

Головченко О.М., Співак О.Ю., Грумінська Л.В.

ТЕПЛОТЕХНІЧНІ ВИМІРЮВАННЯ ТА МЕТРОЛОГІЯ

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

О.М. Головченко, О.Ю. Співак, Л.В. Грумінська

Теплотехнічні вимірювання та метрологія

Затверджено Вченою радою Вінницького національного технічного університету як лабораторний практикум для студентів напрямку підготовки 0905 – “Енергетика”.

Протокол № 3 від “29” вересня 2005р.

Вінниця ВНТУ 2006

Рецензенти :

В.В. Кухарчук, доктор технічних наук, професор
В.О. Поджаренко, доктор технічних наук, професор
В.Ф. Солоненко, кандидат фіз-мат. наук, доцент

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України

Головченко О.М., Співак О.Ю., Грумінська Л.В.

Г61 **Теплотехнічні вимірювання та метрологія. Лабораторний практикум.**
- Вінниця: ВНТУ, 2006. - 92с.

В лабораторному практикумі розглянуто фундаментальні основи теплотехнічних вимірювань та метрології для теплотехніків в лабораторних роботах. Дано методику виконання лабораторних робіт з теплотехніки на фізичних моделях, основи обробки результатів теплотехнічних експериментів та визначення похибок. Практикум розроблений відповідно до плану кафедри та програмами дисциплін "Теплотехнічні вимірювання" і "Метрологія та стандартизація".

УДК 621.181

ЗМІСТ

ВСТУП	5
ПОХИБКИ ВИМІРЮВАНЬ	6
СИСТЕМАТИЧНІ ПОХИБКИ І МЕТОДИ ЇХ ВИЛУЧЕННЯ	8
ВИПАДКОВІ ПОХИБКИ	9
ОЦІНКА ВИПАДКОВИХ ПОХИБОК ПРЯМИХ ВИМІРЮВАНЬ	12
ДИНАМІЧНІ ПОХИБКИ	15
ПОВІРКА ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИЛАДІВ	16
ПОХИБКИ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАНЬ	18
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1	23
ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ	23
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2	26
ВИМІРЮВАННЯ ОСНОВНИХ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН В ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЦІ	26
2.1 ВИМІРЮВАННЯ ТИСКУ	26
2.2 ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУР	27
2.3 ВИМІРЮВАННЯ ВОЛОГОСТІ ТІЛ	31
2.4 ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТ	31
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3	34
ПОВІРКА ПРУЖИННИХ МАНОМЕТРІВ	34
ВИМІРЮВАННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ ДВОКИСУ ВУГЛЕЦЮ	37
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5	42
ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУР	42
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6	47
ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ТА ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ	47
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №7	49
ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОМАТИЧНОГО ПОТЕНЦІОМЕТРА КСП – 4	49
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 8	52
ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОМАТИЧНОГО МОСТА КСМ-2	52
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 9	56
ДОСЛІДЖЕННЯ ЛОГОМЕТРА	56
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 10	58
ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОМАТИЧНОГО ВИТРАТОМІРА ДМ-КСД	58

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №11	64
ВИМІРЮВАННЯ ОСНОВНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН	64
11.3.1 Магнітоелектричний вимірювальний перетворювач	67
11.3.2 Електромагнітний вимірювальний перетворювач	69
11.3.3 Електродинамічний вимірювальний перетворювач	71
11.3.4 Амперметри і вольтметри електродинамічної системи	73
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №12	75
ПОВІРКА ОДНОФАЗНОГО ЛІЧИЛЬНИКА АКТИВНОЇ ЕНЕРГІЇ	75
ДОДАТКИ	84
ЛІТЕРАТУРА	91

ВСТУП

Теплотехнічні вимірювання служать для визначення багатьох фізичних величин, котрі пов'язані з процесами отримання і використання теплової енергії. Вони включають визначення як теплових величин (температури, теплоти згорання, теплопровідності тощо, так і ряду інших фізичних величин, таких як тиск, витрати і кількості, склад газів, вологість, які відіграють важливу роль в теплоенергетиці.

Теплотехнічні вимірювання широко використовуються в енергетиці, металургії, хімії тощо. В енергетичній промисловості, наприклад, вони використовуються для повсякденного контролю і спостереження за роботою і складом встановленого на електростанціях обладнання, разом з тим теплотехнічні вимірювання необхідні для вивчення і подальшого удосконалювання способів виробництва теплової енергії і методів використання тепла. Велику роль теплотехнічні вимірювання відіграють і для пристроїв автоматизації теплових електростанцій, котельень, різних теплових машин, апаратів та пристроїв, де вони виконуються за допомогою різних вимірювальних перетворювачів.

Даний лабораторний практикум для дисциплін „Теплотехнічні вимірювання та прилади” і „Метрологія і стандартизація” складається як з традиційних, так і оригінальних лабораторних робіт, котрі виконуються на кафедрі теплоенергетики ВНТУ, і призначений для повнішого вивчення цих дисциплін, набуття та поглиблення практичних навичок студентів в роботі з теплотехнічними вимірювальними пристроями та теплотехнічним обладнанням.

Посібник складається з двох частин. В першій частині посібника міститься інформація про похибки вимірювань, способи і методи їх зменшення або врахування для проведення коректних вимірювань теплофізичних величин. Друга частина – власне лабораторні роботи, які студенти виконують на фізичних моделях в лабораторіях кафедри. Лабораторні роботи складено з припущенням, що студент попередньо вивчив теоретичний матеріал відповідного розділу за рекомендованими підручниками та лекційним курсом.

Автори навчального посібника щиро вдячні інженеру кафедри теплоенергетики Чернипу А.О. за практичні рекомендації та зауваження щодо порядку виконання лабораторних робіт та студентам групи ТЕ-02 Студинському В.В. і Медведєвій А.В. за допомогу в наборі тексту посібника.

ПОХИБКИ ВИМІРЮВАНЬ

Класична метрологія виходить із позиції, що результат вимірювання завжди відрізняється від істинного значення вимірюваної величини. Тому під час вимірювань фізичних величин (ФВ) виникає похибка, яка дорівнює різниці між значенням X фізичної величини та її істинним X_i значенням

$$\Delta X = X - X_i.$$

Істинне значення. Значення фізичної величини, яке ідеально відображало б певну властивість об'єкта.

Визначити істинне значення величини вимірюванням неможливо через обмежені можливості засобів вимірювань. Однак є величини, істинне значення яких відоме, наприклад, один повний оберт дорівнює 2π радіанів або 360° .

Раніше відмічена неможливість визначення істинного значення є наслідком принципової недосконалості відображення при вимірюванні та причиною неминучості похибки вимірювання. Оскільки істинне значення ФВ нам за умовою невідоме, то похибку вимірювання з останнього рівняння визначити неможливо. Для визначення похибки істинне значення ФВ заміняють дійсним $-X_0$.

Абсолютна похибка вимірювання. Різниця між результатом вимірювання і дійсним значенням вимірюваної величини

$$\Delta X = X - X_0.$$

Абсолютною дану похибку назвали тому, що вона виражена в абсолютних одиницях вимірюваної величини.

Дійсне значення – значення фізичної величини, знайдене експериментальним шляхом і настільки наближене до істинного значення, що його можна використати замість істинного для даної мети.

На практиці дійсне значення ФВ може визначатись:

- за допомогою багаторазових вимірювань із наступним усередненням результатів спостережень і поданням цього середнього як дійсного;
- за допомогою еталонного засобу вимірювання.

Якщо абсолютну похибку взяти з протилежним знаком $\Delta q = -\Delta X$ і алгебрично додати до результату вимірювання, то можна вилучити систематичну похибку з результатів вимірювання або ввести поправку в результати вимірювання.

Поправка – значення величини, що алгебрично додається до результату вимірювання з метою вилучення систематичної похибки.

У багатьох випадках числове значення абсолютної похибки не дає правильного уявлення про точність вимірювання, ступінь достовірності одержаного результату. Тому введено універсальнішу характеристику точності у вигляді **відносної похибки**.

Відносна похибка вимірювання – відношення абсолютної похибки вимірювання до дійсного значення вимірюваної величини.

$$\delta = \frac{\Delta X}{X_0} = \frac{X - X_0}{X_0}.$$

Відносна похибка може виражатися не тільки у відносних величинах, а й у відсотках

$$\delta = \frac{\Delta X}{X_0} \cdot 100\% = \frac{X - X_0}{X_0} \cdot 100\%.$$

Аналіз останніх двох рівнянь дозволяє дійти висновку, що чим менша похибка вимірювання, тим вища його точність, отже, тим менша різниця між істинним значенням ФВ і результатом її вимірювань. Із збільшенням похибки зменшується точність.

Точність вимірювання – головна характеристика якості вимірювання, що відображає близькість результату вимірювання до істинного значення вимірюваної величини.

Кількісно точність θ вимірювання визначається як величина, обернена до відносної похибки

$$\theta = \frac{1}{\delta} = \frac{X_0}{X - X_0}.$$

Розрізняють надмірну похибку й промах.

Надмірна похибка – похибка вимірювання, що суттєво перебільшує очікувану (у даних умовах) похибку.

Промак – результат вимірювання, що має надмірну похибку.

В методиках оцінки результатів вимірювання промахи вилучають із ряду багаторазових спостережень як аномальні результати вимірювання.

Приклад. Визначення абсолютної й відносної похибок та точності вимірювань.

Амперметром магнітоелектричної системи проведено ряд вимірювань (9.80 мА, 21.10 мА, 30.12 мА, 40.08 мА, 49.95 мА) у таких оцифрованих відмітках шкали: 10 мА, 20 мА, 30 мА, 40 мА, 50 мА. Визначити абсолютну й відносну похибку та точність вимірювань.

Прийнявши за дійсне значення I_0 оцифровані відмітки шкали, знайдемо значення абсолютних похибок:

$$\Delta_{10} = I_{*10} - I_{010} = 9.80 - 10 = -0.20 (\text{мА});$$

$$\Delta_{20} = I_{*20} - I_{020} = 21.1 - 20 = +0.10 (\text{мА});$$

$$\Delta_{30} = I_{*30} - I_{030} = 30.12 - 30 = +0.12 (\text{мА});$$

$$\Delta_{40} = I_{*40} - I_{040} = 40.08 - 40 = +0.08 (\text{мА});$$

$$\Delta_{50} = I_{*50} - I_{050} = 49.95 - 50 = -0.05 (\text{мА}).$$

Визначимо відносну похибку та точність вимірювання для кожної відмітки шкали:

$$\begin{aligned}\delta_{10} &= \frac{\Delta_{10}}{I_{\partial 10}} = \frac{0.2}{10} = 0.02 & \Rightarrow & \theta_{10} = \frac{1}{\delta_{10}} = \frac{1}{0.02} = 50; \\ \delta_{20} &= \frac{\Delta_{20}}{I_{\partial 20}} = \frac{0.1}{20} = 0.005 & \Rightarrow & \theta_{20} = \frac{1}{\delta_{20}} = \frac{1}{0.005} = 200; \\ \delta_{30} &= \frac{\Delta_{30}}{I_{\partial 30}} = \frac{0.12}{30} = 0.004 & \Rightarrow & \theta_{30} = \frac{1}{\delta_{30}} = \frac{1}{0.004} = 250; \\ \delta_{40} &= \frac{\Delta_{40}}{I_{\partial 40}} = \frac{0.08}{40} = 0.002 & \Rightarrow & \theta_{40} = \frac{1}{\delta_{40}} = \frac{1}{0.002} = 500; \\ \delta_{50} &= \frac{\Delta_{50}}{I_{\partial 50}} = \frac{0.005}{510} = 0.001 & \Rightarrow & \theta_{50} = \frac{1}{\delta_{50}} = \frac{1}{0.001} = 1000.\end{aligned}$$

За способом вираження похибки розподіляються на абсолютні й відносні; за характером зміни – на систематичні й випадкові.

Систематичні похибки і методи їх вилучення

Систематична похибка – складова похибки $\bar{\Delta}$, що залишається сталою або прогнозовано змінюється у ряді вимірювань однієї величини.

Врахування і вилучення систематичних похибок досить важливе завдання кожного точного вимірювання. Повністю вилучити систематичні похибки неможливо, завжди залишаються якісь невраховані залишки. Ці залишки необхідно врахувати, щоб оцінити межі невилученої систематичної похибки результату.

Для виявлення, оцінки і вилучення систематичних похибок необхідно, по-перше, знати місце і причини їх виникнення, а по-друге, способи виявлення і вилучення цих похибок.

Залежно від причин виникнення, систематичні похибки можна розподілити на чотири групи:

- інструментальні;
- методичні;
- суб'єктивні;
- похибки встановлення.

Похибки встановлення. До них належать такі, прояви яких зумовлені неправильним застосуванням міри: встановлення приладу з нахилом або відхилення зовнішніх умов від нормальних (наявність зовнішніх полів, відхилення температури від нормальної тощо).

Суб'єктивні похибки. Вони проявляються в результаті особливостей самого спостерігача. Наприклад, при підрахунку поділок шкали різні люди по-різному оцінюють одне і те саме положення стрілки. Одні схильні завжди занижувати покази, інші – завищувати їх.

Методичні похибки виникають через недоліки самого методу вимірювання або через неточність застосованих спрощених формул. Скажімо, при непрямому вимірюванні площі перерізу круглого стержня прямим ви-

мірюванням діаметра з подальшим обчисленням площі $S = \pi d^2/4$ результат буде із систематичною методичною похибкою через обмежене число знаків і значення числа π .

Інструментальні похибки зумовлені недосконалістю технології виготовлення засобів вимірювань.

За характером зміни в часі систематичні похибки поділяють на: постійні, прогресивні, періодичні.

Постійні похибки. До них належать такі, які тривалий час залишаються незмінними і протягом вимірювального експерименту є постійними. Часто вони носять технологічний характер і виникають, наприклад, при недостатньо точному намотуванні котушок індуктивності, під час градуювання шкали тощо.

Прогресивні похибки. Це такі похибки, які у процесі даної серії вимірювань неперервно зростають або зменшуються, тобто є функцією часу.

Вони можуть бути спричинені повільним зменшенням (збільшенням) напруги живлення, прогріванням приладу і іншими причинами.

Періодичні похибки. До їх числа належать систематичні похибки, значення яких є періодичною функцією або часу, або самої вимірюваної величини.

Випадкові похибки

Випадкова похибка — складова похибки, що непередбачено змінюється у ряді вимірювань однієї величини.

Похибки вимірювань зазвичай носять випадковий характер. Випадковість зумовлюється: нестаціонарністю і випадковим характером вимірюваної фізичної величини; нестабільністю метрологічних характеристик засобів вимірювань, яка визначається випадковим характером формування коефіцієнтів перетворення вимірювальних пристроїв; випадковим характером впливу зовнішніх факторів на засіб вимірювання у процесі вимірювального експерименту.

Кількісно випадковий процес описують випадковою функцією часу $X(t)$, яка в будь-який момент часу t може набувати різних значень із деяким розподілом імовірностей. Для будь-якого t_i значення $X_i = X(t_i)$ є випадковою величиною. Випадковий процес визначається сукупністю проявів процесу в часі і законами цієї сукупності. Функціональна залежність проявів процесу називається *реалізацією випадкової функції*.

Для характеристики частоти появи випадкових похибок теорія ймовірностей пропонує використовувати закони розподілу. При цьому виділяється два види опису законів розподілу: інтегральний і диференціальний.

Інтегральним законом розподілу або *функцією розподілу ймовірностей* $F(X)$ випадкової величини X називають функцію, значення якої для

кожного x є ймовірністю події, яка полягає в тому, що випадкова величина X приймає значення менші x , тобто функцію:

$$F(x) = P\{X < x\}.$$

Дана функція є неспадною функцією x і змінюється в межах від $F(-\infty) = 0$ до $F(+\infty) = 1$. Вона існує для всіх випадкових величин як дискретних, так і неперервних.

Для випадкової величини з неперервною і диференційовною функцією розподілу $F(x)$ можна знайти диференціальний закон розподілу ймовірностей, як похідну від $F(x)$, тобто як $p(x) = F'(x)$. Ця залежність називається *густиною розподілу ймовірностей*. Вона завжди позитивна і задовольняє умову нормування

$$\int_{-\infty}^{+\infty} p(x) dx = 1,$$

яка безпосередньо витікає із властивостей інтегральної функції розподілу $F(x)$.

