принципом дії та схемою підключення однофазного індукційного лічильника електричної енергії до електричної мережі.

1 ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

1.1 Призначення лічильників електроенергії

Електричні лічильники застосовуються для вимірювання електричної енергії в колах змінного та постійного струму, а також для вимірювання кількості електрики в колах постійного струму.

Лічильники є інтегруючими, тобто підсумовуючими приладами, оскільки вимірюють енергію або кількість електрики за проміжок часу з безперервно зростаючими показами.

У лічильниках змінного струму застосовується індукційний вимірювальний механізм, а в лічильниках постійного струму - електродинамічний. Лічильники кількості електрики можуть бути електромеханічними з магнітоелектричним вимірювальним механізмом або електрохімічними (електролітичні лічильники).

За родом вимірюваної величини електричні лічильники поділяються на лічильники активної (кВт· год), реактивної (квар· год) і повної енергії (кВА· год), а також лічильники кількості електрики (А· год).

Індукційні лічильники активної енергії змінного струму відповідно ГОСТ 6570-96 поділяються на класи точності: 1,0; 2,0; 2,5, а лічильники реактивної енергії – на класи точності: 2,0; 3,0.

Лічильники енергії постійного струму відповідно ГОСТ 10287-83 поділяються на класи точності: 1,5; 2,6; 3,0, а лічильники кількості енергії – на класи точності: 0,5; 1,0; 1,5; 2,5.

За типом підключення всі лічильники поділяють на лічильники прямого ввімкнення, які включаються безпосередньо у струмопровід, та лічильники трансформаторного ввімкнення, що підключаються до струмопроводу через вимірювальні трансформатори струму. Останні також можуть підключатися колами напруги до електричної мережі через вимірювальні трансформатори напруги в разі застосування їх для вимірювання електроенергії у високовольтних електричних мережах напругою більше за 0,4 кВ.

За вимірюваними величинами лічильники електроенергії поділяють на однофазні і трифазні. Всі сучасні трифазні лічильники підтримують однофазний облік електроенергії.

1.2 Конструкція та принцип дії однофазного індукційного лічильника електроенергії

Основні елементи вимірювального механізму однофазного індукційного лічильника електроенергії наведено на рис.4.1. Однофазний індукційний лічильник електроенергії містить: тристрижневий Ш-подібний електромагніт 1 з обмоткою напруги 2, яка має велику кількість витків і виконана струнким дротом; двострижневий П-подібний електромагніт 3 з обмоткою струму 4, яка має невелику кількість витків і виконана дротом великого перетину; алюмінієвий диск 5, що жорстко закріплений на вісі 6, сталева скоба 7, постійний магніт 8 та лічильний механізм. Обмотка 2 вмикається паралельно вимірюваному колу, а обмотка 4 – послідовно із струмоприймачами, що утворюють навантаження лічильника.

Струм I_1 , що протікає обмоткою 4, утворює магнітний потік Φ_1 , який двічі перетинає алюмінієвий диск 5. Струм I_U що протікає обмоткою напруги 2, утворює магнітний потік, робоча частина якого Φ_2 також перетинає диск 5, замикаючись через сталеву скобу 7.

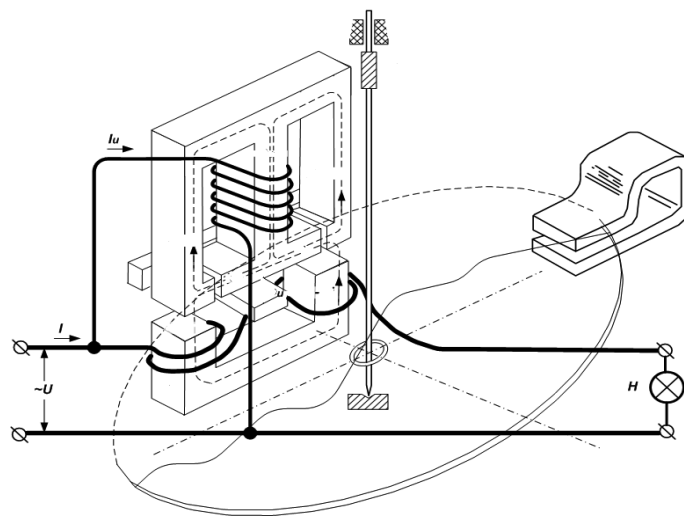
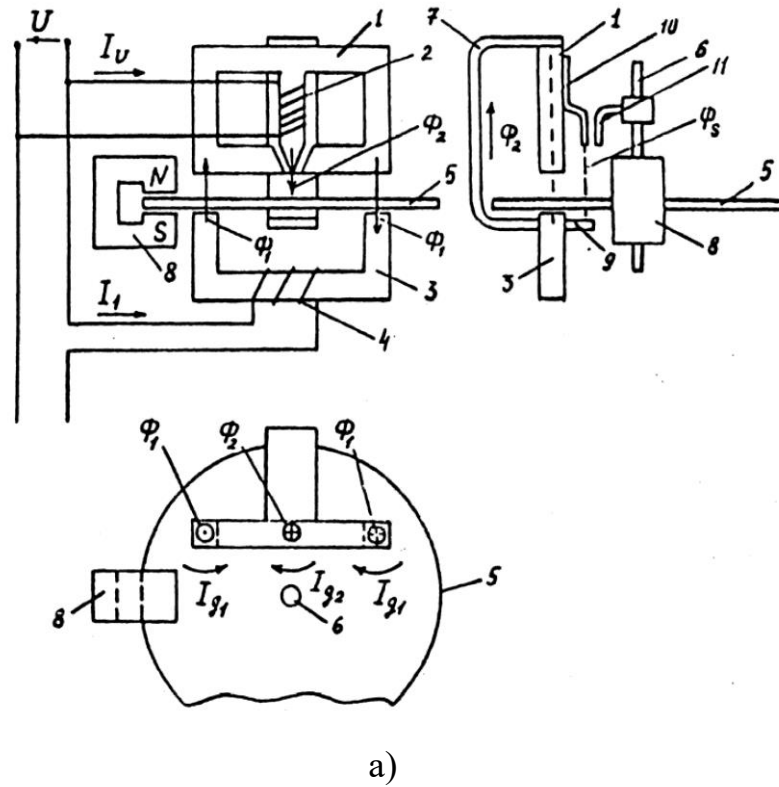


Рис. 4.1. Однофазний індукційний лічильник електроенергії:
а- конструкція, б – зовнішній вигляд вимірювального механізму

Струм I_1 і напруга U , що прикладена до обмотки напруги, зсунуті за фазою на кут φ , значення якого визначається характером навантаження (рис. 4.2). Оскільки магнітопровід електромагніта 1 з паралельною обмоткою 2 майже замкнутий, завдяки великій індуктивності обмотки 2 струм I_0 у ній відстає за фазою від напруги U на кут близький до 90° . Магнітні потоки Φ_1 і Φ_2 збігаються за фазою із струмами, що їх викликали, якщо знехтувати втратами на гістерезис і вихрові струми в сердечниках електромагнітів.