Розподіл Гаусса. Серед законів розподілу нормальний закон займає провідне місце, особливо для оцінки похибок вимірювання. Річ у тому, що похибка вимірювання визначається великим числом частинних складових, що носять випадковий характер, а з центральної граничної теореми ймовірностей випливає, що розподіл похибок вимірювання буде близьким до нормального, якщо результати спостережень формуються під впливом великої кількості незалежно діючих частинних похибок випадкового характеру, кожна з яких є незначною за значенням порівняно із загальною випадковою похибкою вимірювання. Щільність ймовірностей нормального закону (рис. 1) описується виразом

$$f(\Delta) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\Delta}{\sigma}\right)^2\right],$$

де σ - середнє квадратичне відхилення;

$\Delta = (\Delta - \bar{\Delta})$ - випадкова складова похибки.

Щільність розподілу для нормального закону має вигляд дзвона. Якщо $\bar{\Delta} \neq 0$ (рис. 1, а), то крива буде зміщена праворуч або ліворуч від початку осі ординат на величину $\bar{\Delta}$, залежно від знака систематичної складової похибки. Крива симетрична відносно осі ординат, коли відсутня систематична складова похибки $\bar{\Delta} = 0$.

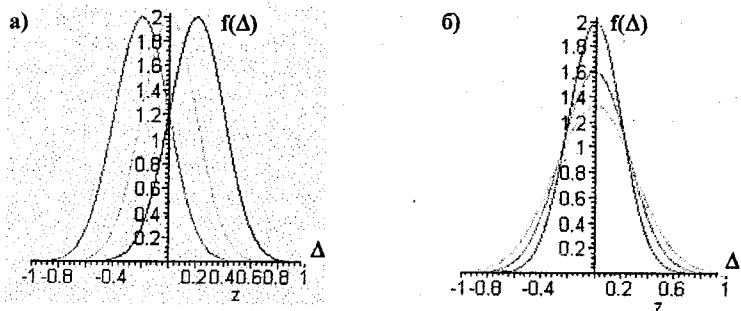


Рисунок 1 – Криві щільності розподілу ймовірностей
для нормального закону розподілу

Значення σ впливає на гостроту вершини кривої. Збільшення значення σ (рис.1, б) призводить до зменшення гостроти вершини і тим ймовірніша поява великих похибок. І, навпаки, при зменшенні σ зростає ймовірність появи малих похибок і знижується ймовірність появи великих похибок.

Основними числовими характеристиками законів розподілу є математичне очікування і дисперсія.

Математичне очікування похибки вимірювань є не випадковою величиною, відносно якої розсіюються інші значення похибки при повторних вимірюваннях. Математичне очікування характеризує систематичну складову похибки.

Дисперсія похибки характеризує ступінь розсіювання окремих значень похибки відносно математичного очікування. Чим менша дисперсія, тим точніше виконано вимірювання. Отже, дисперсія може служити характеристикою точності вимірювань. В зв'язку з тим, що дисперсія виражається в одиницях похибки в квадраті, то як числову характеристику точності вимірювань використовують середнє квадратичне відхилення (квадратний корінь від дисперсії) з позитивним знаком і одиницями похибки.

При проведенні вимірювань необхідно отримати результат з похибкою, що не перевищує допустимого значення. Знання тільки середнього квадратичного відхилення не дозволяє знайти максимальну похибку, що підкреслює обмежені можливості такої числової характеристики похибки, як σ . Максимальне значення похибки залежить не тільки від σ , але й від виду закону розподілу. Коли розподіл похибки теоретично не обмежений, наприклад, для нормального закону розподілу, похибка може бути будь-якою за значенням. В цьому випадку можна говорити тільки про інтервал, за границі якого похибка не виходить з деякою ймовірністю. Цей інтервал називають *довірчим*, а ймовірність що характеризує його - *довірчою ймовірністю*.

В практиці вимірювань задають різні значення довірчої ймовірності, наприклад: 0.90; 0.95; 0.98; 0.99; 0.9973; 0.999. Довірчий інтервал і довірчу ймовірність вибирають в залежності від конкретних умов вимірювання. Наприклад, для нормального закону розподілу випадкових похибок з середнім квадратичним відхилення σ часто використовують довірчий інтервал від $+3\sigma$ до -3σ , для якого довірна ймовірність $P=0.9973$. Така ймовірність означає, що із 370 випадкових похибок тільки одна похибка за абсолютним значенням буде більшою за 3σ . Оскільки в практиці число вимірювань рідко перевищує декілька сотень, поява однієї випадкової похибки, більшої ніж 3σ , малоймовірна. Наявність двох подібних похибок практично неможлива. Тому всі можливі похибки, розподілені за нормальним законом, практично не перевищують за абсолютним значенням 3σ (правило «трьох сигм»).

Оцінка випадкових похибок прямих вимірювань

Випадкові похибки проявляються при багаторазових спостереженнях вимірюваної величини в однакових умовах одним оператором і за допомогою одного і того самого засобу вимірювання. Такі вимірювання прийнято називати рівноточними.

При статистичній обробці результатів багаторазових спостережень необхідно виконати таку послідовність дій.

1 Провести багаторазові вимірювання і отримати масив $X_1, X_2, \dots, X_n$ вимірювальної інформації.

2 Виправити результати вимірювань, вилучивши відомі систематичні похибки шляхом внесення поправок у результати спостережень.

3 Знайти математичне очікування виправлених результатів спостережень і прийняти його за дійсне значення.

Для нормального закону розподілу, а, якщо поступитися ефективністю оцінки, то й для всіх симетричних розподілів, за оцінку математичного очікування ряду спостережень з однаковою точністю приймають середнє арифметичне

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$$

4 Визначити випадкове відхилення.

Різниця

$$g_i = X_i - \bar{x}$$

є випадковим відхиленням (випадковою абсолютною похибкою) при i -му спостереженні. Вона може бути додатною і від'ємною.

Середнє арифметичне, незалежно від закону розподілу, має такі властивості

$$\sum_{i=1}^n g_i = 0 \quad \text{і} \quad \sum_{i=1}^n g_i^2 = \min,$$

які використовуються для перевірки правильності обчислення $\bar{x}$.

5 Обчислити експериментальне середнє квадратичне відхилення результатів вимірювання за формулою Бесселя:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n g_i^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{x})^2}{n-1}},$$

де X_i - результат i -го вимірювання;

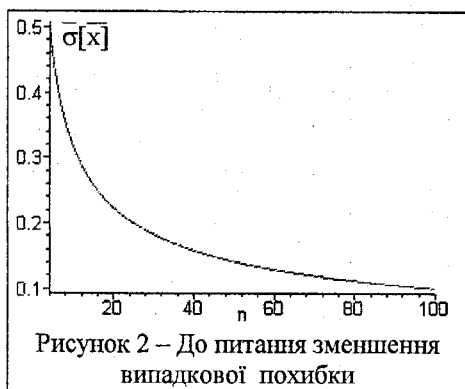
$\bar{x}$ - середнє арифметичне n результатів.

Підкреслимо, що для серії n вимірювань однієї й тієї самої величини параметр S характеризує розсіювання результатів багаторазових n вимірювань однієї і тієї самої величини. Оскільки ми обчислюємо середнє арифметичне, необхідне для одержання оцінки σ , то природно взяти його за результат вимірювання. В даному випадку середнє арифметичне залежить від числа вимірювань і є випадковою величиною, яка має деякі дисперсії відносно істинного значення.

6 Середнє квадратичне відхилення середнього арифметичного визначається за формулою

$$\sigma[\bar{x}] = \frac{S}{\sqrt{n}}.$$

Отже, якщо як результат багаторазових вимірювань взяти середнє арифметичне $\bar{x}$, то випадкова похибка (S) зменшується в $\sqrt{n}$ раз порівняно з випадком (рис.2), коли за результат багаторазових вимірювань приймалось будь-яке одне з n спостережень.



Тому багаторазові вимірювання з подальшим усередненням результатів і прийняттям цього середнього за результат вимірювання є досить ефективним методом зменшення випадкової похибки.

7 Визначити довірчі границі похибки вимірювання, що представляє собою верхню й нижню границі інтервалу, який накриває із заданою ймовірністю похибку вимірювання.

Якщо число вимірювань $n \leq 20$, то довірчий інтервал випадкової похибки при заданих ймовірності P і середньому квадратичному відхиленні $\sigma[\bar{x}]$ визначається за формулою Стюдента:

$$\Delta_{\delta} = \pm k_t \cdot \sigma[\bar{x}],$$

де k_t - коефіцієнт розподілу Стюдента, який залежить від заданої ймовірності P і числа вимірювань n .

Розглянемо тепер, яку саме довірчу ймовірність необхідно задавати. Як правило, приймають $P=0.95$. Якщо вимірювання повторити неможливо, то $P=0.99$, а в особливо відповідальних випадках, коли вимірювання, що виконуються, пов'язані із створенням нових еталонів або їхні результати можуть суттєво вплинути на здоров'я людини, $P=0.997$.

8 Подати результат вимірювання

$$\bar{x} \pm \Delta_{\delta}; P.$$

Приклад. Обробка результатів прямих вимірювань.

Проведено ряд вимірювань за допомогою вольтметра магнітоелектричної системи. При цьому одержано такі результати: 122; 118; 120; 121; 119; 120 [В]. Визначити середнє значення виміряної напруги, його СКВ. Подати результат, вказавши границі довірчого інтервалу, в який потрапляє похибка вимірювання із заданою ймовірністю $P=0.95$ (коефіцієнт Стюдента дорівнює 2.571).

1 Знайдемо математичне очікування для ряду вимірювань

$$\bar{u} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_i = \frac{122+118+120+121+119+120}{6} = 120 \text{ [В]}.$$

2 Визначимо випадкові відхилення

$$\vartheta_1 = U_1 - \bar{u} = 122 - 120 = +2 \text{ [В]}$$

$$\vartheta_2 = U_2 - \bar{u} = 118 - 120 = -2 \text{ [В]}$$

$$\vartheta_3 = U_3 - \bar{u} = 120 - 120 = 0 \text{ [В]}$$

$$\vartheta_4 = U_4 - \bar{u} = 121 - 120 = +1 \text{ [В]}$$

$$\vartheta_5 = U_5 - \bar{u} = 119 - 120 = -1 \text{ [В]}$$

$$\vartheta_6 = U_6 - \bar{u} = 120 - 120 = 0 \text{ [В]}$$

3 Перевіримо, чи сума випадкових відхилень дорівнює нулю

$$\sum_{i=1}^6 \vartheta_i = 0.$$

4 Знайдемо оцінку експериментального середнього квадратичного відхилення

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n g_i^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{(2)^2 + (-2)^2 + 0 + (1)^2 + (-1)^2 + 0}{6}} = 1.41 [B].$$

5 Визначимо середнє квадратичне відхилення середнього арифметичного

$$\bar{\sigma}[u] = \frac{S}{\sqrt{n}} = \frac{1.41}{\sqrt{6}} = 0.575 [B].$$

6 Знайдемо довірчі границі похибки вимірювання

7 Подано результат відповідно до стандартної форми $\bar{u} \pm \Delta_0, P$

$$U: 120.00 B, \pm 1.48 B, P = 0.95.$$

Динамічні похибки

Вимірювальні прилади використовуються для вимірювання величин, що змінюються з часом, і є матеріальними системами, що мають різні інерційні властивості (механічні, теплові тощо). Інерційність приладів для змінного режиму роботи призводить до запізнювання їхніх показів, тобто до відставання показів від зміни вимірюваної величини.

Величина запізнювання показів залежить, в основному, від принципу дії і будови вимірювального приладу. На неї впливають: інерція рухомої частини приладу, теплоємність і теплопровідність термочутливого елемента і спосіб його установки, довжина і діаметр з'єднувальних трубок тощо.

Залежність показів приладу від зміни вимірюваної величини в нестаціонарному режимі (перехідному процесі) називається *динамічною характеристикою* вимірювального приладу. Вид динамічної характеристики визначається характером збурення вимірюваної величини і типом вимірювального приладу.

Динамічна характеристика приладів у більшості випадків знаходиться дослідним шляхом. Для одержання її проводиться значне стрибкоподібне збільшення вимірюваної величини до заданого значення і здійснюється безупинний запис показів приладу до моменту сталих показів. На практиці, разом зі стрибкоподібною зміною вимірюваної величини, остання може також змінюватися в часі за різними законами.

На рис.3 показана динамічна характеристика термометра. Тут по осі ординат відкладена температура речовини t , а по осі абсцис – час τ . При стрибкоподібній зміні вимірюваної температури від 0 до деякого постійного значення t_i покази термометра t_n (з виключеною з них систематичною похибкою) змінюються за кривою перехідного процесу, відстаючи в кожен момент часу від значення t_i на значення динамічної похибки вимірювання Δ_0 :

$$\Delta_0 = t_i - t_n \quad (14)$$

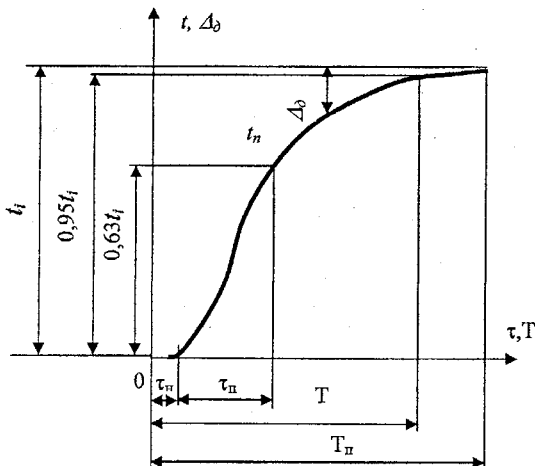


Рисунок 3 – Динамічна характеристика термометра

Таким чином, як видно з рис.3, теплова інерція термометра, зумовлена порівняно повільним нагріванням термочутливого елемента, призводить до запізнювання показів приладу на Δ_δ , тобто, при зміні вимірюваної температури до нового сталого значення t_i покази термометра t_n поступово досягають цього значення.

Отже, для оцінки динамічних похибок приладу необхідно мати криву його перехідного

процесу, за якою для різних моментів часу можна знайти значення цих похибок.

Крім динамічних похибок динамічна характеристика вимірювального приладу містить ряд показників часу перехідного процесу (рис.3), до яких відносяться: *час початку реагування* τ_k (час від початку зміни вимірюваної величини до початку зміни показів приладу); *постійна часу* τ_n (час від початку реагування, протягом якого покази приладу досягнуть 63% зміни вимірюваної величини); *час перехідного процесу* T (час, протягом якого покази приладу досягнуть 95% від сталого значення вимірюваної величини); *повний час установа показів* T_n (час, протягом якого покази приладу досягнуть 100% від сталого значення вимірюваної величини).

Динамічна похибка Δ_δ , постійна часу τ_n і час перехідного процесу T є основними величинами, що характеризують динамічні властивості вимірювальних приладів. Чим менші, за інших рівних умов, ці величини, тим менше інерційне запізнювання має вимірювальний прилад і тим вищими є його динамічні якості.

Повірка вимірювальних приладів

Для знаходження основної похибки в різних точках шкали приладу він через певні терміни (чи в міру необхідності) перевіряється, тобто його покази порівнюють з показами зразкового приладу, що має в кілька разів меншу похибку вимірювань, ніж прилад, що перевіряється.

Повірка приладів виконується як на спеціальних лабораторних стендах, так і на робочому місці. Порядок повірки різних приладів у лабораторії встановлюється відповідними державними стандартами та інструкціями, користування якими є обов'язковим. При повірці в лабораторії число

точок шкали, що перевіряються, для промислових приладів складає звичайно 3-5, а для лабораторних і зразкових – не менше 10. Результати перевірки заносяться до протоколу, на підставі якого у випадку придатності приладу виписується посвідчення. У цьому документі, крім паспортних даних приладу для всіх значень шкали, що перевіряються, наводяться дійсні значення і поправки. Крім того, у посвідченні вказуються дата перевірки і термін її дії.

Повірка промислових приладів на робочому місці здійснюється паралельним підключенням до них лабораторних (переносних) приладів. Цей вид повірки є неповним, тому що в більшості випадків дозволяє порівняти покази приладу, що перевіряється, тільки в одній (робочій) точці.

За даними повірки іноді будується крива поправок до показів приладу (рис.4), що полегшує визначення поправок у межах всієї шкали.

Повірку приладів виконують спочатку для зростаючого значення вимірюваної величини (прямий хід), а потім для спадаючого (зворотній хід). Різниця між двома показами засобу вимірювання, коли одне й те саме значення вимірюваної величини досягається внаслідок її збільшення чи зменшення називається *варіацією показів засобу вимірювання*. Поява варіації зазвичай викликається пружною чи термічною післядією чутливого елемента, тертям рухливих частин, наявністю зазорів (люфтів) у механізмах тощо.