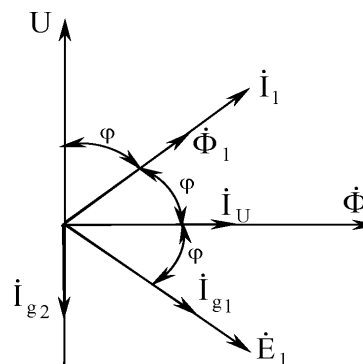


Рис. 4.2. Векторна діаграма однофазного індукційного лічильника електроенергії

Змінні потоки Φ_1 і Φ_2 індукують в алюмінієвому диску е.р.с. E_1 і E_2 , що відстають за фазою від цих потоків на 90° . е.р.с. E_1 і E_2 викликають у диску струми I_{g1} та I_{g2} , які можна вважати такими, що співпадають за фазою з е.р.с., які їх викликали.

Таким чином, алюмінієвий диск перетинає два магнітних потоки: Φ_1 і Φ_2 , що не збігаються в просторі і мають фазовий зсув. Струми, що виникають при цьому в диску, взаємодіючи із магнітними потоками, утворюють обертальний момент: $M = k'\Phi_1\Phi_2 \sin\psi$, де: k' - сталий коефіцієнт; ψ - кут між векторами Φ_1 і Φ_2 .

Для створення гальмівного моменту та забезпечення рівномірної кутової швидкості диска з різним навантаженням слугує постійний магніт

8. Під час обертання диска поле постійного магніту індукуює в ньому вихрові струми, які відповідно до закону Ленца протидіють обертанню диска; причому $M = M_G$.

Взаємодія магнітного потоку Φ_1 з наведеними в диску магнітним потоком Φ_2 вихровими струмами з одного боку, і взаємодія магнітного потоку Φ_2 з наведеними в диску магнітним потоком Φ_1 вихровими струмами, з іншого боку, викликають електромагнітні сили, які спрямовані по хорді диска і утворюють обертальний момент.

Миттєве значення обертального моменту $m_\omega(t)$ від взаємодії потоку $\Phi_{1t} = \Phi_{1m} \sin \omega t$ з вихровими потоками $i_{22}(t) = I_{m22} \sin(\omega t - Q)$ тоді $m_\omega(t) = k_1 \Phi_{1t} i_{22}(t)$. Обертальний момент за період $M_{o61} = k_1 \Phi_1 I_{22} \cos(\Phi_1 I_{22})$. Для середнього значення обертального моменту, утвореного Φ_{2t} та I_{12} , отримаємо аналогічний вираз $M_{o62} = k_2 \Phi_2 I_{12} \cos(\Phi_2 I_{12})$. Результуючий обертальний момент дорівнює: $M_{o6} = | M_{o62} | + | M_{o61} |$.

1.3 Самохід лічильника

За наявності напруги в паралельній обмотці і відсутності струму в послідовній диск лічильника може безперервно обертатись. Це паразитне явище, що виникає внаслідок перевищення компенсаційного моменту над тертям, називають *самоходом* лічильника.

Для компенсації моменту тертя у лічильнику передбачено спеціальні компенсуючі пристрої. Наприклад, на шляху робочого магнітного потоку встановлюють спеціальну пластинку, короткозамкнений виток або компенсаційний гвинт. Повна компенсація моменту тертя відбувається за навантаження лічильника понад 100% і номінальної напруги в електромережі. При роботі лічильника без навантаження компенсаційний момент може перевищити момент тертя, і диск під дією різниці цих моментів почне обертатися. Самохід лічильника особливо сильно проявляється при підвищеній нарузі в електромережі, наприклад, у

нічний час. У цьому випадку момент компенсації зростає, оскільки він залежить від квадрату напруги.

За відсутності струму в послідовній обмотці і $U=80-110\% U_{ном}$ самохід повинен бути відсутнім. Для усунення самоходу до осі диску лічильника прикріплюють сталевий дріт (гачок) 11, а до паралельного електромагніту – сталеву пластинку (прапорець) 10 (рис.4.1.а). Під час обертання рухомої частини гачок притягується до прапорця, намагніченого потоками розсіювання паралельного електромагніту, що створює гальмівний момент. При цьому максимальна сила тяжіння прийде на момент проходження гачка повз прапорець. За вірно відрегульованого проміжку сила тяжіння між гачком і прапорцем зупинить диск і, тим самим, усуне самохід.

1.4 Передаточне число однофазного індукційного лічильника електроенергії

Для підрахунку кількості обертів диску в лічильнику встановлюють лічильний механізм. Число обертів диску, що приходить на одиницю облікованої лічильником енергії, називають передаточним числом лічильника. Воно вказується на щитку лічильника, наприклад: $1\text{кВт}\cdot\text{год}=1280$ обертів диску. Обернена величина до передаточного числа є номінальною сталою лічильника:

$$C_{ном} = \frac{3600 \cdot 1000}{1280} = 2812,5 \frac{\text{Вт}\cdot\text{с}}{\text{об}}$$

1.5 Похибка та методи повірки однофазного індукційного лічильника електроенергії

Похибка однофазного індукційного лічильника електроенергії залежить від режиму його роботи, тому державним стандартом похибка нормується за різних навантажень. Залежність похибки від навантаження називається навантажувальною кривою лічильника. Характер кривих за

навантажень 5-20% визначається впливом нерівності компенсаційного моменту і моменту тертя. За навантаження понад 20% спостерігається непропорційність між струмами і магнітними потоками в колах, а також вплив гальмівного моменту M_T , утворюваного послідовною обмоткою струму. Додаткові похибки виникають внаслідок спотворення коливань напруги, різкого перепаду потужності, що споживається навантаженням. За відносною похибкою та точністю обліку електроенергії лічильники поділяються на класи точності: 0,5; 1; 2; 2,5.

Лічильники електричної енергії підлягають повірці відповідно за ГОСТ 8.259-77, який передбачає повірку лічильників електричної енергії наступними методами:

- 1) метод ватметра та секундоміра, за якого визначають дійсне значення електричної енергії, що викликає обертання диска лічильника на завдану кількість обертів;
- 2) метод зразкового лічильника, за якого покази лічильника, що повіряється, порівнюють із показами зразкового лічильника.