Варіація показів приладу v' у відсотках діапазону показів знаходиться за формулою:

$$v' = \frac{v}{N_k - N_n} \cdot 100\%, \quad (15)$$

де v - найбільша різниця показів, отримана для одного й того самого значення вимірюваної величини з незмінними зовнішніми умовами, N_n і N_k - початкове і кінцеве значення шкали.

Термометр № 103256; повірка 23.12.2004р.

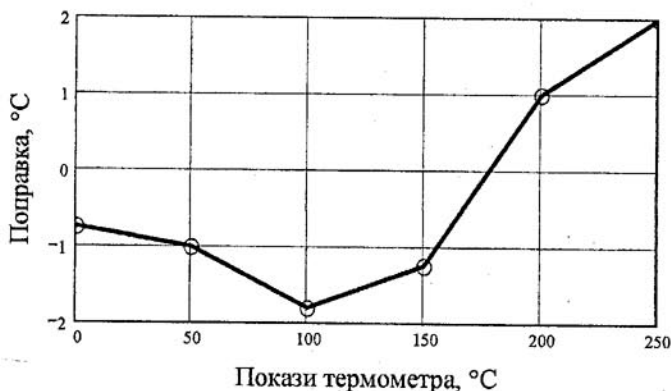


Рисунок 4 – Крива поправок термометра

Характерними величинами є також *відтворюваність вимірювання* і *поріг чутливості приладу*.

Відтворюваність вимірювання – це характеристика якості вимірювання, що відображає близькість результатів вимірювань однієї й тієї самої величини, виконаних у різний час, в різних умовах, різними методами й засобами.

Поріг чутливості визначає найменше значення вимірюваної величини, що може бути виявлене засобом вимірювання.

Зона нечутливості - діапазон значень вимірюваної величини, в межах якого її зміни не викликають зміни показу засобу вимірювань.

Досить важливою метрологічною характеристикою є *діапазон вимірювань*. У ДСТУ 2681-94 розрізняють діапазон показів і діапазон вимірювань.

Діапазон показів - інтервал значень вимірюваної величини, який обмежений початковим та кінцевим її значеннями.

Початковим значенням вимірюваної величини називають найменше в діапазоні показів її значення, а кінцевим - її найбільше значення.

Діапазон вимірювань - інтервал значень вимірюваної величини, в межах якого проноrmовані похибки засобу вимірювань.

Пронормованими є верхня $x_{\max}$ і нижня $x_{\min}$ межі вимірювання.

У вимірювальній практиці широко використовується також термін "повний діапазон", під яким розуміють відношення верхньої межі вимірювання $x_{\max}$ до порогу чутливості

$$D = \frac{x_{\max}}{X_n},$$

де X_n - поріг чутливості.

Похибки засобів вимірювань

Похибки засобів вимірювань дозволяють кількісно оцінити інструментарну похибку вимірювань, тобто похибку, яка виникає через недосконалість конструкції засобу вимірювання, а також через кінцеві можливості технології його виготовлення.

Похибки засобів вимірювальної техніки поділяються на:

- абсолютні, відносні та зведені;
- систематичні та випадкові;
- адитивні, мультиплікативні і нелінійні;
- основні і додаткові;
- статичні і динамічні.

За способом вираження похибки засобів вимірювальної техніки поділяють на абсолютні, відносні та зведені.

Абсолютною похибкою засобу вимірювань називають різницю між показом засобу вимірювань та істинним значенням вимірюваної величини за відсутності методичних похибок і похибок від взаємодії засобу вимірювань з об'єктом вимірювання

$$\Delta_{\text{аб}} = X_{\text{аб}} - X_i.$$

Умови відсутності методичних похибок вимірювання і похибок від взаємодії засобу вимірювань з об'єктом вимірювання створюються під час перевірки, коли значення вхідної величини знаходять за допомогою зразкового засобу вимірювання.

В метрологічній практиці визначають приблизне значення похибки засобу вимірювань, тобто її оцінку. Оцінка похибки засобу вимірювань є різниця між показом засобу вимірювань і умовно істинним значенням вимірюваної величини. На практиці слово «оцінка» може опускатися.

Відносною похибкою засобу вимірювань називають відношення абсолютної похибки засобу вимірювань до істинного значення вимірюваної величини

$$\delta_{\text{аб}} [\%] = \frac{\Delta_{\text{аб}}}{X_i} \cdot 100\%.$$

Зведеною похибкою засобу вимірювань називають відношення абсолютної похибки засобу вимірювань до нормованого значення

$$\gamma [\%] = \frac{\Delta_{\text{аб}}}{X_n} \cdot 100\%.$$

де X_n — нормоване значення.

Залежно від типу шкали засобу вимірювань виділяють декілька методів визначення нормованого значення.

1 Якщо засіб вимірювань має рівномірну шкалу, то як нормоване значення X_n необхідно вибирати верхню межу вимірювань при розташуванні нульової відмітки на початку діапазону.

2 Нормоване значення X_n дорівнює сумі модулів меж вимірювань, якщо нульова відмітка шкали розташовується всередині діапазону вимірювань.

3 Для багатомежевих засобів вимірювань значення X_n дорівнює різниці меж вимірювань.

4 Якщо засіб вимірювань має істотно нерівномірну шкалу, то за нормоване значення X_n приймають довжину шкали або її частини, відповідної діапазону вимірювань.

Похибки засобів вимірювань містять ряд систематичних і випадкових складових, статичні та динамічні похибки, які визначаються аналогічно визначенням похибок вимірювань.

Залежно від того, в яких умовах експлуатується засіб вимірювань, розрізняють основну (для нормальних умов) і додаткову похибки (якщо одна або більше впливних величин виходять за межі нормальних умов).

Основна похибка – похибка засобу вимірювальної техніки за нормальних умов його використання.

Умови застосування засобів вимірювальної техніки, за яких впливні величини мають нормальні значення чи знаходяться у границях нормального інтервалу значень, називають нормальними умовами застосування.

Нормальне - це значення впливної величини, для якого (у межах якого) нормується основна похибка засобів вимірювальної техніки.

Умови застосування засобів вимірювальної техніки - це такі умови, за яких значення впливних величин знаходяться у границях робочої зони.

Робоча зона значень впливних величин - це зона, що встановлюється для засобів вимірювань, в межах якої, за необхідності, нормуються додаткові похибки цих засобів.

Додаткова похибка – похибка засобу вимірювальної техніки, яка додатково виникає під час використання засобу вимірювань в умовах відхилення хоча б однієї з впливних величин від нормального значення або її виходу за границі нормальної зони значень.

Щоб наперед оцінити похибку, яку внесе дане устаткування в кінцевий результат, користуються нормованими значеннями похибки.

Під нормованим значенням розуміють похибки, які є граничними для даного типу засобів вимірювань.

Стандартами регламентуються способи нормування і форми вираження допустимих границь похибок.

Границею допустимої похибки засобу вимірювань називають найбільше значення, без урахування знаку, похибки засобу вимірювань, за яким цей засіб ще може бути визнаний придатним до застосування.

Границі допустимих абсолютної, відносної і зведеної похибок засобів вимірювань можуть виражатись одним числом

$$\Delta_n = \pm a; \quad \delta_n = \pm q; \quad \gamma_n = \pm p,$$

де a - позитивне число, незалежне від X ;

q, p - абстрактні позитивні числа, вибрані з ряду

$$[1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0] \cdot 10^n,$$

де n може набувати значення 1; 0; -1; -2; ...

Границі допустимих абсолютної і відносної похибок можуть також виражатися у вигляді лінійної функції

$$\Delta_{\text{аб}} = \pm (a + b \cdot x),$$

де a, b - позитивні числа, незалежні від x .

Перший доданок поданої функції (рис.5, а) характеризує адитивну похибку (похибку нуля, незалежну від x), а другий (рис.5, в) – мультиплікативну (похибку чутливості, залежну від x).

Адитивна – складова абсолютної похибки засобу вимірювальної техніки, яка не залежить від вимірюваної величини.

Мультиплікативна – складова похибки засобу вимірювальної техніки, яка пропорційна вимірюваній величині.

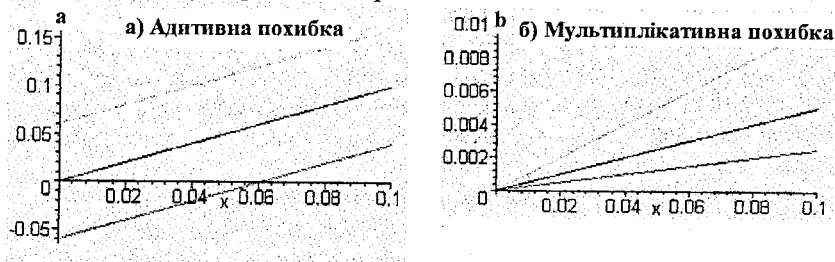


Рисунок 5 – Графічне подання адитивної і мультиплікативної похибок

Похибка нелінійності - складова похибки засобу вимірювальної техніки, яка змінюється нелінійно в діапазоні зміни вимірюваної величини.

Для нормування похибок засобів вимірювальної техніки з адитивною і мультиплікативною похибками найбільш поширеною є формула виду

$$\delta_n = \pm [c + d \cdot (X_n/X - 1)],$$

де X_n – нормоване значення;

c, d – постійні числа.

Для з'ясування фізичної суті коефіцієнта c уявимо, що прилад гра-
ница допустимої похибки якого нормована, показав значення, рівне верх-
ній межі вимірювання: $X = X_n$. Тоді

$$\delta_n = \pm c.$$

Отже c є границя допустимої відносної похибки при максимальному показі приладу.

Для розуміння суті коефіцієнта d перетворимо наведену формулу так, щоб отримати залежність для границі допустимої абсолютної похибки

$$\Delta_n = \pm \frac{1}{100} \cdot [d \cdot X_n + (c - d) \cdot X].$$

Припустимо, що показання приладу рівні нулю. Тоді другий доданок у квадратних дужках дорівнює нулю і d є межа допустимої похибки при нульовому показанні приладу, яка виражена у відсотках до верхньої межі вимірювання.

Різниця коефіцієнтів $(c - d)$ характеризує зростання абсолютної похибки при зростанні показів приладу, а $(X_n/X - 1)$ - зростання відносної похибки при зменшенні показів приладу.

Клас точності. Узагальненою характеристикою засобу вимірювальної техніки є клас точності, що визначається границями його допустимих основної і додаткових похибок, а також іншими характеристиками, що впливають на його точність, значення яких регламентується.

Клас точності характеризує точність засобу вимірювань, але не є безпосередньою характеристикою точності вимірювання, виконаного за допомогою даного засобу вимірювань.

В основу присвоєння класу точності береться основна похибка засобу вимірювань і спосіб її вираження. Якщо основна похибка виражається в одиницях вимірюваної величини або в поділках шкали, то класи точності позначають порядковими номерами. Нумери визначаються відповідними стандартами.

Для засобів вимірювання, відлікові пристрої яких градуюються у логарифмічних одиницях, позначення класів точності збігається з граничними значеннями допустимих похибок. Наприклад, якщо границя допустимої похибки становить ± 1 дБ, то клас точності позначають: Кл. 1,0 дБ.

Якщо границі допустимої основної похибки задаються відносною або зведеною похибкою, то позначення класів точності вибирають із наведеного раніше ряду.

Якщо границі допустимої основної похибки залежать від значення вимірюваної величини, наприклад,

$$\delta = \pm [c + d \cdot (|X_k/X| - 1)],$$

то при значеннях $c=0.02$ і $d=0.01$ клас точності позначають дробом: $0.02/0.01$.

Для характеристик точності засобу вимірювань можна застосувати коефіцієнт точності, який визначається відношенням абсолютної похибки до його поля допуску

$$K_m = \Delta / \Delta_{nd}.$$

Щоб оцінити точніші характеристики сукупності засобів вимірювань, можна застосувати коефіцієнт відносної точності, який є відношенням середнього квадратичного відхилення вимірюваної величини до його поля допуску

$$K_e = \sigma / \Delta_{nd}.$$

Як показники точності засобів вимірювань можна також застосовувати:

- а) інтервал, у якому похибку вимірювання знаходять із заданою ймовірністю;
- б) інтервал, у якому систематичну складову похибки вимірювання знаходять із заданою ймовірністю;
- в) числові характеристики систематичної складової похибки;
- г) числові характеристики випадкової складової похибки;
- д) функцію розподілу складової похибки.

ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ

МЕТА РОБОТИ: *ознайомитися з основними приладами для вимірювання фізичних величин, їх класифікацією, особливостями та характеристиками.*

1.1 ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

ПРИЛАД – це пристрій для спостереження, вимірювання, обробки, подання інформації, передачі її на відстань, для дії на об'єкт дослідження, для регулювання і управління процесами.

Для орієнтування в світі приладів їх необхідно класифікувати. Класифікація – поділ за тією чи іншою ознакою. Залежно від ознаки, покладеної в основу, можлива та чи інша класифікація.

Основні класифікації бувають:

1.1.1 За призначенням. За цією ознакою розрізняють:

- прилади для отримання інформації про явища природи і техніки. Це прилади для спостереження і вимірювальні прилади (вольтметр, ротаметр тощо);
- еталони і міри (лінійки, гирі тощо);
- прилади для передачі і перетворення інформації (датчики, лінії зв'язку, підсилювачі, інтегратори);
- прилади для перетворення і передачі енергії (джерела струму, трансформатори, редуктори тощо);
- прилади для дії на об'єкти (насоси, печі, пальники, котли, холодильники).

1.1.2 За галуззю використання: хімічні, біологічні, медичні, геодезичні, електротехнічні, теплотехнічні тощо.

1.1.3 За видом вимірюваної величини: спідометри, вольтметри, амперметри, манометри, психометри, ротаметри тощо.

1.1.4 За принципом дії: електричні, оптичні, магнітні.

1.1.5 За конструктивним оформленням: стаціонарні (щитові, настільні) і переносні.

1.1.6 За компоновкою блоків, вузлів:

- власне прилад (всі блоки в одному корпусі);
- установку (на одному столі всі прилади, з'єднані лініями зв'язку);
- інформаційну систему (сукупність приладів, які знаходяться в різних місцях);

1.1.7 Прямого (лінійка, гирьова вага) та непрямого вимірювання (коли прилад безпосередньо вимірює величину X' , а необхідно виміряти величину X , котра пов'язана з X' якоюсь залежністю, (наприклад, ртутний термометр безпосередньо вимірює не температуру T , а збільшення об'єму ртуті ΔV).

1.1.8 За методом вимірювання:

- прилади прямого показування (метод безпосереднього вимірювання), в яких залежно від значення вимірюваної величини зміщується по шкалі мітка (стрілка, „зайчик”) – вольтметр, ротаметр, барометр, манометр.
- Нуль-прилади (метод компенсації), в яких вимірювана величина рівноважується набором мір з магазину, мітка і шкала служать тільки для ресстрації рівноваги, тобто повної компенсації вимірюваної величини набором мір. Приклади – важільна вага, вимірні мости, вимірювальні потенціометри.
- Диференційні (метод часткової компенсації), в яких відбувається не повна, а часткова компенсація вимірюваної величини за рахунок магазинних мір. Приклади – торговельні ваги, диференційні манометри.

1.2 ВІДОБРАЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ

Вимірювальні прилади завжди більш або менш складнішим чином переробляють інформацію, що надійшла. В найпростішому випадку переміщення вказівника (мітки) приладу прямо пропорційне вимірюваній величині: $X \sim n$ (рис. 1.1, а). При градуюванні такого приладу шкала виходить лінійною і рівномірною. Якщо покази приладу не залежать від знаку вимірюваної величини, шкала виходить квадратичною: $X \sim n^2$ (рис. 1.1, б). Таку шкалу мають багато електровимірювальних приладів. Чим далі поділки від нуля, тим ширші відстані між ними. Коли величина, яка вимірюється, змінюється на декілька порядків, роблять перемикач діапазонів ($\times 10^{-1}$, $\times 10^{-2}$) або використовують логарифмічну шкалу (рис. 1, в), тобто переміщення мітки на шкалі пропорційне не n , а логарифму n : $X \sim \lg n = \lg X/x_0$. На такій шкалі немає поділки $n=0$, бо $\lg 0 = -\infty$, але можуть бути поділки, які відповідають малим n .

Поділки на шкалу наносять через такі інтервали, щоб одна поділка (або половина поділки) відповідала абсолютній похибці приладу для даних показів.

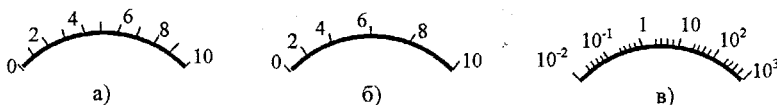


Рисунок 1.1 – Шкали приладів
а) лінійна; б) квадратична; в) логарифмічна

Основними статичними метрологічними характеристиками вимірювальних приладів є такі:

- а) чутливість** – відношення зміни вихідної величини засобу вимірювання до відповідної зміни вхідної величини, що її викликає;
- б) поріг чутливості** – найменше значення фізичної величини, на яке здатен реагувати прилад. Наявність порогу чутливості робить даремним

велике підсилювання сигналу, бо одночасно із сигналом підсилюється і шум;

в) **клас точності** - узагальнена характеристика засобу вимірювальної техніки, що визначається границями його допустимих основної і додаткових похибок а також іншими характеристиками, що впливають на його точність, значення яких регламентується.

г) Час встановлення потрібного показу називається **постійною часу τ** - це інтервал часу від моменту початку дії вхідного сигналу до моменту, коли показ досягає і залишається всередині певних меж навколо усталеного значення.

Хід роботи:

- отримати від викладача прилад для теплотехнічних вимірювань;
- визначити призначення приладу;
- визначити систему і принцип дії приладу;
- визначити клас точності приладу і його абсолютну похибку;
- дані про прилад внести в таблицю 1.1.

Зробити висновки.

Таблиця 1.1 – Характеристики і параметри приладів

№	Характеристики	1	2
1	Марка приладу		
2	Назва приладу		
3	Призначення приладу		
4	Система приладу		
5	Тип приладу		
6	Шкала		
7	Межі вимірювань		
8	Діапазон вимірювань		
9	Клас точності		
10	Абсолютна похибка		
11	Клас захисту		

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

- 1 Які ви знаєте типи приладів?
- 2 Як розрізняються прилади за компоновкою?
- 3 Що таке клас точності приладу?
- 4 Запишіть основні характеристики приладу.
- 5 Які бувають типи шкал і чим вони відрізняються?
- 6 Чим відрізняються надійність приладу і термін його служби?
- 7 Які бувають прилади за методом вимірювання?

ВИМІРЮВАННЯ ОСНОВНИХ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН В ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЦІ

МЕТА РОБОТИ: ознайомитися з методами вимірювання основних фізичних величин: тиску, температури, вологості і витрат

2.1 ВИМІРЮВАННЯ ТИСКУ

Основною одиницею вимірювання тиску є Паскаль: $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$, який складає приблизно одну стотисячну частку атмосферного тиску. Ця одиниця досить зручна для вимірювання розріджень, але непрактична для більшості інших випадків. Для вимірювань атмосферного тиску використовують барометри, котрі можуть бути проградуйовані або в міліметрах ртутного стовпчика ($1 \text{ мм.рт.ст.} = 133,332 \text{ Па}$), або в кілопаскалях ($1 \text{ кПа} = 1000 \text{ Па}$). Барометричний тиск, як правило, позначається літерою B .

Для вимірювання надлишкового тиску в експериментальних установах використовують різні типи манометрів. Залежно від меж вимірювання тиску і точності вимірювань вибирають відповідний тип приладу.

Надлишковий або манометричний тиск вимірюють в барах ($1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па}$) або в мегапаскалях ($1 \text{ МПа} = 10^6 \text{ Па}$). Ясно, що $1 \text{ бар} = 100 \text{ кПа}$, а $1 \text{ МПа} = 1000 \text{ кПа}$. На практиці ще зустрічаються манометри, проградуйовані в технічних атмосферах ($1 \text{ ат} = 1 \text{ кг/см}^2 = 0,9806 \text{ бар}$). Невеликі манометричні тиски можна вимірювати в метрах водяного стовпа ($1 \text{ м.вод.ст.} = 9806,6 \text{ Па} = 0,09806 \text{ бар} = 0,1 \text{ ат}$).

В практиці теплотехнічних і гідродинамічних розрахунків використовується тільки абсолютний тиск, який складає:

$$P = P_m + B, \quad (2.1)$$

де P_m – манометричний (надлишковий тиск).

Для вимірювання невеликих надлишкових тисків еталонним приладом є рідинний U-подібний манометр, який можна застосовувати і для вимірювання різниці тисків. Надлишковий тиск в U-подібній трубці манометра врівноважується стовпом рідини висотою h . Тоді за основним рівнянням гідростатики надлишковий тиск дорівнюватиме:

$$P_m = h \cdot \rho \cdot g, \quad (2.2)$$

де ρ – густина рідини в манометрі,

g – прискорення вільного падіння.

Як рідину в таких манометрах найчастіше використовують ртуть або воду.

Для прецизійних вимірювань такими манометрами необхідно враховувати залежність густини рідини від температури, залежність g від географічної широти і коефіцієнта термічного розширення матеріалу трубок, з якого виготовлене U-подібне коліно. Такі похибки рідко становлять в сумі

більше 0,5% від величини тиску, розрахункові формули для визначення поправок до формули (1.1) наводяться в спеціальній літературі.

В практиці вимірювання надлишкових тисків широкого використання набули трубчасті, мембранні та пружинні манометри, які відрізняються простотою конструкції. Точність вимірювань характеризується класом точності манометра (допустимим відсотком похибки). Найкращі, так звані зразкові, манометри мають клас точності 0,2 або 0,25. Точність трубчастих манометрів обмежена наявністю залишкових деформацій трубки, які з'являються під дією надлишкового тиску в процесі експлуатації манометра. В паспорті манометра наведені величини поправок, які необхідно вводити під час експлуатації приладу. Зазначимо, що покази трубчастих манометрів нестабільні і їх потрібно тарувати не рідше одного разу в рік. Крім трубчастих манометрів промисловість випускає також трубчасті мановакуумметри і вакуумметри, які використовуються для вимірювання тисків, менших за атмосферний.

Для вимірювання різниці або перепаду тиску застосовують прилади, які називають диференціальними манометрами. Найпростіший з них – це U-подібний манометр, про який вже йшлося вище. В лабораторних умовах використовують дифманометри типу ДТ з товстостінними каліброваними трубками, робочими рідинами в яких можуть бути вода, чотирихлористий вуглець, ртуть тощо.

2.2 ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУР

В теплотехніці температура є, мабуть, головною фізичною характеристикою. З точки зору молекулярно-кінетичної теорії газів температура є мірою інтенсивності теплового руху молекул. Безпосередньо виміряти цю енергію на практиці неможливо. Тому для вимірювання температури використовують побічні методи, а прилади для її вимірювання називають термометрами. Принцип дії термометра полягає в тому, що між речовиною, температура якої вимірюється, і робочим тілом термометра з часом установлюється стан термічної рівноваги. Зі зміною температури робоче тіло термометра переходить в інший рівноважний стан, за зміною якого можна робити висновки про зміну температури. Кількісна міра зміни стану залежить від фізичних властивостей робочого тіла термометра. Для більшості робочих тіл ця залежність є нелінійною, оскільки їх теплосміст є функцією від температури. Це означає, що залежно від того, яке робоче тіло має термометр, температурна шкала буде більше або менше нерівномірною в різних своїх частинах. Рідинні (ртутні або спиртові) термометри з цієї причини малопридатні для точних вимірювань температур. Вимірювання температури газовими термометрами є точнішими завдяки властивості газів поводити себе в діапазоні невеликих тисків майже однаково.

В дилатометричних рідинних термометрах використовується залежність лінійних або об'ємних розмірів робочого тіла від температури. Най-

частіше використовуються рідинні (ртутні чи спиртові) дилатометричні термометри. Ртутні дилатометричні термометри виготовляють для вимірювання температур в межах від -30 до 550°C . Якісними лабораторними ртутними термометрами з дотриманням правил вимірювання можна виміряти температуру в газових і рідинних середовищах з точністю $0,01-0,03^{\circ}\text{C}$. Для вимірювання невеликих інтервалів температур (наприклад, $180-200^{\circ}\text{C}$) використовують укорочені термометри, як є капіляром, кулька якого заповнена рідиною не повністю. Термін “укорочений -20 ” означає, що це такий термометр, довжина якого в 20 раз менша, ніж у термометра зі шкалою від 0 до 200°C . У випадках, коли потрібно, щоб після вимірювань рівень ртуті залишався незмінним, фіксуючи виміряну температуру, використовують максимальний термометр. В ньому кулька з робочою рідиною з'єднана з капіляром через вузький переріз. Під час нагрівання рідина проштовхується крізь вузьке місце, а в процесі охолодження стовпчик ртуті в цьому місці обривається, фіксуючи максимальну температуру. Повертають рідину в кульку енергійним струшуванням.

Рідинними термометрами зручно вимірювати температуру всередині будь-яких посудин, трубопроводів. Вони розташовуються в спеціальних гільзах. В процесі розташування термометра в гільзі необхідно забезпечити надійний контакт між стінками і дном гільзи з головкою термометра. Для цього гільзу засипають порошком металу (найчастіше міді) або заливають гільзи рідиною з високим коефіцієнтом теплопровідності. Похибки в процесі вимірювань температури термометрами виникають внаслідок поганого теплового контакту термометра з гільзою, радіаційного теплообміну, тепловідводу вздовж стінок термометра і гільзи, нерівномірності шкали термометра внаслідок температурного розширення деталей термометра і нелінійності залежності коефіцієнта об'ємного розширення робочого тіла від температури.

Завдяки простоті конструкції, дешевизні, надійності і відносно високій точності вимірювань дилатометричні рідинні термометри знайшли широке практичне використання. До раніше зазначених недоліків цих приладів необхідно також віднести складність автоматизації процесів вимірювання і перетворення показів термометрів в електричний сигнал.

На відміну від дилатометричних термометрів, термопари є активним електричним датчиком температури, придатним для точного вимірювання температур не лише в газових або рідинних середовищах, а й на твердих поверхнях. Завдяки своїй простоті, надійності, стабільності, простоті автоматизації і можливості дистанційного контролю вимірюваної температури вони надзвичайно широко використовуються для контролю і вимірювання температур в лабораторній практиці і в промисловості.

Термопара – це спай двох різнорідних провідників (дротів з різного матеріалу), які утворюють спільне електричне коло. Якщо температури місць спаю дротів неоднакові, то виникає термоелектрорушійна сила і по колу тече струм. Значення термо-е.р.с., мкВ пропорційне різниці температур:

$$E = \alpha(T_1 - T_2), \quad (2.3)$$

де α вимірюється в мкВ/К і називається коефіцієнтом термо-е.р.с.

При цьому температура в проміжних точках дротів не впливає на величину термо-е.р.с., якщо драти мають однорідну структуру. Основним правилом роботи з термопарами є те, що якщо в коло термопари ввімкнений ще один провідник, кінці якого мають однакові температури, то він не впливає на значення термо-е.р.с. Це дає змогу вмикати в коло прилад для вимірювання термо-е.р.с., розташовуючи його на значній відстані від гарячого спаю термопари. Для провідників термопар використовують дріт діаметром від 0,1 до 2 мм.

Міжнародною електротехнічною комісією рекомендовано градувальні таблиці для шести типів термопар (в дужках позначення, що рекомендовані Національним інститутом стандартів США):

Мідь-константан [МКн], (Т)

Константан – сплав міді з нікелем, складу $\text{Cu}_{57}\text{Ni}_{43}$, марка МНМц 43-0,5. Термопара мідь-константан (МКн) недорога, точна і дозволяє надійно вимірювати температуру від -260 до $+400^\circ\text{C}$, причому верхня границя обмежується можливістю окислення міді.

Залізо-константан [ЖКн], (J)

Термопара залізо-константан широко використовується до 750°C . Вона дозволяє вимірювати вдвічі більшу температуру, ніж термопара МКн.

Її перевага також в можливості використання як в окислювальних, так і в відновлювальних середовищах, причому в останньому випадку робочі температури можуть бути більшими. Однак, оскільки залізо менш однорідне, ніж мідь, в цій термопарі спостерігаються паразитні термо-е.р.с. вздовж обох віток, а її точність приблизно вдвоє нижча (як і ціна) порівняно з термопарою мідь-константан.

Хромель-константан [ХК], (Е)

Хромель – сплав складу $\text{Ni}_{90}\text{Cr}_{10}$ (ХХ9,5), який деколи позначають як хромель-Р. Термопара ХК має найвищу термо-е.р.с. із шести стандартизованих термопар. Вона може використовуватись приблизно від -250 до 750°C , в тому числі і в слабоокислювальній або в відновлювальній атмосфері. Висока термо-е.р.с. робить цю термопару придатною для диференційного вимірювання температури.

Хромель-алюмель [ХА], (К)

Алюмель досить складний нікелевий сплав складу $\text{Ni}_{94}\text{Mn}_3\text{Al}_2\text{Si}$, (НМцАК 2-2-1), розроблений як термопарний матеріал з термо-е.р.с. протилежного знаку ніж термо-е.р.с. хромелю. Пара хромель-алюмель має по-

стійну термо-е.р.с. ≈ 40 мкВ/К в інтервалі температур 250-1000°C. Термопара ХА може короткий час працювати до 1300°C, вона більш окисостійка, ніж інші термопари і може використовуватися до температур 1200°C без швидкого окислення. У відновлювальній атмосфері термопару ХА використовувати не можна. Для низьких температур її характеристики приблизно такі ж, як мідь-константан, хоча для вимірювань температур нижче кімнатної рекомендується інший склад хромелю: $\text{Ni}_{64}\text{Fe}_{25}\text{Cr}_{11}$ (хромель – Х).

Вольфрам-вольфрамреній [BP5/20 і BP10/20], (С і G).

Ці термопари, що складаються з тугоплавких металів, можна використовувати до температур 2700-3000°C. Потрібно пам'ятати, що термопари типу ВР нестабільні в окислювальному середовищі і повинні використовуватися в вакуумі або в атмосфері водню чи інертного газу. Не дивлячись на відносну крихкість чистого вольфраму, за кордоном широко використовуються термопари (W-W+Re₂₆ – типу G).

Платина-платинородій (R, S, B).

Це базисні термопари, які відіграють велику роль в термометрії внаслідок прекрасних механічних і хімічних властивостей і високого ступеня гомогенності. Термопари мають такий склад: ПР 10/0 – (Pt–Pt₉₀+Rh₁₀ тип S), ПР 13/0 – (Pt–Pt₈₇Rh₁₃, тип R), ПР 30/6 – (Pt₇₀+Rh₃₀ – Pt₉₄+Rh₆, тип В). Термопари S, R і B, які постачаються, мають або високоякісну калібрувальну, або нормальну стандартну шкалу. Їх можна тривалий час використовувати на повітрі та в інертній атмосфері. У вакуумі термопари цих типів використовувати не можна. Порівняльні характеристики всіх термопар показані в додатку А.

Для вимірювання температур термопарами один із спаїв термостатують при 0°C. Таблиці саме і складені для випадку, коли холодний спай має 0°C. Якщо з якихось причин спай не вдається термостатувати при 0°C, то в цьому випадку, знаючи, що термо-е.р.с. пропорційна різниці температур T_1 - T_2 , для визначення температури необхідно внести поправку на температуру холодного спаю. Для цього іншим термометром (наприклад, ртутним) вимірюють температуру навколишнього середовища, в якому знаходяться холодні спаї термопари і віднімають від різниці T_1 - T_2 . За визначеним ΔT з таблиць (Додаток А) чи графіків визначають температуру. Клас точності ртутного термометра, яким вимірюють температуру навколишнього середовища для врахування поправки на холодний спай, не повинен бути нижчим за клас точності термопари.

Робота термометрів опору та термісторів базується на зміні електричного опору металів і напівпровідників в процесі охолодження чи нагрівання, яка пропорційна зміні температури. На відміну від термопар, термометри опору потребують тарування. Тарування здійснюється по зразковому термометру. Електроопір вимірюють мостовим методом, а в області

температур, де опір різко змінюється, можна використовувати логометр, що значно спрощує процедуру вимірювань.

2.3 ВИМІРЮВАННЯ ВОЛОГОСТІ ТІЛ

Вологість твердих тіл, сипких та інших матеріалів визначається відношенням маси води, що міститься в них, до загальної маси вологого матеріалу. Найпростіший спосіб її вимірювання – зважування до і після висушування, для чого є спеціальні сушилки. Цей спосіб хоча й точний, але тривалий. Для експрес-вимірювань застосовують вологоміри, в яких використовується залежність однієї з фізичних величин, залежно від типу сенсора, від вологості.