1.6 Схема підключення однофазного індукційного лічильника електроенергії до електричної мережі

Ввімкнення однофазного індукційного лічильника електроенергії в електричний ланцюг здійснюється так само, як і ввімкнення одноелементного ватметра. На рис. 4.3 показано схему підключення однофазного індукційного лічильника електроенергії до електричної мережі: Г - генераторні затискачі; Н - затискачі навантаження.

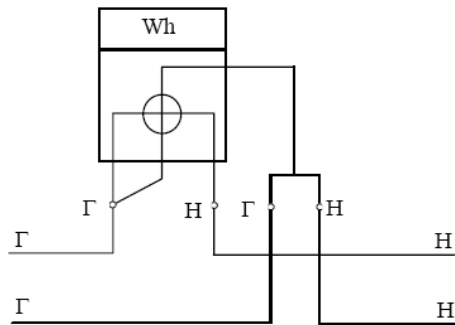


Рис. 4.3. Схема підключення однофазного індукційного лічильника електроенергії до електричної мережі

1.7 Основні переваги та недоліки вимірювальних приладів індукційного типу

Перевагою індукційного однофазного лічильника є те, що він здатний швидко та досить точно виміряти електроенергію. Недоліками є:

- залежність роботи приладів індукційного типу від зовнішніх факторів;
- тертя рухомої частини об повітря;
- небезпека виникнення самоходу.

1.8 Застосування однофазних індукційних лічильників для вимірювання та обліку електричної енергії

Метод одного приладу: якщо 3-фазна система симетрична, а фази навантаження з'єднані зіркою з допустимою нульовою точкою, то однофазний лічильник вмикають за відповідною схемою і вимірюють потужність однієї фази. Для знаходження всієї потужності покази потроюють.

Метод двох приладів: застосовують в симетричних трипровідних колах 3-х фазного струму, активну потужність визначають як арифметичну суму показів обох лічильників.

Метод трьох приладів: несиметричне навантаження вмикається зіркою з нульовим проводом. Повна потужність визначається сумою показань усіх лічильників.

2 ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ

Для перевірки однофазного індукційного лічильника СО методом ватметра-секундоміра застосовується схема рис. 4.4. В якості джерела живлення використовується ЛАТР, в якості навантаження – реостат.

1. Ознайомитись з приладами, що призначені для виконання лабораторної роботи. Записати їхні паспортні дані.

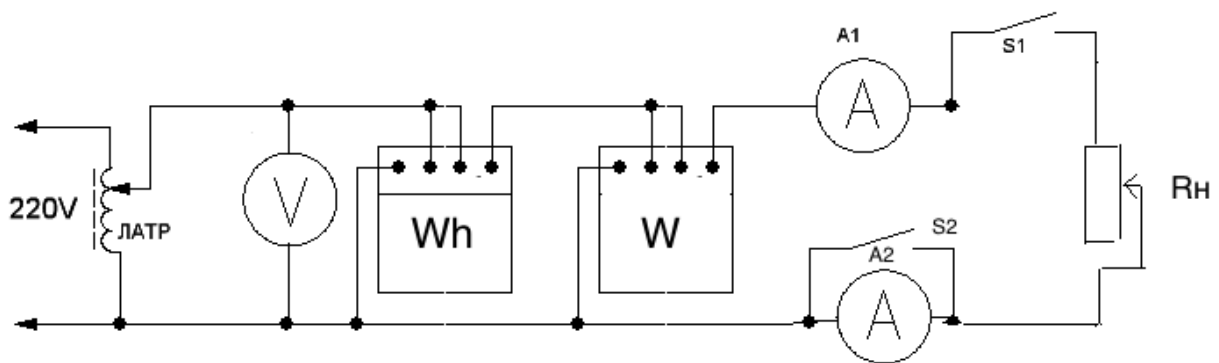


Рис. 4.4 Схема вимірювальної установки

2. При замкнених ключах $S1$ та $S2$ подати напругу на вимірювальну установку та, контролюючи вольтметром, встановити за допомогою ЛАТР номінальну напругу лічильника $U_{ном}$. Змінюючи навантаження R_n , встановити за амперметром $A1$ номінальний струм $I_{ном}$. Прогріти схему протягом 15 хвилин.

3. Перевірити лічильник Wh на відсутність самоходу. Для цього разімкнути ключ $S1$ та при $I = 0$ за вольтметром V за допомогою ЛАТР встановити напругу живлення лічильника Wh рівну $110\% U_{ном}$. Якщо при цьому диск лічильника не зробить більше, ніж один повний оберт, то самохід у лічильника відсутній.

4. Визначити поріг чутливості лічильника Wh . Для цього за допомогою ЛАТР за вольтметром V встановити $U_{ном}$ лічильника, ввімкнути ключ $S1$ та шляхом збільшення опору навантаження R_n отримати мінімально можливі покази амперметра. При цьому диск лічильника повинен бути нерухомим. Разомкнути ключ $S2$ та шляхом плавного зменшення опору навантаження R_n домогтися початку руху та безперервного обертання диска лічильника Wh . Внести у звіт значення струму $I_{пор}$ визначене за міліамперметром $A2$; замкнути ключ $S2$. Розрахувати значення струму $I_{пор}$ у відсотках від $I_{ном}$.

5. Підтримуючи напругу $U_{ном}$, за допомогою реостата при замкненому ключі $S2$ встановити струм $I=10\%$ від $I_{ном}$. За допомогою секундоміра виміряти час обертання диску лічильника Wh при здійсненні ним цілої кількості обертів N . Число N обирають таким чином, щоб час t був не меншим за 50-60 с. Визначення інтервалу проводити три рази. За виміряне значення t беруть середнє арифметичне значення трьох вимірювань. Зняти покази P зразкового ватметра W . Результати занести до табл. 4.1.

6. Для значень $I=20, 50, 75, 100\%$ від $I_{ном}$ провести вимірювання та записати результати відповідно до пункту 5.

7. Для кожного значення I розрахувати:

- спожиту електроенергію за показами ватметра та секундоміра:
 $W=P*t$;

- спожиту електроенергію за лічильником: $W_{ліч}=C_{ном}N$, де: $C_{ном}$ – номінальна стала лічильника: $C_{ном}=3600*1000/N_0$, де: N_0 – передаточне число лічильника, вказане на його щитку;

- відносну похибку лічильника: $\delta = (W_{ліч} - W)*100/W$.