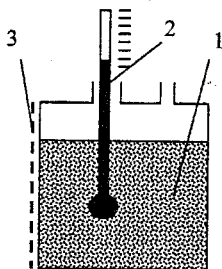


Рисунок 2.1 –
Гігрометр Ламбрехта

Рисунок 2.1 – Гігрометр Ламбрехта

В аспіраційному психрометрі та психрометрі Августа вимірюється різниця показів сухого і змоченого термометрів.

Останнім часом великого поширення набули електронні вологоміри, в сенсорах яких характеристикою вологості є зміна електроопору чи електроємності шару матеріалу між електродами. Такі вологоміри зручні в роботі, компактні, але потребують регулярного тарування за аспіраційним психрометром, внаслідок зміни властивостей матеріалу між електродами.

2.4 ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТ

Кількість речовини, що проходить за одиницю часу по трубопроводах, каналах тощо називають витратою речовини. Кількість і витрату речовини визначають в об'ємних ($\text{м}^3/\text{с}$, $\text{м}^3/\text{год}$) або масових ($\text{кг}/\text{с}$, $\text{кг}/\text{год}$) одиницях вимірювання.

Прилади, які вимірюють витрату, називають витратомірами. Прилади, які вимірюють кількість речовини називають лічильниками. Залежно від виду речовини вони діляться на витратоміри або лічильники води, пари, газу тощо. Витратоміри бувають показувальними і самописними. Для визначення витрати і кількості рідини, газів, сипучих тіл, пари найчастіше користуються такими методами: змінного перепаду тиску, швидкісним, об'ємним і ваговим. Відповідно до методів вимірювань вимірювальні прилади розділяються на такі групи: витратоміри із звужувальним пристроєм, швидкісні витратоміри і лічильники, об'ємні лічильники, ротаметри тощо.

Найширшого використання для вимірювання витрат рідин і газів, що протікають трубопроводами, набули витратоміри зі звужувальним пристроєм. Принцип їх дії оснований на зміні потенціальної енергії речовини, витрату якої визначають при протіканні через п'єзично звужений переріз трубопроводу. Такі витратоміри придатні для вимірювання кількості речовини, яка протікає по трубопроводу, лише за умови заповнення речовиною всього поперечного перерізу труби. Вихідними рівняннями для визначення кількості речовини при використанні витратомірів із звужувальним пристроєм є рівняння неперервності потоку і рівняння Бернуллі. Витратомір складається із звужувального пристрою, що встановлюється в трубопроводі і служить для місцевого стиснення потоку (первинний перетворювач), диференційного манометра, призначеного для вимірювання різниці статичних тисків середовища до і після звужувального пристрою (вторинний прилад), і з'єднувальних ліній (двох імпульсних трубок), що зв'язують між собою обидва прилади.

Звужувальний пристрій має круглий отвір, розташований концентрично відносно стінок труби, діаметр якого менший від внутрішнього діаметра трубопроводу. Для вимірювання витрат середовища найпоширенішими є такі звужувальні пристрої: витратомірна діафрагма, витратомірне сопло і сопло Вентурі (рис.2.2).

Експериментальним шляхом для таких звужувальних пристроїв знайдено точні значення коефіцієнта витрати α , що дозволяє використовувати їх без попереднього градування. Точність вимірювання витрати за допомогою діафрагми залежить від гостроти вхідного краю отвору діафрагми. Отвір має бути симетричним і його край не повинен мати скруглень, задирок і зазубнів.

Дифманометр може бути будь-якої конструкції, наприклад, показувальним U-подібним скляним манометром, описаним вище, хоча часто для зручності в систему ставлять самописний прилад із вбудованим інтегратором. Шкали таких манометрів часто градуують в об'ємних або масових одиницях витрат.

Витратомір із звужувальним пристроєм, що має електричну дистанційну передачу показів, має безшкальний дифманометр-витратомір (про-

міжний перетворювач), який працює в комплекті з показувальним або самописним вторинним приладом.

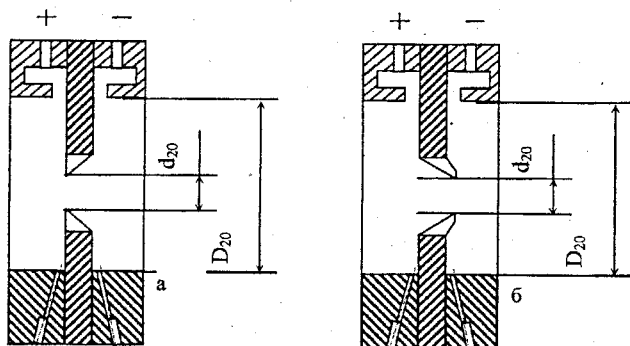


Рисунок 2.2 – Нормалізовані діафрагми і сопла
 а) камерна (вгорі) і безкамерна (внизу) діафрагми;
 б) камерне (вгорі) і безкамерне (внизу) сопла;

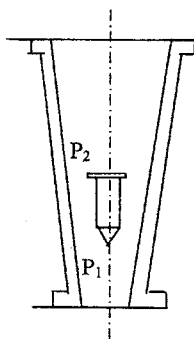


Рисунок 2.3 – Схема ротаметра

Ротаметри відносяться до приладів постійного перепаду тиску, які використовуються для вимірювання об'ємної витрати рідини або газу. Такі прилади установлюються в вертикальних трубопроводах. Зміна витрати викликає в ротаметрі відповідну зміну прохідного перерізу, в результаті чого перепад тиску в приладі залишається сталим. Ротаметри мають рівномірну шкалу, що разом із сталою втратою тиску є їх перевагою. В залежності від конструкції ротаметри ділять на скляні і металеві.

Перші з них є лабораторними показувальними приладами, а другі – промисловими безшкальними приладами з диференційно-трансформаторним перетворювачем, що працюють в комплекті з вторинними автоматичними приладами. На рис. 2.3 показана схема ротаметра, що складається з вертикальної скляної або металеві конусної трубки, всередині якої вільно переміщується циліндричний поплавков (ротатор), виготовлений з нержавіючої сталі, дюралюмінію або ебоніту. Положення поплавка в конусній трубці визначає собою величину кільцевого зазору, що утворюється між трубою і поплавком при проходженні речовини. При підніманні поплавка цей зазор збільшується, а при опусканні – зменшується. Ротаметри випускаються ді-

аметром умовного проходу 3-150 мм, на робочий тиск 0,6-32 МПа. Клас точності приладів 1; 1,5; 2,5; 4.

Для зменшення похибок експериментів при виконанні лабораторних робіт на фізичних моделях необхідно дотримуватись акуратності в роботі, старанно, точно і правильно знімати покази з шкал приладів, виконувати вказівки і рекомендації викладачів і обслуговуючого персоналу.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

- 1 Які ви знаєте прилади для вимірювання температур, витрат, тисків?
- 2 Чим відрізняються показувальні прилади від самописних?
- 3 Які тиски не можна вимірювати манометрами і чому?
- 4 Яка принципова різниця в роботі дифманометрів і ротаметрів?
- 5 Для вимірювання яких фізичних величин використовують термопари?
- 6 Для чого використовуються звужувальні пристрої?
- 7 Що таке гігрометри і для вимірювання яких величин вони використовуються?
- 8 Яка різниця між аспіраційним психрометром і психрометром Августа?
- 9 За яким принципом працюють дилатометричні термометри?
- 10 Що таке термопара – датчик чи показувальний прилад?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3

ПОВІРКА ПРУЖИННИХ МАНОМЕТРІВ

МЕТА РОБОТИ: вивчити будову зразкового вагопоршневого манометра і отримати навички його використання для повірки пружинних манометрів

ЗАВДАННЯ РОБОТИ:

- виконати повірку зразкового пружинного манометра для прямого і зворотного ходу в десяти точках, рівномірно розподілених по шкалі. За результатами повірки визначити похибки і варіації показів і накреслити графік розподілу похибок в діапазонах вимірювань. При виявленні систематичної похибки зробити висновки про спосіб її усунення та встановити відповідність приладу його класу точності.

- виконати повірку робочого пружинного манометра відносно контрольного в десяти точках. Визначити похибки і варіації показів, накреслити графік розподілу похибок. Зробити висновок щодо необхідності зниження похибки та щодо відповідності робочого манометра його класу точності.

- результати вимірювань і розрахунків занести в таблиці 3.1 та 3.2.

3.1 ЗРАЗКОВИЙ ВАГОПОРШНЕВИЙ МАНОМЕТР

Принцип дії поршневого манометра базується на врівноваженні сил, створених, з одного боку, тиском, що вимірюється, а з іншого – масою вагів і поршня в циліндрі. Зразкові поршневі манометри застосовують для перевірки пружинних манометрів і розділяються на три групи: 1-го, 2-го та 3-го розрядів. Прилади 1-го розряду мають клас точності 0,02 і служать для перевірки поршневих манометрів 2-го розряду. Прилади 2-го розряду мають клас точності 0,05 і призначені для перевірки зразкових поршневих і пружинних манометрів. Прилади 3-го розряду мають клас точності 0,2 і застосовуються для перевірки робочих пружинних манометрів.

Вагопоршневий манометр складається з вагопоршневої колонки і гвинтового преса, заповненого машинним маслом. Колонка складається з вертикального циліндра, в якому переміщується поршень. В верхній частині поршень має тарілку для встановлення змінних вагів. Колонка, насос і гвинтовий прес з'єднані каналами з стійками, які мають штуцери для підключення манометрів. Голчасті вентиля служать для підключення манометрів, колонки, зливу масла. Протягом всього часу роботи необхідно, щоб поршень був занурений в канал колонки на 2/3 своєї довжини. Оскільки перевірка виконується для прямого і зворотного ходів, перед встановленням або зняттям ваг манометр, який перевіряється, повинен бути відключений від колонки за допомогою вентиля. При досягненні верхньої межі вимірювання, манометр, який повіряється, залишають під навантаженням протягом двох-трьох хвилин, після чого навантаження знижують.

Ефективна площа поршня S дорівнює $1,0 \text{ см}^2$, маса однієї ваги m , це створює номінальний тиск: $P_n = \frac{m \cdot g}{S}$

Для перевірки робочих манометрів колонка відключається вентилям і тиск створюють гвинтовим пресом. В такому випадку за еталон беруть покази зразкового пружинного манометра. Зразкові пружинні манометри, що розраховані на тиск до 25 МПа мають клас точності 0,1; 0,25; 0,4.

3.2 РОЗРАХУНКОВІ ФОРМУЛИ

Абсолютна похибка Δ пружинного манометра визначається як різниця між його показами P_i і дійсним тиском P_g , котрий створюється вагопоршневим манометром. Максимальна зведена похибка пружинного манометра обчислюється відносно межі шкали $P_{\max}$:

$$\gamma_{\max} = \frac{\Delta_{\max}}{P_{\max}} \cdot 100\% . \quad (3.1)$$

Дійсний тиск визначається за формулою:

$$P_g = \frac{a}{b} \cdot P_{H20} , \quad (3.2)$$

де $a = g/g_{20}$ – поправковий множник до прискорення сили тяжіння на широту і висоту m . Вінниці над рівнем моря;

$$g = 9,78049(1 + 0,528 \cdot 10^{-2} \cdot \sin^2 \varphi - 0,6 \cdot 10^{-5} \cdot \sin^2 2\varphi) - 0,3086 \cdot 10^{-3} \cdot H,$$

де $\varphi = 46^\circ 30'$ - широта м. Вінниця;

$H = 100$ м – висота над рівнем моря;

$g_{20} = 9,8066$ – нормальне прискорення сили тяжіння, м²/с;

$b = 1 + (\alpha + \beta)(t - 20)$ - поправочний множник на теплове розширення поршня і циліндра;

α, β - коефіцієнти теплового розширення матеріалу поршня і циліндра (для сталі $\alpha = 11 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹; для латуні $\beta = 19 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹);

$$P_{H_{20}} = \frac{G_T + \sum G_i}{S_{20}}, \text{ кгс/см}^2 \text{ – номінальний тиск, розвинутий манометром;}$$

G_T, G_i - ваги тарілки з поршнем і вантажем відповідно, кгс;

S_{20} – площа поршня для 20°C.

Максимальна абсолютна похибка варіації показів обчислюється так:

$$\Delta_{\max b} = |\Delta_{\bar{M}i} - \Delta_{\bar{B}i}|, \quad (3.3)$$

де $\Delta_{\bar{M}i}, \Delta_{\bar{B}i}$ – найбільші і найменші значення абсолютних похибок для прямого і зворотного ходів Δ_{np}, Δ_{zv} в досліді з вагою m_i .

Середнє арифметичне значення варіації показів $\bar{b}$ визначається так:

$$\bar{b} = \frac{\sum_{i=1}^n b_i}{n}, \quad (3.4)$$

де n – кількість дослідів.

3.3 ТАБЛИЦІ ДОСЛІДНИХ І РОЗРАХУНКОВИХ ДАНИХ

Таблиця 3.1 – Результати перевірки зразкового (контрольного) пружинного манометра

№ досліду	Маса ваги, Н	Тиск вагопоршневого манометра, Па		Покази зразкового пружинного манометра, Па		Абсолютна похибка, Па		Варіація, Па
		Номінальний	Дійсний	Прямий хід	Зворотний хід	Прямий хід	Зворотний хід	
i	m_i	P_{ni}	P_{gi}	P_{np_i}	P_{zv_i}	Δ_{np_i}	Δ_{zv_i}	b_i
1								
...								
10								

Таблиця 3.2 – Результати перевірки робочого пружинного манометра

№ досліду	Покази зразкового пружинного манометра, Па		Покази робочого пружинного манометра, Па		Абсолютна похибка, Па		Варіація, Па
	Прямий хід	Зворотний хід	Прямий хід	Зворотний хід	Прямий хід	Зворотний хід	
i	$P_{прi}$	$P_{звi}$	$P_{р прi}$	$P_{р звi}$	Δp_i	Δz_i	b_i
1							
...							
10							

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

- 1 Яке основне призначення вагопоршневих манометрів?
- 2 Чи можна вагопоршневий манометр використовувати для вимірювання тиску?
- 3 Які ви знаєте конструкції манометрів для вимірювання тиску в трубопроводах?
- 4 Як можна розширити діапазон вимірювання для вагопоршневих манометрів?
- 5 Для чого проводять повірку пружинних манометрів?
- 6 Який тиск вимірюють вагопоршневим манометром, абсолютний чи надлишковий і чому?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4

ВИМІРЮВАННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ ДВООКИСУ ВУГЛЕЦЮ

МЕТА РОБОТИ: здобути навички застосування газоаналізувального обладнання

ЗАВДАННЯ РОБОТИ

- ознайомитися з принципом дії та будовою приладу ПНГТ;
- виміряти концентрацію двоокису вуглецю в повітрі.

4.1 ПРИЗНАЧЕННЯ, ПРИНЦИП ДІЇ ТА БУДОВА ПРИЛАДУ ПНГТ

Прилад ПНГТ використовується для визначення характеристик димових газів котельні.

Прилад вимірює:

- об'ємний відсотковий склад двоокису вуглецю CO_2 в димових газах;
- температуру димових газів;
- теплоту згоряння димових газів.

Принцип вимірювання концентрації CO_2 оснований на залежності теплопровідності димових газів від концентрації в них двоокису вуглецю.

Вимірювання виконуються за допомогою двох платинових ниток, які нагріваються електричним струмом, що проходить через них. Нитки з'єднані за схемою вимірювального моста. Залежно від концентрації CO_2 змінюється температура ниток і їх електричний опір. Розбалансування вимірювального моста характеризує концентрацію CO_2 .

Температура димових газів вимірюється термоелектричним сенсором (термопарою).

Визначення теплоти згоряння газів Q_{ng} базується на методі низькотемпературного каталітичного спалювання горючих компонентів димових газів на каталітично активних платинових елементах, увімкнених в мостову схему. При горінні газів змінюється електричний опір елементів, і мостова схема розбалансовується.

Головними елементами приладу (рис. 4.1) є мікрокомпресор ВК для прокачування димових газів, фільтри для поглинання водяної пари та очищення повітря, кран-дозатор для дозування газової проби, уповільнювач для збільшення часу проходження через прилад димових газів, міліамперметр для визначення розбалансування мостової схеми.