Результати занести до табл. 4.1.

Форма таблиці 4.1

$I, \% \text{ від } I_{\text{ном}}$	$I, \text{ А}$	$P,$		$N, \text{ об}$	$t, \text{ с}$	$W, \text{ Вт с}$	$W_{\text{сч}}, \text{ Вт с}$	$\delta, \%$
		поділок	Вт					
10								
20								
50								
75								
100								

8. Використовуючи наявні в лабораторії виписки з ГОСТ 8.259-77, зробити висновок про відповідність отриманих в ході лабораторної роботи даних допустимим значенням відносних похибок однофазних лічильників.

3 КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Призначення лічильників електроенергії.
2. Конструкція однофазного індукційного лічильника електроенергії.
3. Класифікація лічильників електричної енергії.
4. Принцип дії однофазного індукційного лічильника електроенергії.
5. Обертальний момент однофазного індукційного лічильника електроенергії.
6. Передаточне число однофазного індукційного лічильника електроенергії.
7. Похибка та клас точності однофазного індукційного лічильника електроенергії.
8. Методи перевірки індукційних лічильників електроенергії.
9. Схема підключення однофазного індукційного лічильника електроенергії до електричної мережі.
10. Основні позитивні та негативні сторони вимірювальних приладів індукційного типу.
11. Застосування однофазних індукційних лічильників для вимірювання та обліку електричної енергії.

Лабораторна робота №7

Дослідження безперервних та дискретних електричних сигналів за допомогою осцилографа та частотоміра

Мета роботи: набути практичних навичок роботи із осцилографом і частотоміром у дослідженнях дискретних та безперервних електричних сигналів. Отримати досвід виконання вимірювань за допомогою осцилографа і частотоміра.

1 ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

1.1 Дискретні та безперервні фізичні величини

Дискретною (переривчастою) величиною називають таку фізичну величину, можливі значення якої являють собою скінченну або нескінченну послідовність чисел. Прикладом *дискретної величини* може слугувати можливе число очок під час кидання гральної кістки: 1; 2; 3; 4; 5; 6, або можливе число влучень стрільця в ціль зі ста пострілів: 0; 1; 2; 3; ...; 99; 100. Число можливих пострілів взагалі, а отже, число влучень в ціль необмежено, але проміжки між значеннями дискретних величин не заповнені. Під час кидання гральної кістки неможливе випадіння $4\frac{1}{2}$ або 5,3 очка, як не може бути 1,32 влучення в ціль.

Можливі значення *безперервних* фізичних величин заповнюють будь-який проміжок без жодних переривань. Прикладами *безперервних* фізичних величин можуть слугувати довжина відрізка, інтервал часу, діапазон зміни температури тощо. Межа між *дискретними* та *безперервними* величинами далеко не так чітко визначена, як це може здаватись на перший погляд. Дійсно, певна кількість води може розглядатись як величина *безперервна*. Але вода складається з окремих молекул, і її певна кількість може відрізнятись від іншої певної кількості

тільки на ціле число молекул. Якщо рахувати молекули, будь-яку кількість води слід було б розглядати як величину *дискретну*.

Більшість вимірюваних величин вважаються безперервними. Але в ряді випадків це пов'язано із недостатньою чутливістю засобів вимірювань, які не дають можливості виконувати вимірювання шляхом підрахунку окремих елементарних частинок, як в прикладі з визначенням кількості води. В інших випадках таке підвищення точності вимірювань не потрібне. Іноді безперевні величини представляються як дискретні, тобто такі, що змінюються рівними ступенями, і вимірюються шляхом підрахування числа ступенів, вважаючи похідну величину безперервною. В цьому випадку можна підвищувати точність вимірювань, зменшуючи розмір ступенів вимірюваної величини. Таке зменшення можливе до розмірів елементарних частинок вимірюваної величини, тобто до природньої дискретності величини.

1.2 Методи і засоби вимірювання частоти періодичних сигналів

Частота є одним з найважливіших параметрів змінної напруги і струму. Вона характеризує число циклів сигналу, що повторюються, в одиницю часу і може бути визначена як величина, обернена до тривалості періоду повторення сигналу: $f = 1/T$. Несталість значення частоти оцінюється її відносною нестабільністю, що визначається відношенням змінення частоти на інтервалі часу $t_2 - t_1$ до певного її миттєвого значення, вибраного на цьому інтервалі:

$$\delta f = [f(t_2) - f(t_1)]/f(t_1) = \Delta f/f. \quad (7.1)$$

Таким співвідношенням можна оцінити відносну похибку формування (або встановлення) частоти, а також похибку її вимірювання. При цьому значення f відобразить відхилення встановленого або виміряного значення частоти від її дійсного значення.

Реалізують наступні основні методи вимірювання частоти періодичних сигналів:

1) функціональний метод, заснований на використанні частотно-залежних кіл або пристроїв, вихідна напруга (або струм) яких функціонально пов'язана з частотою вхідного сигналу. Різновидом функціонального методу є резонансний метод вимірювання частоти, заснований на використанні резонансних властивостей коливальних контурів, що містять ємність або індуктивність;

2) метод порівняння, в основі якого лежить співставлення значення вимірюваної частоти і частоти деякого джерела, яке відіграє роль міри частоти. Метод знаходить свою реалізацію в гетеродинних частотомірах;

3) осцилографічний метод вимірювання частоти, заснований на використанні осцилографічних пристроїв, за допомогою яких можна спостерігати і вимірювати період сигналу, тобто величину обернену до частоти його повторення (коливання);

4) спектральний метод, що реалізується шляхом спектрального аналізу періодичних сигналів, дозволяє оцінити значення частот окремих сигналів;

5) метод дискретного підрахунку, в основі якого лежить визначення (підрахунок) числа циклів періодичного сигналу протягом деякого встановлюваного рахункового інтервалу часу. Метод дозволяє вирішувати і обернену задачу, тобто завдання вимірювання часових інтервалів шляхом визначення числа спеціально сформованих рахункових імпульсів на вимірюваному інтервалі часу. Метод дискретного підрахунку набув останнім часом значного поширення, що пояснюється передусім інтенсивним розвитком дискретних обчислювальних пристроїв і систем.

У вимірювальних приладах-частотомірах, призначених для вимірювання частоти періодичних сигналів, реалізуються, в основному, функціональний метод порівняння і метод дискретного підрахунку. У

відповідності з цим в техніці вимірювань знаходять застосування резонансні частотоміри типу Ч2, електроннолічильні частотоміри типу Ч3 і гетеродинні частотоміри типу Ч4. Остання група приладів знаходить обмежене застосування через широке використання в техніці вимірювань більш досконалих електроннолічильних частотомірів.

Найбільш поширеним засобом контролю частоти в електричних мережах є цифрові частотоміри. Слід зазначити, що частотоміри вимірюють власне частоту електричної напруги (струму), а не її відхилення.

1.3 Методи і засоби вимірювання напруги в електричній мережі

Вимірювання напруги в електричних мережах здійснюється за допомогою вольтметрів, що працюють за аналоговим або цифровим принципом. В цифровому вольтметрі вимірювання рівня напруги засноване на обробленні миттєвих значень напруги, виміряних у фіксовані моменти часу. У випадках, коли з достатнім ступенем точності сигнал може вважатися за синусоїдальний, доцільно використовувати алгоритм вимірювання за «вибірковими» миттєвими значеннями. Нехай сигнал напруги є синусоїдальним:

$$u(t) = U_{max} \sin(\omega t + \varphi_u) \quad (7.2)$$

де: $u(t)$ - миттєве значення напруги у момент часу t ; U_{max} - амплітудне значення напруги; φ_u - початкова фаза сигналу $u(t)$.

З усієї сукупності миттєвих значень сигналу $u(t)$ як «вибіркові» найзручніше брати окремі значення, що визначаються вимірюваною величиною. Так, під час вимірювання значення сигналу $u(t)$, що діє, як «вибірковий» можна вибрати момент часу $(\omega t + \varphi_u) = \pi/2$, де значення

сигналу максимальне. В цьому випадку вираз (7.2) можна записати у вигляді:

$$u(t) = U_{max} \sin(\pi/2) = U_{max}. \quad (7.3)$$

Враховуючи відоме співвідношення між діючим і максимальним значеннями для синусоїдального сигналу можна визначити діюче значення напруги:

$$U = \frac{u(t)}{\sqrt{2}} = \frac{U_{max}}{\sqrt{2}} \quad (7.4)$$

Проте на практиці синусоїдальна форма напруги мережі майже не зустрічається. Тому принцип дії цифрових вольтметрів, призначених для вимірювання діючих значень напруги в електричних мережах заснований на обробці скінченної кількості миттєвих значень, знятих впродовж періоду сигналу напруги. Значення діючого значення напруги в цьому випадку визначається за формулою:

$$U = \sqrt{\frac{\sum_{n=0}^N u^2(t_n)}{N}} \quad (7.5)$$

де: N - кількість миттєвих значень напруги (дискрет), знятих впродовж періоду сигналу T ; n - поточний номер дискрети, знятої у момент часу t_n .

Слід зазначити, що згідно теореми Котельникова частота дискретизації повинна не менше, ніж в два рази перевищувати частоту вищої гармоніки в спектрі цього сигналу. Оскільки на практиці несинусоїдальна напруга, зазвичай, має нескінченний спектр, добитися абсолютної точності при визначенні діючого значення напруги за

формулою (7.5) неможливо. Можна говорити лише про те, що чим більше число N , тим вище точність визначення діючого значення напруги.

Говорячи про технічні засоби, що застосовуються для контролю відхилень напруги в електричних мережах промислових підприємств, необхідно почати з вольтметрів. У мережах зі стабільними навантаженнями для цієї мети можуть використовуватися щитові прилади електромагнітної системи. Такі прилади зазвичай мають клас точності 3. Точніші результати можна отримати за допомогою цифрових вольтметрів, що мають похибку вимірювання не більше 0,25%. Крім того, вони дозволяють автоматизувати вимірювання і забезпечують реєстрацію результатів на зовнішніх носіях. Вимірювана напруга випрямляється і порівнюється із сигналом на виході генератора пилкоподібної напруги. Під час переходу пилкоподібної напруги через «нуль» запускається електронний лічильник імпульсів, зібраний на базі кварцевого генератора. За рівності випрямленої і пилкоподібної напруги лічильник імпульсів зупиняється, і відбувається зчитування імпульсів, кількість яких пропорційна вимірюваній напрузі.

Застосування цифрових вольтметрів практично виключає суб'єктивні помилки під час вимірювань і забезпечує полегшення і прискорення процесу вимірювань. Для проведення статистичного контролю відхилень напруги можуть застосовуватися самописні прилади, наприклад Н-339.

2 ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ

2.1 Порядок виконання лабораторної роботи

1. Виконати монтаж схеми вимірювань згідно рис.7.1.
2. Ввімкнути вимірювальні прилади: осцилограф С1-99, генератор сигналів Г1-112, частотомір ЧЗ-57, і дати їм прогрітися не менше 5 хвилин.

3. Користуючись засобом керування «установ.» добитися стійкого відображення обох променів на осцилографі.

4. Встановити на генераторі відтворення синусоїдального сигналу частотою 5 кГц.

5. Користуючись засобом керування «стабил.» добитися стійкого відображення синусоїдального сигналу на осцилографі. Виміряти амплітуду, період і частоту синусоїдального сигналу. Результати вимірювань занести до табл.7.1.

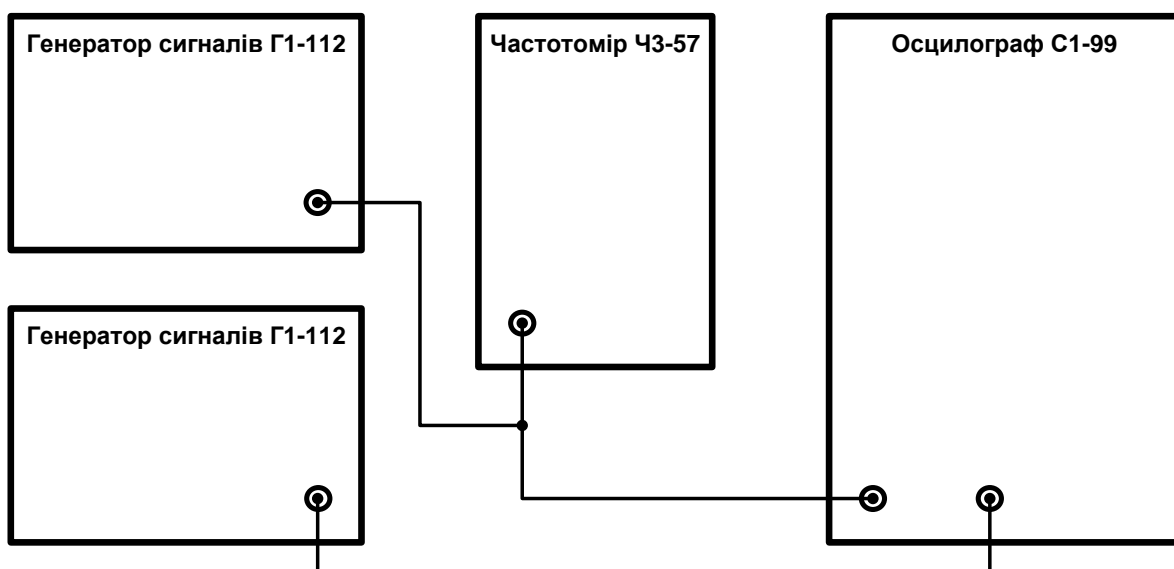


Рис.7.1. Дослідження безперервних та дискретних електричних сигналів за допомогою осцилографа. Схема лабораторної установки

6. Виміряти період і частоту синусоїдального сигналу за допомогою частотоміра. Результати вимірювань занести до табл. 7.1.