4.2 ПІДГОТОВКА ПРИЛАДУ ДО РОБОТИ

Підготовка приладу до роботи складається з перевірки фільтрів та перевірки герметичності газових трактів. Фільтри повинні бути заповнені абсорбентами потрібної якості. Якість абсорбентів перевіряється за їх кольорами: аскарід повинен бути коричневим, а силікагель – блакитним.

Газовий тракт вимірювання двоокису вуглецю перевіряється розрідженням, яке через п'ять хвилин після припинення роботи мікрокомпресора не повинно знижуватися більше, ніж на один відсоток.

Газовий тракт вимірювання Q_{ng} перевіряється за допомогою мікрокомпресора приладу та U-подібного дифманометра. Мікрокомпресором створюється тиск 500 мм. вод. ст., який після відключення компресора витримується п'ять хвилин і потім вимірюється знову. Різниця між вимірюваннями не повинна перевищувати 1 %.

4.3 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

До роз'єму на боковій стінці приладу приєднати термопару. Ручку галетного перемикача встановити у відповідне положення залежно від того, який з параметрів вимірюється.

Для вимірювання вмісту двоокису вуглецю ручку триходового крану перевести в положення „Аналіз”. Ввімкнути мікрокомпресор на 10 хвилин, після чого вимкнути його. Занести покази мілівольтметра в таблицю 4.1. За рис. 4.4 визначити вміст CO_2 . Виконати п'ять дослідів.

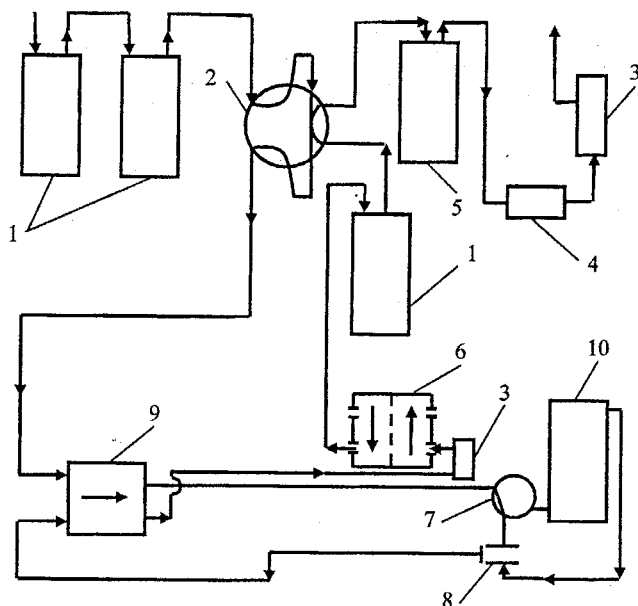


Рисунок 4.1 – Схема приладу ПНГТ
 1 – фільтр; 2 – кран-дозатор; 3 – ротаметр; 4 – блок чутливих елементів; 5 – уповільнювач; 6 – мікрокомпресор; 7 – кран; 8 – трійник; 9 – блок плечових елементів; 10 – фільтр з аскаритом

Таблиця 4.1 – Вміст двоокису вуглецю в пробі

№ досліду	Покази приладу, мВ	Вміст CO ₂ , %	Середнє значення, %
1			
2			
3			
4			
5			

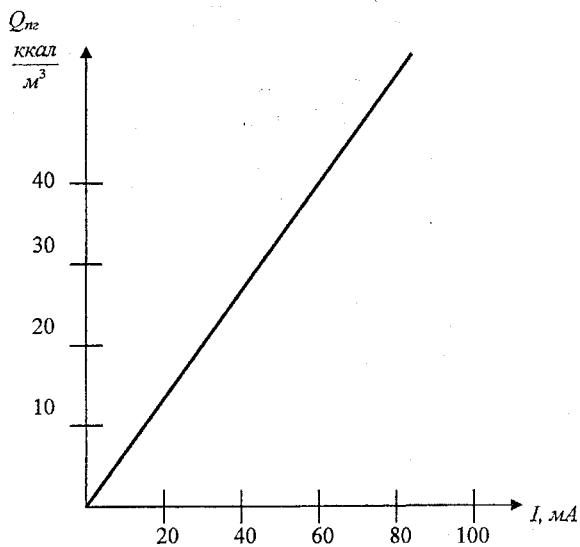


Рисунок 4.2 – Графік для визначення теплоти згоряння димових газів

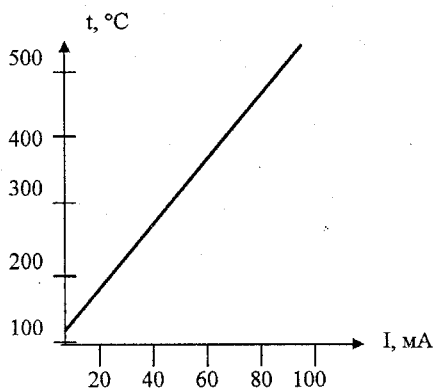


Рисунок 4.3 – Градувальна крива для термопарі (зразок)

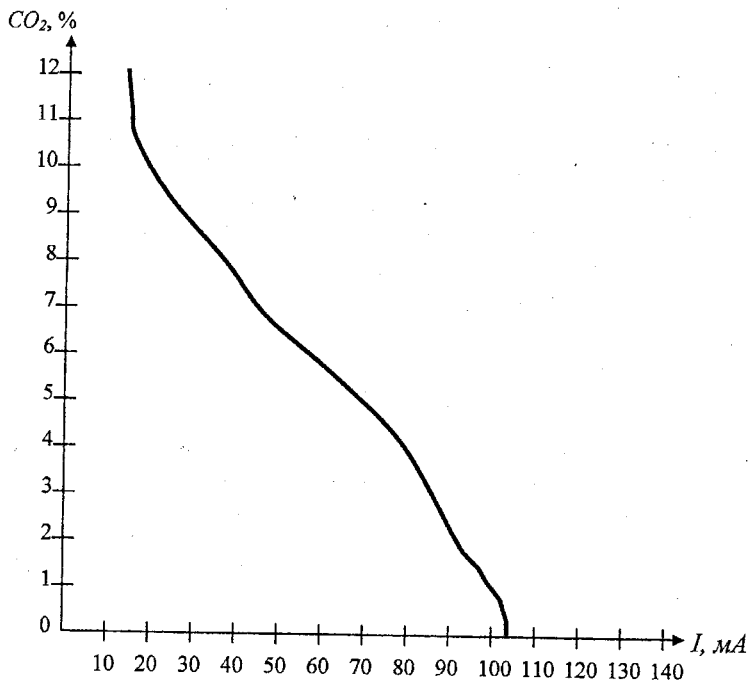


Рисунок 4.4 – Графік для визначення вмісту CO_2 в димових газах

Температуру газу визначають за формулою:

$$t_z = 0,95 \cdot (t_0 - 20) + t_n,$$

де t_z , t_0 – температури газів і приміщення відповідно.

Температура t_n визначається за кривою, побудованою за даними додатку А для відповідної термопар (рис. 4.3).

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

- 1 З якою метою використовують переносні газоаналізатори?
- 2 Яке призначення приладу ПГНТ?
- 3 Яке призначення мікрокомпресора в приладі ПНГТ?
- 4 Як виміряти вміст двоокису вуглецю в відхідних газах?
- 5 Для чого вимірюють температуру відхідних газів?
- 6 Для чого в приладі ПНГТ використовують фільтри?

ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУР

МЕТА РОБОТИ: визначити придатність термометрів до експлуатації.

ЗАВДАННЯ РОБОТИ:

- визначити клас точності приладу для вимірювання температур;
- побудувати індивідуальний градуовальний графік для термонари;
- визначити придатність до експлуатації логометра.

5.1 ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Дослідження приладів для вимірювання температур виконуються на установці, схема якої показана на рис.5.1. В корпусі знаходиться теплоелектронагрівач (ТЕН), температура якого вимірюється зразковим скляним ртутним термометром та приладами 5, 6, 7, 8. В першому приладі первинним пристроєм є термоелектричний перетворювач (термопара), а вторинним – мілівольтметр, в другому приладі первинним пристроєм є термометр опору, вторинним – логометр.

Повірка першого приладу виконується окремо для термонари та мілівольтметра, за зразковим скляним термометром. Повірка другого приладу (термометр опору та логометр в комплекті) проводиться за показами вторинних приладів.

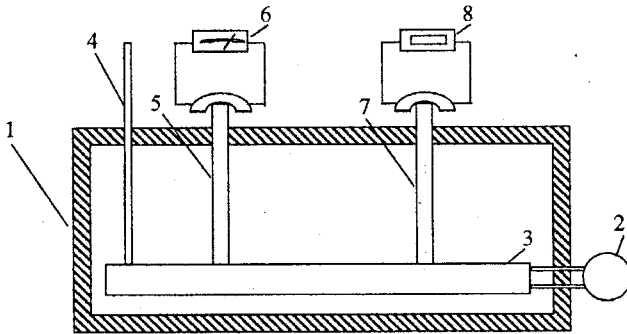


Рисунок 5.1 – Схема лабораторної установки
 1 – корпус; 2 – блок живлення; 3 – ТЕН; 4 – зразковий термометр; 5 – термоелектричний перетворювач (термопара); 6 – мілівольтметр;
 7 – термометр опору; 8 – логометр.

5.2 ХІД РОБОТИ

5.2.1 Визначення класу точності приладу для вимірювання температур

- 1) Визначення похибки е.р.с. термоперетворювача відносно стандартних номінальних значень статичних характеристик.
- 2) Порівняння похибки е.р.с. термоперетворювача з допустимими.
- 3) Побудова градуювальної характеристики термоперетворювача.
- 4) Знаходження похибки визначення температур за градуювальним графіком відносно показів зразкового термометра.
- 5) Визначення класу точності вимірювального приладу.

Виконання роботи починається після включення викладачем ТЕНа в електромережу. Покази зразкового термометра, мілівольметра і логометра записуються одночасно. Заповнюють колонки 1 і 2 таблиці 5.1. Фактична температура зразкового термометра визначається за формулою:

$$t_{\text{факт}} = t + \delta \quad (5.4)$$

де δ – поправка на виступаючий стовпчик ртуті, яку визначають за формулою:

$$\delta = (t - t_k) \cdot \gamma \quad (5.5)$$

t – температура на термометрі 4;

t_k – кімнатна температура;

γ – коефіцієнт видимого розширення термометричної рідини (для ртуті $\gamma = 0,0012$);

Номінальна термо-е.р.с. E_n та допустима похибка ΔE_n (колонки 3 і 5 таблиці 5.1) визначаються за формулами таблиць 5.2 і 5.3 з врахуванням температури в лабораторії.

Далі необхідно заповнити колонку 4 таблиці 5.1 відповідно до значень температур зразкового термометра, які заносяться в колонку 1.

Таблиця 5.1 – Похибка термоперетворювача

№ досліду	Значення температур зразкового термометра	Термо-е.р.с., E , мВ	Номінальна термо-е.р.с. E_n , мВ	Похибка Δ , мВ	Допустима похибка, ΔE_n , мВ	Різниця похибок, мВ
0	1	2	3	4	5	6
1						
2						
...						
10						

За даними таблиці 5.1 будуватиметься графік залежності $t=f(E)$, який є індивідуальним градуювальним графіком для досліджуваної термопар.

З градуювального графіка визначають, якою повинна бути температура при номінальній термо-е.р.с. (тобто термо-е.р.с. при температурах зразкового термометра, розрахована за формулами табл. 5.2) і вносять у

відповідні колонки таблиці 5.4, яка використовується для визначення класу точності приладу для вимірювання температур. Параметри цієї таблиці визначаються при прямому та зворотному ходах, тобто при нагріванні та охолодженні установки. Для кожного з одержаних показників обчислюється похибка, найбільша з них визначає клас точності приладу.

Таблиця 5.2 – Формули для обчислення границь допустимих відхилень термо-е.р.с. термоелектричних перетворювачів від номінальних значень.

Умовне позначення номінальної статичної характеристики перетворювача	Діапазон вимірюваних температур, °C	Границя допустимого відхилення термо-е.р.с. від номінального значення, $\pm \Delta E$, мВ.
X_A (K)	0 – 300 300-1300	0,14 $1,14 + 0,22 \cdot 10^{-3} \cdot (t-300)$
X_K (L)	0 – 300 300 - 800	$0,14 + 0,2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,2 +$ $+ 0,52 \cdot 10^{-3} (t - 300)$

5.2.2 Визначення придатності до експлуатації комплекту термометр опору – логометр

Значення температур для прямого і зворотного ходу, визначені за шкалою логометра, заносяться в таблицю 5.5, туди ж вносяться значення температур, визначені за зразковим термометром. Визначається похибка вимірювання температури комплектом термометр опору – логометр, визначається похибка вимірювання температури і порівнюється з допустимою похибкою, визначеною за класом точності комплекту.

Кінцевою метою роботи є висновок про придатність або непридатність приладу як результат його лабораторної перевірки. В лабораторну перевірку первинних пристроїв (термопар та термоопорів) входить зовнішній огляд, перевірка опору струмоведучих частиц, випробування термометра. За результатами перевірки заповнюється таблиця, наведена в додатку Б.

Зовнішнім оглядом перевіряється наявність заводського маркування на головці або виводах термоперетворювачів.

Для вимірювання опору ізоляції електричних кіл для ТП і ТО застосовують мегомметри напругою 500 В.

Опори для термопар та термоопорів повинні бути не менше 5 МОм та 20 МОм, відповідно.

Випробування термопар виконують порівнянням термо-е.р.с. термопар, розташованої в кип'ятильнику, з номінальною статичною характеристикою з врахуванням поправки на температуру вільних кінців.

Випробування термоопорів виконують порівнянням опорів термоопорів з номінальною статичною характеристикою.

Допустимі відхилення опору R_0 дорівнюють $0,1 \pm 0,2\%$.

Допустимі відхилення Δt від температури t для термоопору дорівнюють:

$$\Delta t = 0,5 + 0,0065t.$$

Перевірка монтажу термометра вимагає контролю його відповідності галузевим нормам – „Установка первинних приладів для вимірювання і регулювання температури”.

Допустима похибка мілівольтметра і логометра розраховується за формулою:

$$\Delta\Pi = \frac{KT \cdot (t_k - t_n)}{100},$$

де KT – клас точності приладу;

t_k, t_n – температури, позначені на кінці і початку шкали приладу.

За результатами випробувань складається відповідний протокол за формою таблиці додатку Б.

Таблиця 5.3 – Апроксимувальні поліноми номінальних статичних характеристик перетворювачів.

Умовне позначення номінальної статичної характеристики перетворювача	Діапазон вимірюваних температур, °C	Апроксимувальні поліноми та їх коефіцієнти
ХА (К)	0-1300	$E = \sum_0^8 A_i t^i + 0,125 \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{t-127}{65} \right)^2 \right]$ $A_0 = 1,8533063 \times 10^{-2}$ $A_1 = 3,8918345 \times 10^{-2}$ $A_2 = 1,66445154 \times 10^{-2}$ $A_3 = -7,870237 \times 10^{-8}$ $A_4 = -2,2835786 \times 10^{-10}$ $A_5 = -3,5700231 \times 10^{-13}$ $A_6 = 2,9932909 \times 10^{-16}$ $A_7 = -1,2849849 \times 10^{-19}$ $A_8 = -2,2239974 \times 10^{-23}$
ХК (L)	0 - 800	$E = \sum_0^8 A_i t^i$ $A_0 = 0$ $A_1 = 6,32175 \times 10^{-2}$ $A_2 = 5,89073 \times 10^{-5}$ $A_3 = -8,03773 \times 10^{-8}$ $A_4 = 1,19515 \times 10^{-10}$ $A_5 = -2,46058 \times 10^{-14}$ $A_6 = -4,83261 \times 10^{-16}$ $A_7 = 8,23504 \times 10^{-19}$ $A_8 = -4,02693 \times 10^{-22}$

Таблиця 5.4 – Похибка приладу вимірювання температур

Термо- е.р.с., Е, мВ	Температура з графіка, t , °С	Температура за зразковим термометром		Абсолютна похибка Δt , °С		Зведена похибка, %
		прям. хід	звор. хід	прям. хід	звор. хід	
1	2	3	4	5	6	7

Таблиця 5.5 – Дослідження комплекту термометр опору – логометр

Температура за зразковим тер- мометром		Температура за досліджуванним приладом		Абсолютна по- хибка Δt , °С		Зведена похибка, %
прям. хід	звор. хід	прям. хід	звор. хід	прям. хід	звор. хід	
1	2	3	4	5	6	7

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

- 1 Яка різниця між потенціометром і логометром?
- 2 Що таке клас точності термометра?
- 3 Що таке основна і допустима похибки термометра?
- 4 Що таке номінальна статична характеристика приладу?
- 5 Чому для кожного термоперетворювача бажано мати індивідуальну градувальну характеристику?
- 6 Що таке первинний та вторинний пристрої?
- 7 Для чого використовують зразкові термометри?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6

ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ТА ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ

МЕТА РОБОТИ: *Визначити температуру киплячої води за результатами спостережень*

ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Правила обробки результатів вимірювань:

1 Визначають середнє арифметичне значення величини, яка вимірюється.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i|}{n}$$

2 Знаходять абсолютні похибки вимірювань

$$\Delta x_i = \bar{x} - x_i.$$

3 Знаходять середню абсолютну похибку окремих вимірювань

$$\Delta \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n |\Delta x_i|}{n}$$

4 Обчислюють середню квадратичну похибку окремих вимірювань

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2}{n-1}}$$

5 Відкидають промахи, якщо $\Delta x_i > 3S$.