7. Повторити вимірювання на частотах 6, 7, 8, 9, 10 кГц. Результати вимірювань занести до табл 7.1.

8. Побудувати графіки вимірювань частоти синусоїдального сигналу, виконані за допомогою осцилографа і частотоміра.

Таблиця 7.1

Частота сигналу Г1-112, кГц	Амплітуда сигналу С1-99, В	Діюче значення сигналу С1-99, В	Період сигналу С1-99, мс	Частота сигналу С1-99, кГц	Частота сигналу ЧЗ-57, кГц	Примітки

9. Встановити на генераторі відтворення прямокутного сигналу частотою 5 кГц.

10. Користуючись засобом керування «стабил.» добитися стійкого відображення прямокутного сигналу на осцилографі. Виміряти амплітуду, період і частоту прямокутного сигналу. Визначити скважність прямокутного сигналу. Результати вимірювань занести до табл. 7.2.

11. Виміряти період і частоту прямокутного сигналу за допомогою частотоміра. Результати вимірювань занести до табл. 7.2.

12. Повторити вимірювання на частотах 6, 7, 8, 9, 10 кГц. Результати вимірювань занести до табл. 7.2.

13. Побудувати графіки вимірювань частоти прямокутного сигналу, виконані за допомогою осцилографа і частотоміра.

Таблиця 7.2

Частота сигналу Г1-112, кГц	Амплітуда сигналу С1-99, В	Період сигналу С1-99, мс	Скважність сигналу С1-99	Частота сигналу С1-99, кГц	Частота сигналу ЧЗ-57, кГц	Примітки

14. Встановити на генераторі відтворення синусоїдального сигналу частотою 5 кГц.

15. Включити другий генератор та встановити на ньому відтворення синусоїдального сигналу частотою 5 кГц.

16. Подати синусоїдальний сигнал від другого генератора на другий вхід осцилографа. Користуючись засобом керування «стабил.», добитися стійкого відображення обох синусоїдальних сигналів на осцилографі.

17. Виміряти різницю фаз між двома синусоїдальними сигналами, мс. Результати вимірювань занести до протоколу.

3 КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Дискретні та безперервні фізичні величини: дати визначення та пояснити різницю.
2. Чи завжди можна чітко визначити різницю між дискретною та безперервною фізичною величиною? Пояснити відповідь.
3. Методи вимірювання частоти.
4. Методи вимірювання напруги.

Лабораторна робота №8

Види вимірювань. Обробка експериментальних даних під час виконання спільних вимірювань

Мета роботи – ознайомлення з теоретичним матеріалом і отримання практичних навичок у вирішенні завдань інженерного аналізу й оброблення даних вимірювального експерименту.

1 ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

1.1 Види вимірювань

Вимірювання залежно від способу оброблення експериментальних даних для знаходження результату поділяють на *прямі, непрямі, спільні й сукупні*.

Прямі вимірювання – це ті, при яких значення вимірюваної величини знаходять безпосередньо з дослідних даних, що є оцінкою шуканої величини.

Приклад прямих вимірювань: вимірювання струмів, напруг, потужності відповідно амперметрами, вольтметрами, ватметрами.

Непрямі вимірювання – шукану величину знаходять за відомою залежністю між цією величиною й величинами, які вимірюють прямими способами. Значення вимірюваної величини одержують обчисленням із залежності $Y = F(x_1, x_2, \dots, x_n)$, де x_1, x_2, \dots, x_n – значення величин, отриманих прямими вимірюваннями.

Приклад непрямих вимірювань: вимірювання опору резистора методом «амперметра - вольтметра», коли струм через резистор і падіння

напруги на ньому вимірюються прямо, а шуканий опір обчислюється зі співвідношення $R = U/I$.

Сукупні вимірювання – одночасні вимірювання декількох *однойменних* величин, коли шукане значення величини визначають із розв’язку системи рівнянь, складених за результатами прямих вимірювань цих величин у різних поєднаннях, причому число поєднань визначає кількість рівнянь у системі, що, у свою чергу повинно дорівнювати числу невідомих величини, що вимірюється.

Приклад сукупних вимірювань: вимірювання кожного з трьох опорів, включених за схемою трикутника, який не можна «розібрати». Опори визначають, розв’язавши систему з 3-х рівнянь, складених на підставі вимірювань опорів між вершинами трикутника.

Спільні вимірювання – одночасні вимірювання декількох *неоднойменних* величин для знаходження залежності між ними.

Приклад спільних вимірювань: визначення залежності опору резистора від температури

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2). \quad (8.1)$$

Вимірявши опір резистора для 3-х різних температур t_1, t_2, t_3 , можна підставити значення $(R_{t_1}, t_1), (R_{t_2}, t_2), (R_{t_3}, t_3)$ у вираз (8.1) і одержати систему з трьох рівнянь відносно невідомих параметрів R_0, A і B . Щоб знайти ці параметри в залежності (8.1), необхідно розв’язати систему рівнянь. Але через те, що три пари значень $(R_{t_1}, t_1), (R_{t_2}, t_2), (R_{t_3}, t_3)$ вимірювалися лише по одному разу й містять неминучі похибки, параметри R_0, A і B будуть також містити похибки, обумовлені помилками у результатах одиничних вимірювань $(R_{t_1}, t_1), (R_{t_2}, t_2), (R_{t_3}, t_3)$.

1.2 Обробка даних експерименту в спільних вимірюваннях

1.2.1 Лінійна регресія. Розрахунок параметрів рівняння лінійної регресії

Щоб зменшити похибки у визначенні параметрів моделі процесу, виконують серію експериментів у кількості, що значно перевищує число невідомих параметрів (у нашому прикладі з температурною залежністю опору резистора число незалежних експериментів n повинно бути істотно більшим за три). Результатом серії з n експериментів є множина пар чисел (R_{ti}, t_i) , $i = 1, 2, \dots, n$. Далі на основі отриманих експериментальних даних підбираються такі значення невідомих параметрів R_0 , A і B , при яких функція (8.1) описувала набір експериментальних даних (R_{ti}, t_i) , $i = 1, 2, \dots, n$ з найбільшою точністю. На підставі розглянутого прикладу можна сформулювати завдання визначення невідомих параметрів залежностей між величинами, що спостерігаються (вимірюються), в такий спосіб:

У процесі розроблення інженерних моделей різних процесів і явищ, що підлягають дослідженню, можна виділити завдання визначення параметрів деякої напівемпіричної моделі, що описує зв'язки між величинами, які характеризують процес або явище, на основі заданої сукупності експериментальних даних. Вибір значень параметрів моделі здійснюється таким чином, щоб критерій якості опису даних, отриманих в експерименті, мав би найкраще значення при описі даних за допомогою саме цієї моделі. У завданнях вимірювання природно очікувати, щоб опис експериментальних даних, отриманий за допомогою моделі, мав мінімальні похибки. Найчастіше на практиці використовується міра якості (критерій) опису експериментальних даних, що визначається так званим *критерієм найменших квадратів*, відповідно до якого потрібно мінімізувати функцію:

$$L(C_1, C_2, \dots, C_m) = \sum_{i=1}^n [y_i - f(x_i, C_1, C_2, \dots, C_m)]^2, \quad (8.2)$$

де: m – число невідомих параметрів функції $f(x_i, C_1, C_2, \dots, C_m)$, які потрібно визначити; n – число незалежних експериментів, причому $n \gg m$; C_1, C_2, \dots, C_m - невідомі параметри; y_i – вимірювані значення величини y , які, теоретично описуються функцією $f(x_i, C_1, C_2, \dots, C_m)$.

Для кращого розуміння й засвоєння матеріалу розглянемо лінійну модель процесу $f(x_i, C_1, C_2)$, що має тільки два невідомих параметри: C_1, C_2 . Функція $L(C_1, C_2, \dots, C_m)$ – критерій, який потрібно мінімізувати, також представляється виразом (8.2), але в ньому приймаємо $m = 2$.

Проведемо експеримент з дослідження залежності фізичної величини y від величини x . Априорно відомо, що y і x пов'язано залежністю виду:

$$y = f(x, C_1, C_2), \quad (8.3)$$

де: $f(x, C_1, C_2)$ - відома функція; C_1 і C_2 – невідомі параметри.

Наприклад:

$$y = C_1 x + C_2 \quad (8.4)$$

Потрібно визначити, ґрунтуючись на даних експерименту, найбільш ймовірні значення параметрів C_1 і C_2 , якщо зроблено n незалежних дослідів і отримано n експериментальних точок y_i .

Згідно (8.2) функція $L(C_1, C_2)$ являє собою суму квадратів відхилень вимірюваних значень y_i від значень функції (8.3) у точках x_i і показує, наскільки точно вибрана модель описує наявні дані. Оскільки всі суми у правій частині виразу (8.2) позитивні, то сума $L(C_1, C_2)$ може дорівнювати нулю в єдиному випадку: коли всі доданки дорівнюють нулю. А це означає, що в цьому випадку всі вимірювані значення y_i точно збігаються з лінією графіка теоретичної функції – моделі (8.4). Таке було б можливо, якщо, по-перше, модель ідеально відображає реальний процес; по-друге,

параметри C_1 і C_2 знайдені правильно й забезпечують точний опис експериментальних даних; по-третє, обмірювані пари значень (y_i, x_i) не містять похибок. Останнє неможливо в принципі, тому можна спробувати знайти лише мінімум функції $L(C_1, C_2)$. Цей мінімум знаходять відомим способом, прирівнюючи частинні похідні функції $L(C_1, C_2)$ за параметрами C_1 і C_2 нулю. У результаті одержують систему рівнянь відносно невідомих параметрів C_1 і C_2 :

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n [y_i - f(x_i, C_1, C_2)] \left(\frac{\partial f}{\partial C_1} \right)_{x_i} = 0; \\ \sum_{i=1}^n [y_i - f(x_i, C_1, C_2)] \left(\frac{\partial f}{\partial C_2} \right)_{x_i} = 0, \end{cases} \quad (8.5)$$

де: $\left(\frac{\partial f}{\partial C_i} \right)_{x_i}$ - значення частинної похідної функції $f(x_i, C_1, C_2)$ за параметром C_i у точці x_i .

З урахуванням (8.4) величини:

$$\left(\frac{\partial f}{\partial C_1} \right)_{x_i} = x_i; \quad \left(\frac{\partial f}{\partial C_2} \right)_{x_i} = 1 \quad (8.6)$$

Підставивши в (8.5) вираз (8.4) для $f(x_i, C_1, C_2)$, а також (8.6), після нескладних перетворень одержимо систему так званих нормальних рівнянь:

$$\begin{cases} C_2 n + C_1 \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n y_i; \\ C_2 \sum_{i=1}^n x_i + C_1 \sum_{i=1}^n x_i^2 = \sum_{i=1}^n x_i y_i. \end{cases} \quad (8.7)$$

Розв'язки системи лінійних рівнянь (8.7) відносно невідомих C_1 і C_2 є оцінками сталих C_1 і C_2 у виразі (8.4), що у подібних завданнях ще називають лінійним рівнянням регресії для отриманих в експерименті даних. Ці розв'язки мають вигляд:

$$C_1 = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\Delta}, \quad (8.8)$$

$$C_2 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i y_i}{\Delta}, \quad (8.9)$$

де: Δ - головний визначник системи (8.7),

$$\Delta = n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2. \quad (8.10)$$

1.2.2 Оцінка похибки у вимірюваннях величини Y

Потрібно пам'ятати, що вимірювані значення y_i величини Y у розглянутому вище експерименті є *різними за величиною* (оскільки вимірюються для різних значень x_i незалежної величини X , що визначає величину Y), а не є результатами повторних багаторазових вимірювань того самого значення Y . Значення y_i по суті є результатами одноразових вимірювань величини, що змінюється, Y . Тому неможливо оцінити надійність цих результатів, досліджуючи розкид у їх значеннях за допомогою звичайних статистичних характеристик (середнього значення, середньоквадратичної помилки, дисперсії). Проте важливо знати, як обчислити похибку виміру величини Y , використовуючи лише дані експерименту.