6 Визначають середню квадратичну похибку середнього значення

$$\sigma = \frac{S}{\sqrt{n}}$$

7 За числом спостережень n та вибраною ймовірністю P_c з таблиць додатку Г визначають коефіцієнт Стюдента K_t .

8 Записують значення довірчого інтервалу для середнього значення вимірюваної величини.

$$\Delta_d = \pm K_t \cdot \sigma.$$

9 Записують результат вимірювань

$$x = \bar{x} \pm \Delta_d; P=0,95.$$

ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1 Визначити температуру води за декількома спостереженнями, використовуючи обладнання лабораторної роботи №5.

- 2 Обробити результати спостережень.
- 3 Зробити висновки.

ЗАДАЧІ

1 Для технічного манометра класу точності 1,5 нормальна температура навколишнього середовища 15 ± 25 °C, робоча температура 5 ± 50 °C. Чи однаковими похибками будуть характеризуватися покази приладу вимірювання температури навколишнього середовища $t = 5 \pm 50$ °C, при умові, що решта впливних величин мають нормальні значення?

2 Допустиме відхилення температури сталі на випуску з печі не повинно перевищувати ± 10 °C від заданого значення. Середнє квадратичне відхилення випадкової похибки $G = 8$ °C. Крім того, є систематична похибка - 6 °C від зсуву стрілки приладу в бік зниження. Визначити ймовірність, з якою результати вимірювання температур будуть входити до заданого інтервалу ± 10 °C. Випадкова похибка розподілена за нормальним законом.

3 Результати вимірювань температури кипіння води такі:

i	t_i , °C	i	t_i , °C	i	t_i , °C	i	t_i , °C
1	98,6	4	97,8	7	97,9	10	98,2
2	97,8	5	98,4	8	98,0	11	98,3
3	98,1	6	98,3	9	98,1	12	98,3

Вимірювання барометричного тиску не проводилось. Припускалось, що він дорівнює 760 мм рт. ст., а температура кипіння при цьому дорівнює 100 °C. Визначити, яка похибка - систематична чи випадкова, є найбільшою і як її зменшити.

4 Визначити межі довірчого інтервалу похибок вимірювання температур з ймовірністю 0,95, якщо при великому числі вимірювань отримано, що $\bar{X} = 1072$ °C, а дисперсія $D = 64$ (°C)². Припускається нормальний закон розподілу похибок.

5 В результаті великого числа вимірювань термо-е.р.с. був визначений довірчий інтервал $(16,73 \leq X \leq 17,27)$, мВ, з довірчою ймовірністю 0,997.

Визначити середню квадратичну похибку вимірювання термо-е.р.с. для нормального закону розподілу похибок.

6 Температура зливка металу, виміряна в п'яти різних точках, така: 975, 1005, 945, 950, 987 °C. Припускаємо, що дійсна температура в усіх точках однакова. Різниця в температурах спричинена систематичною похибкою за рахунок окислів на поверхні.

Оцінити найімовірніші значення температури зливка, а також довірчий інтервал систематичної похибки, який відповідає довірчій ймовірності $p = 0,9$, за умови, що похибки розподілені за законом Стюдента.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №7

ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОМАТИЧНОГО ПОТЕНЦІОМЕТРА КСП – 4

МЕТА РОБОТИ: Дослідити принцип дії та будову автоматичного потенціометра КСП – 4

ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ:

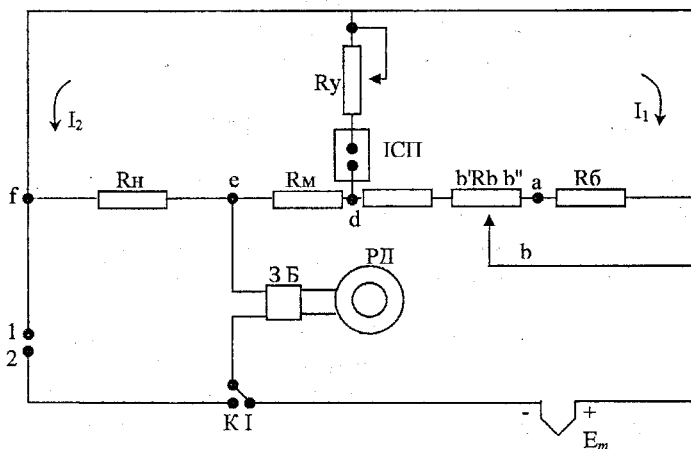


Рисунок 7.1 – Схема автоматичного потенціометра

Автоматичний потенціометр застосовується для компенсаційних вимірювань термоелектрорушійної сили (термо-е.р.с.) без участі людини. В них поправка на температуру вільних кінців вводиться автоматично. Живлення вимірювальної схеми виконується від джерела стабілізованого живлення.

Термо-е.р.с. термопар (E_m) врівноважується спадом напруги на ділянці $b-e$. Якщо $U_{b-e} \neq E_m$, то на вхід електронного блоку надходить різниця сигналів $\Delta U = U_{b-e} - E_m$, яка в електронному блоці перетворюється з постійного струму в змінний та підсилюється за напругою та потужністю. Результувальний вихідний сигнал з електронного блоку надходить на реверсний двигун, який переміщує повзун реохорда так, щоб $\Delta U = 0$, тоді $U_{b-e} = E_m$. Разом з переміщенням повзунка реохорда переміщується стрілка приладу та перо на папері. Стабілізує робочий струм джерело стабілізованого живлення ICP . Для автоматичного введення поправки на температуру вільних кінців є опір R_m .

Підсилювач

Ламповий підсилювач встановлено на задній стінці кронштейна приладу. Він містить вхідний пристрій, підсилювач напруги і потужності (вихідний каскад), силовий трансформатор і перехідний трансформатор. Навантаженням підсилювача є обмотка управління реверсного двигуна з конденсатором ємністю 1 мкФ. Потужність підсилювача до 25 Вт.

Пристрій руху діаграмної стрічки

Складається з синхронного електродвигуна СД54 з вбудованим редуктором та механізму керування. Механізм керування дає можливість отримати різні швидкості руху стрічки без відключення приладу.

Кронштейн

Висувається частково та повністю. В передній частині знаходиться каретка з закріпленими відрахунковими та записувальними пристроями, барабан, відхідний щиток, напрямна вісь діаграмної стрічки, тумблери включення приладу і приводу діаграмної стрічки, важіль переключення швидкостей руху.

На правій боковій стінці кронштейна розташовані запобіжник і ручки барабана. На лівій знаходяться: механізм управління, регулятор робочого струму. На внутрішніх стінках: джерело стабілізованого живлення, фільтр, синхронний двигун СД54, блок конденсаторів двигунів СД54 та РД09.

Реохорд

Основні елементи – спіраль і струмопровід. Спіраль виконана з паладієвого сплаву. Резистори вимірювальної системи приладу виконані у вигляді котушок з манганінового дроту. Панель з котушками закріплена на корпусі реохорда. Реохорд, пристрій для дистанційної передачі інформації, елементи вимірювальної схеми розташовані в верхній частині кронштейна.

Двигуни

СД54 має вбудований редуктор з передатним відношенням 1/25, номінальний обертальний момент 1 кгс/м. РД09 призначений для приведення вимірювального моста схеми в рівновагу. Пусковий момент до 4 кгс/м.

Джерело живлення стабілізоване, постійного струму. Первинна обмотка трансформатора живиться змінним струмом напругою 6,3В від обмотки силового трансформатора потенціометра. Схема приладу забезпечує стабілізовану напругу 5В.

Підготовка приладу до роботи

- 1 Залити масло у підшипники двигунів.
- 2 Перевірити наявність зазору між барабаном і переднім щитом.
- 3 Перевірити наявність зазору між напрямними, які притискають діаграмну стрічку, і переднім щитом.

- 4 Встановити діаграмну стрічку.
- 5 Підключити дроти живлення, приєднувальні дроти сенсора, заземлення.
- 6 Через спостережні вікна в корпусі реохордів впевнитись в тому, що контакти каретки знаходяться на спіралях реохордів.
- 7 Подати напругу живлення і переставити тумблери в положення включення.
- 8 Перевірити і встановити робочий струм. Ввімкнути тумблер подачі діаграмної стрічки під самописець каретки.
- 9 Встановити швидкість руху стрічки, включивши прилад.
- 10 Встановити вручну вказівник приладу на початкову відмітку шкали, попередньо встановивши важіль переключення швидкості на блокування.
- 11 Повернути ручку барабана проти годинникової стрілки, при цьому лінія запису повинна збігатися з початковою лінією діаграмної стрічки.

Підключення сенсорів

Сенсори підключаються до колодки зовнішнього підключення, номера клем 1А, 1В.

Визначення основної похибки приладу

1. Підвести вказівник потенціометра до тієї оцифрованої відмітки шкали, яка перевіряється, плавно змінюючи вихідний сигнал, за допомогою контрольного приладу в момент, коли вказівник встановиться проти заданої відмітки шкали. Визначити основну зведену похибку γ :

$$\gamma = \frac{A_0 - A}{H} \cdot 100\%,$$

де A_0 – номінальне значення вхідного сигналу, яке відповідає первинній відмітці шкали, мВ

A – виміряне приладом значення вхідного сигналу, мВ.

$$H = A_e - A_n,$$

де A_e, A_n – значення вхідного сигналу, що відповідають верхній та нижній межах вимірювання, мВ.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

- 1 Для всіх потенціометрів опір резистора $R_m = 509,5$ Ом (рис. 7.1). Чим зумовлено вибір такого значення опору?
- 2 Чи однаковими будуть значення опору мідного резистора R_n у потенціометрів КСП-2 з діапазоном вимірювань $-50 \div +100^\circ\text{C}$ градуювання ХК, $0 \div 600^\circ\text{C}$ градуювання ХК, $0 \div 600^\circ\text{C}$ градуювання ХА? Струми схеми для всіх потенціометрів однакові.
- 3 Замість термопар ХК до КСП-2 приєднали термопару МК (мідь-константан). Як це вплине на чутливість приладу?

ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОМАТИЧНОГО МОСТА КСМ-2

МЕТА РОБОТИ: вивчити принцип роботи та будову автоматичного моста

ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Принцип дії ґрунтується на властивості матеріалів змінювати електричний опір зі зміною температури. Мідні термометри опору (ТО) працюють до температури 200⁰С, платинові до 1100⁰С.

Якщо потенціали вершин моста, до яких підключається вимірювальна діагональ, різні, то в вимірювальній діагоналі йде струм, який надходить в електричний підсилювач ЄУ. Вхідний сигнал примушує обертатися реверсний двигун РД, який зміщує повзунок реохорда R_p до тих пір, поки не наступить рівновага моста.

Опір, що вимірюється, ввімкнений в плече, яке належить реохорду. Тому залежність переміщення повзунка від зміни опору є лінійним.

Переваги даної схеми (рис.8.1):

- покази моста не залежать від напруги живлення;
- покази приладу лінійно залежать від зміни температури, яка вимірюється;
- вимірювання виконується автоматично.

Недоліки схеми:

Необхідність пристрою для врівноваження та складність вимірювання малих опорів.

Будова приладу

Автоматичний міст КСМ2 складається з: стрічкового механізму, задавача сигнальних пристроїв, реохорда (змінного опору), балона з чорнилом, плати з вимірювальною схемою (опори R_1 , R_2 , R_3), електродвигуна РД (реверсний).

Тоді, для мостової схеми (див. рис.8.1), рівняння шкали:

$$m = \Delta R_T \frac{R_2}{R_p (R_2 + R_3)}$$

Як видно з рівняння, покази моста m пропорційні зміні опору ΔR_T . При вмиканні опору, який вимірюється, в плече, що належить реохорду, рівняння шкали врівноваженого моста буде лінійним відносно зміни опору. В цій схемі термометр опору ввімкнено за трипроводовою схемою. Якщо виникає необхідність ввімкнути опір за двопроводовою схемою, то для цього достатньо перенести живильну діагональ з точки 2 в точку 3.

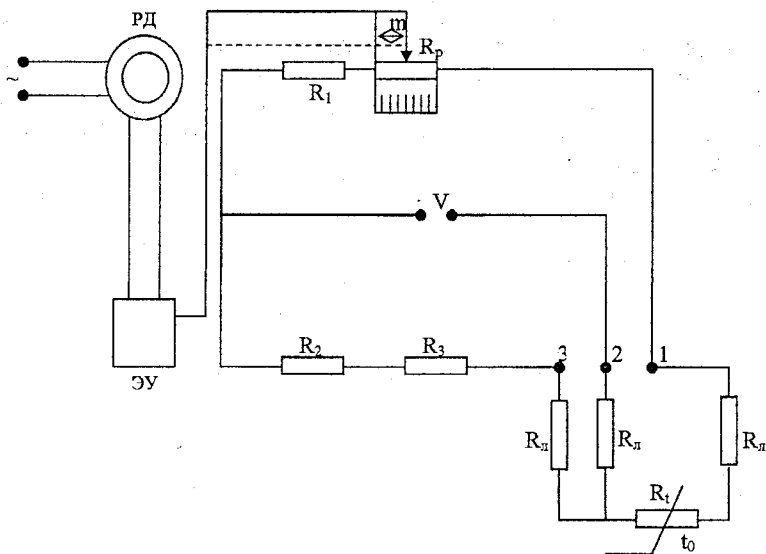


Рисунок 8.1 – Схема врівноваженого моста

Засоби підключення ТО

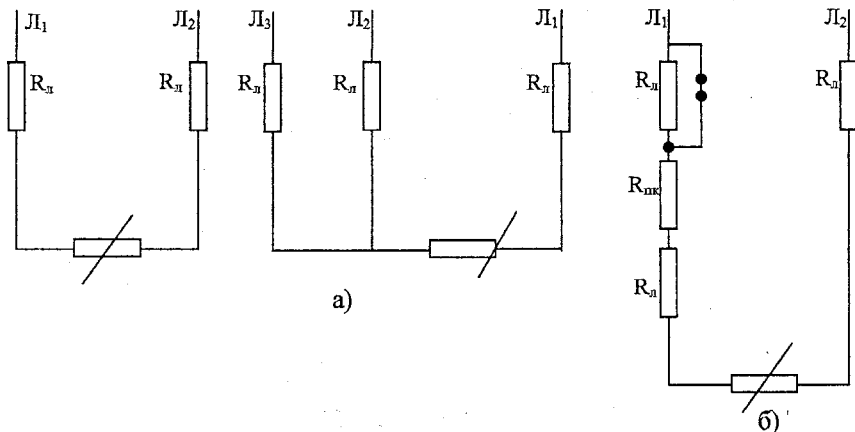
Приєднувальні проводи мають додатковий опір. Щоб зменшити його вплив, опір проводів за допомогою змінного опору підганяється до значень, при яких проводилось градуювання приладу.

Виконують дво-, три- та чотирипроводові схеми підключення ТО до приладу.

Підгонку роблять так: послідовно до термометрів підключається підгонюча котушка $R_{пк}$ та еквівалентний опір $R_{екв}$. Значення $R_{екв}$ дорівнює опору термометра при температурах 50, 100, 200⁰С. Затискачі термометра затискаються. Вітка вимірювальної схеми складається з опору приєднувальних проводів R_n , еквівалентного опору $R_{екв}$, який імітує опір термометра при певній температурі, та підгонючого опору $R_{пк}$. Потім вмикають вимірювальну схему та змінюють $R_{пк}$ доти, доки вказівник вимірювального приладу не зупиниться на відмітці шкали, відповідній температурі, на яку розрахований еквівалентний опір. Для зменшення похибки від невідповідності R_n з'єднувальних проводів градуювальному значенню, застосовують трипроводову схему. В ній з'єднувальні проводи від термометра йдуть до вимірювальної вітки, порівнювальної вітки та джерела живлення. В симетричних врівноважених схемах, коли опори вимірювальної та з'єднувальної віток однакові, зміна температури з'єднувальних проводів не викликає похибки, бо опір проводів змінюється на однакову величину.