У випадку передбачуваних лінійних залежностей Y від X (відповідно до моделі (8.4)) середньоквадратична похибка у вимірах y_1, y_2, \dots, y_n визначається з виразу:

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n (y_i - C_1 x_i - C_2)^2}, \quad (8.11)$$

де: C_1 і C_2 – оцінки параметрів лінійної моделі (8.4) – визначаються з виразів (8.8), (8.9); $(n - 2)$ у знаменнику під знаком кореня – число ступенів свободи, що залишилося після обчислення оцінок C_1 і C_2 .

1.2.3 Похибки в оцінках параметрів C_1 і C_2

Шукані похибки визначаються за формулами:

$$\sigma_{C_1} = \sigma_y \sqrt{\frac{n}{\Delta}}, \quad (8.12)$$

$$\sigma_{C_2} = \sigma_y \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{\Delta}}, \quad (8.13)$$

де: σ_y визначається з (8.11); Δ визначається з (8.10).

1.2.4 Окремий випадок нелінійної регресії, що зводиться до лінійного вигляду

Нехай завдана модель деякого процесу ступеневою функцією:

$$y = Ax^B. \quad (8.14)$$

Приклад залежності (8.14) - пряма вітка вольт-амперної характеристики напівпровідникового випрямного діода.

Потрібно визначити невідомі параметри A і B нелінійної моделі (8.14).

Щоб вирішити завдання, потрібно, задаючи й вимірюючи різні значення x_i незалежної змінної X , виміряти відповідні значення y_i змінної Y . Щоб скористатися засобами лінійного регресійного аналізу,

розглянутими вище, виконаємо перетворення виразу (8.14), прологарифмувавши його:

$$\ln y = \ln A + B \ln x \quad (8.15)$$

$$\text{Введемо позначення: } z = \ln y; t = \ln x; C_1 = B; C_2 = \ln A. \quad (8.16)$$

У результаті (8.15) з урахуванням (16) перетвориться до виду:

$$z = C_1 t + C_2. \quad (8.17)$$

Для моделі, яка описується виразом (8.17), справедливі всі формули (8.4) – (8.13). Щоб ними скористатися, потрібно для кожної пари обмірюваних значень (x_i, y_i) обчислити за формулами (8.16) відповідні пари (t_i, z_i) . Далі, підставивши їх замість x_i і y_i у формули (8.10), (8.8), (8.9), можна обчислити відповідно значення Δ , C_1 , C_2 . Потім, за формулами (8.11), (8.12) і (8.13), використовуючи вже знайдені Δ , C_1 , C_2 і обчислені t_i , z_i , слід визначити σ_z , σ_{c1} , σ_{c2} .

Після цих дій, коли будуть знайдені параметри C_1 , C_2 і похибки σ_z , σ_{c1} , σ_{c2} лінійної моделі (8.17), варто перейти до параметрів вихідної нелінійної моделі (8.14) і знайти її похибки. Для цього потрібно скористатися співвідношеннями переходу (8.16). Із цих співвідношень:

$$A = e^{C_2}; B = C_1; \text{ крім того, } y = e^z. \quad (8.18)$$

Тепер за знайденими раніше похибками σ_z , σ_{c1} , σ_{c2} , скориставшись співвідношеннями (8.18), можна знайти похибки нелінійної моделі:

$$\sigma_y = e^z \sigma_z; \sigma_A = e^{C_2} \sigma_{C_2}; \sigma_B = \sigma_{C_1}. \quad (8.19)$$

Вирази (8.19) отримані зі співвідношень (8.18) з урахуванням загального правила визначення похибки функції, а саме: якщо $y = f(x)$ і

відома похибка аргументу функції σ_x , то похибка самої функції $\sigma_y = (dy/dx)\sigma_x$.

2 ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ

2.1 Ознайомлення з теоретичним матеріалом, викладеним у розділі 1 методичних вказівок до виконання роботи.

2.2 Ознайомитися зі складом автоматизованого робочого місця, на якому виконується оброблення результатів вимірювального експерименту. Ознайомитися з інструкцією з уведення й обробки даних експерименту в середовищі Excel.

2.3 Вивчити вимірювальну схему для одержання даних, необхідних для побудови прямої вітки вольт-амперної характеристики діода. Визначити, які прилади потрібно вибрати, і скласти схему досліджень. Записати в табл. №1 технічні характеристики приладів (типи, класи точності, межі вимірювань, довжини робочих ділянок шкал, опори обмоток).

2.4 Скориставшись даними лабораторної роботи №1 (виміряними в шести точках напругами й струмами через резистор опором кілька кОм) визначити параметри рівняння лінійної регресії, що описує зв'язок вимірних значень напруг і струмів. Зробити висновки про те, як пов'язані коефіцієнт пропорційності в рівнянні регресії зі значенням опору резистора й опором амперметра у вимірювальній схемі. Порівняти результати дослідження з даними про номінальний опір резистора й результатами лабораторної роботи №1. Вихідні дані й результати розрахунків записати в таблицю №2. За допомогою засобів Excel побудувати графіки вихідної залежності й рівняння регресії, порівняти їх і зробити висновки.

2.5 Зняти вольт-амперну характеристику прямої вітки характеристики діода. Дані первинних вимірювань (струмів і напруг у схемі) записати в таблицю №3. На підставі вимірюваних значень напруг і струмів через діод і з урахуванням падіння напруги на опорі обмотки міліамперметра одержати значення падіння напруги на діоді. Внести виправлення в покази вольтметра. Дані про падіння напруги на діоді, необхідні для побудови вольт-амперної характеристики, занести також до табл. №3. Побудувати за отриманими у такий спосіб даними (вимірюваними з виправленням) вольт-амперну характеристику діода. За експериментальними даними розрахувати (за формулами п.п. 1.2.4) величини t_i і z_i , що є «вимірюваними» значеннями відповідно аргументу й функції – рівняння лінійної регресії (8.17) (див. п.п. 1.2.4.).

3 КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Навести класифікацію вимірювань залежно від способу оброблення експериментальних даних.
2. Визначити прямі вимірювання. Навести приклад.
3. Визначити непрямі вимірювання. Навести приклад.
4. Визначити сукупні вимірювання. Навести приклад.
5. Визначити спільні вимірювання. Навести приклад.
6. Що таке критерій найменших квадратів?
7. Як здійснюється розрахунок параметрів рівняння лінійної регресії.
8. Наведіть похибки в оцінках параметрів рівняння лінійної регресії.
9. Наведіть окремий випадок нелінійної регресії, що зводиться до лінійного вигляду.