Принцип дії ТО базується на залежності між температурою та активним опором металевих провідників. Опір вимірюється логометром чи врівноваженими мостами, що проградуировані в градусах Цельсія.

ТО випускаються двох моделей: одинарні й подвійні. У подвійному термометрі в арматуру вмонтовані два сенсори, електрично не пов'язані між собою. Кожний сенсор має свою пару затискачів в головці термометра, до якої підключається вторинний прилад.



а) – дво- та трипроводові схеми підключення ТО

б) – схема підгонки опорів проводів двопроводової лінії

Рисунок 8.2 – Схема підключення ТО

Сенсор ТОП – платинова спіраль, що знаходиться в капілярних трубах керамічного каркасу. Кріплення спіралей і відводів в каркасі здійснюється глазур'ю.

В ТОМ сенсор – це безкаркасна безіндукційна обмотка з мідного дроту. Обмотка вкрита фторопластовою плівкою. До обмотки припаяні мідні відводи.

Сенсор ТО поміщений у захисний трубчатий чохол, який складається з захисної труби $\ell + 160\text{ мм}$ (де ℓ – довжина монтажної частини труби), рухомого чи нерухомого штуцера і головки. При рухомому штуцері ТО можна заглиблювати на різну глибину. В головку поміщена контактна колодка з затискачами для приєднання дротів від ТО до вторинного приладу.

Діаметри захисного чохла вибираються із ряду: 1,0; 1,6; 2,0; 2,5; 3,2; 4,0; 5,0; 6,0; 8,0; 10; 12; 14; 16; 18; 20; 21; 22; 25; 30 мм.

Для перевірки термометри виймаються з захисних чохлах і поміщаються в спеціальні пробірки з внутрішнім діаметром 10...13 мм. Визначення R_0 при $t = 0^\circ\text{C}$ виконується в ємності, що заповнена дрібно накришеною чистою кригою і залита чистою водою. Вимірювання R_0 проводять двічі – до і після вимірювання опору ТО. Для $t = 100^\circ\text{C}$ вимірювання проводиться в

водяному кип'ятильнику з тиском 100 кПа чи масляному термостаті, який нагрітий до 100⁰С. Величина R_t розраховується за формулою:

$$R_t = R_t' + \Delta R$$

де R_t' - опір термометра при температурі киплячої води;

ΔR - поправка, що вираховується за формулами:

- для ТОМ гр. 50М $\Delta R = 0,25 \cdot (100 - t)$;
- для ТОМ гр. 100М $\Delta R = 0,51 \cdot (100 - t)$;
- для ТОП гр. 50П $\Delta R = 0,175 \cdot (100 - t)$;
- для ТОП гр. 100П $\Delta R = 0,385 \cdot (100 - t)$;

де t - температура киплячої води.

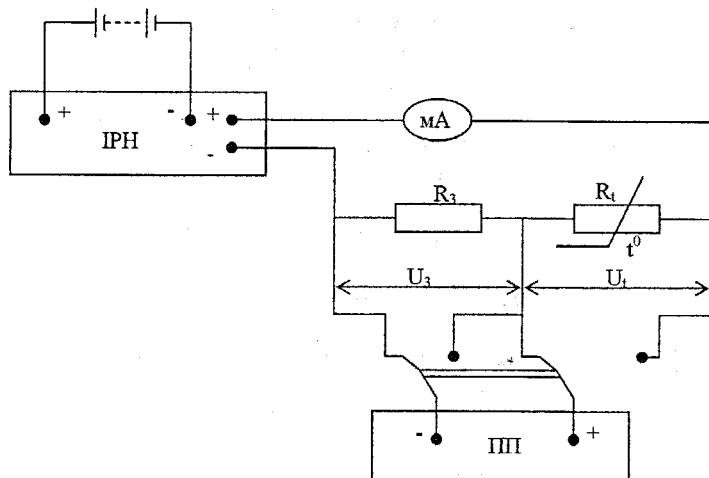


Рисунок 8.3 – Схема повірки термометрів опору

Вимірювання опору термометра проводяться за компенсаційною схемою, поданою на рис. 8.3. ТО R_t вмикається послідовно з еталонним резистором R_e . Живлення кола забезпечується джерелом IPH. Вимірювання проводяться потенціометром ППІ порівнянням спаду напруги на еталонній котушці R_e (тому на потенціометрі немає необхідності перевіряти робочий струм за нормальним елементом).

За допомогою перемикача П першим підключають до потенціометра ТО і фіксують покази потенціометра U_t , а потім (для того самого значення струму в колі) підключають еталонний резистор та фіксують U_e .

Величина R_t розраховується за формулою:

$$R_t = R_e \cdot \frac{U_t}{U_e}$$

Опір котушки R_e вибирають рівним 100 Ом. Як потенціометр використовуються будь-який лабораторний потенціометр класу точності не ме-

нше 0,1. Силу струму встановлюють 1...5 мА і контролюють за допомогою міліамперметра.

ЗАДАЧІ

- 1 Мідний термометр опору має опір при 20°C $R_{20}=1,75$ Ом. Визначити його опір для 100 та 150°C. Температурний коефіцієнт $\alpha = 4,26 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.
- 2 Який з термометрів опору – градування 100П, 100М чи напівпровідниковий з параметрами $R_0 = 10,6$ кОм, $B = 2500$ К має найбільший коефіцієнт перетворення при температурі 60 °С?
- 3 Визначити температуру розплавленого металу, якщо відомо, що температура термоелектричного термометра через 0,5с після занурення в метал дорівнювала $t_1=608$ °С, через 1 с після занурення $t_2=980$ °С, через 1,5с $t_3=1202$ °С. Регулярний тепловий режим нагріву термометра настає через 0,3с після занурення його в метал, а коефіцієнти рівняння не залежать від температури середовища.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 9

ДОСЛІДЖЕННЯ ЛОГОМЕТРА

МЕТА РОБОТИ: вивчення будови та правил експлуатації логометра

ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Принцип дії логометра базується на вимірюваннях відношення струмів в двох колах. В одне з них ввімкнений термометр опору, а в другий – постійний опір.

На рис. 9.1 подана схема логометра.

Логометр складається з двох рамок 1 і 2, які жорстко скріплені між собою та з стрілкою 3. Рамки розміщені в повітряному зазорі між полюсними наконечниками 4 і 5 постійного магніта та осердя 7. Цей зазор нерівномірний, тому значення магнітної індукції в різних точках зазору будуть різними.

Повітряний зазор зміщений від центра до країв полюсних наконечників і, відповідно, від центру до країв наконечників зростає магнітна індукція у зазорі. Обидві рамки живляться від одного джерела постійного струму, а їх обертальні моменти направлені на зустріч один одному.

$$M_1 = 2 \cdot R_1 \cdot n_1 \cdot l_1 \cdot B_1 \cdot I_1,$$

$$M_2 = 2 \cdot R_2 \cdot n_2 \cdot l_2 \cdot B_2 \cdot I_2,$$

де M_1 , M_2 – обертальні моменти рамок;

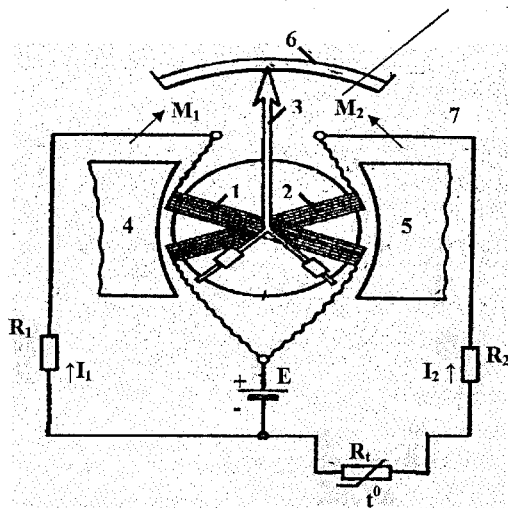
B_1 , B_2 – магнітна індукція в рамках;

n_1 , n_2 – число витків в рамках;

l_1 , l_2 – довжина витків в рамках,

I_1 , I_2 – струми в рамках.

Рівновага буде, коли $M_1 = M_2$.



- 1,2 – рамки
3 – стрілка
4,5 – полюсні наконечники
6 – шкала
7 – осердя

Рисунок 9.1 – Схема логометра

Як правило, $R_1 = R_2$, $n_1 = n_2$, $l_1 = l_2$, тоді:

$$B_1 I_1 = B_2 I_2.$$

Відношення магнітних індукцій B_2/B_1 для конкретної конструкції логометра залежить від положення рамок і однозначно визначається кутом їх повороту φ :

$$\frac{B_2}{B_1} = f(\varphi).$$

Відношення струмів в рамках $\frac{I_1}{I_2}$ залежить від опору резисторів обох гілок кола. Якщо опори обох рамок і обох кіл залишаються сталими, то:

$$\varphi = F(R_t),$$

де R_t – опір термометра опору.

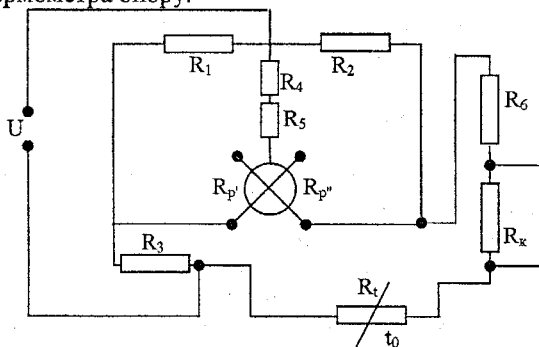


Рисунок 9.2 - Симетрична мостова схема логометра

Зміна температури змінює опір резистора R_k , змінює відношення $\frac{I_1}{I_2}$ і

змінює рівновагу рухомої системи. Для підвищення чутливості застосовують логометр з симетричною мостовою схемою.

Резистор R_4 виготовлений з міді і дозволяє зміни в бік зменшення температурного коефіцієнту приладу. Резистори R_1 і R_2 рівні. Резистори R_3 і R_5 служать для встановлення діапазону вимірювань. R_6 потрібний для підгонки опору з'єднувальних дрітів до градуйованого значення. Для цього R_m закорочується, а з R_k знімається закоротка. Опір R_k дорівнює опору термометра, який відмічений на шкалі червоною рисою. Тому при вмиканні R_k замість R_m стрілка логометра повинна стати на червону риску, якщо опір з'єднувальних дрітів буде рівним градуйованому. Коли ця умова не виконується, то підгонним резистором R_6 змінюється опір кола до того моменту, поки стрілка не стане на червону лінію.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

- 1 Умовами експлуатації логометрів допускається зміна напруги живлення $\pm 20\%$ від номінального (4 В), оскільки при цьому точність суттєво не змінюється. Чому так?
- 2 Чи зміняться метрологічні характеристики логометра, якщо напругу живлення зменшити до 0,4 В?
- 3 Чи можна живити логометр пульсуючим струмом?
- 4 Визначити значення опору R_k логометра, який служить для контролю роботи і підгонки опору під'єднувальних дрітів. Логометр з градуюванням 100П має шкалу 0-600°C, червона риска нанесена на відмітку шкали 350°C.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 10

ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОМАТИЧНОГО ВИТРАТОМІРА ДМ-КСД

МЕТА РОБОТИ: вивчення будови та основ експлуатації автоматичного витратоміра.

ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Витрата – це кількість рідини, яка протікає через поперечний переріз трубопроводів за одиницю часу.

Прилад для вимірювання витрати рідин та газів називається витратоміром, а для вимірювання кількості – лічильником.

Найпоширенішими є витратоміри змінного перепаду тиску з звужувальними пристроями. Їх принцип дії полягає в залежності перепаду тиску на нерухомому звужувальному пристрої, встановленому на трубопроводі,

від витрати середовища, яке вимірюється. На рис. 10.1 подана схема витратоміра із звукувальним пристроєм.

Рух потоку до і після діафрагми повинен бути турбулентним та стаціонарним, потік повинен заповнювати весь переріз трубопроводу. Фазовий стан вимірювального середовища не повинен змінюватись. Пара повинна бути перегрітою. При вимірюванні витрати газу діаметр трубопроводу повинен бути більше 50 мм. При вимірюванні витрати рідини – більше 30 мм. Мінімальний діаметр трубопроводу для сопла Вентурі 65 мм.

Після перерізу А (рис.10.2) потік звукується до найменшого діаметра в перерізі В. Відповідно статичний тиск P_A зменшується до мінімального P_B . Після перерізу В починається процес розширення потоку, який закінчується в перерізі С.

Запишемо рівняння Бернуллі для перерізів А і В:

$$\frac{P_A}{\rho} + k_A \frac{V_A^2}{2} = \frac{P_B}{\rho} + k_B \frac{V_B^2}{2} + \xi \frac{V_B^2}{2}, \quad (10.1)$$

де k_A, k_B – поправочні коефіцієнти на нерівномірність розподілу швидкостей в перерізах А та В;

ξ – коефіцієнт опору, віднесений до швидкості V_B перерізу В.

Масова витрата:

$$Q = \rho \cdot V \cdot F, \quad (10.2)$$

де F – площа струмини.

Модуль діафрагми:

$$m = \frac{F_0}{F_A} = \left(\frac{d}{D} \right)^2, \quad (10.3)$$

де F_0 – площа отвору діафрагми;

F_A – площа поперечного перерізу труби.

Коефіцієнт звуження потоку:

$$\mu = \frac{F_b}{F_0}, \quad (10.4)$$

де F_b – найменша площа потоку після діафрагми.

Тоді $V_B = \mu \cdot m \cdot V_a$

$$F_a \cdot V_a = F_b \cdot V_b, \quad (10.5)$$

$$V_a = \frac{F_b \cdot V_b}{F_a} = V_b \cdot \frac{F_b}{F_0} \cdot \frac{F_0}{F_a} = m \cdot \mu \cdot V_b. \quad (10.6)$$

З рівняння Бернуллі:

$$V_b = \frac{1}{\sqrt{\xi + k_b - k_a \cdot \mu^2 \cdot m^2}} \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot (P_a - P_b)}. \quad (10.7)$$

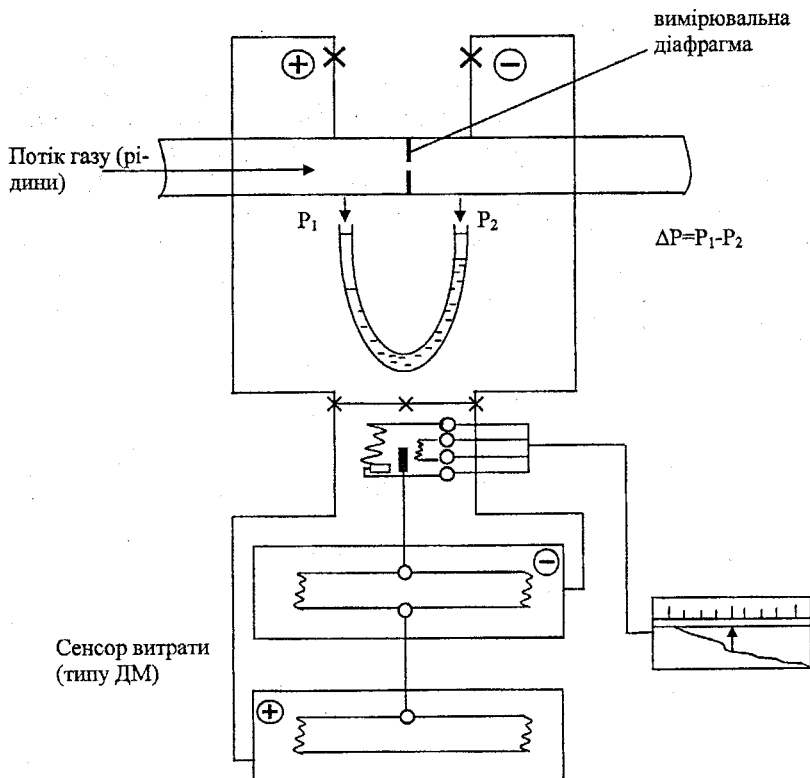


Рисунок 10.1 – Схема витратоміра

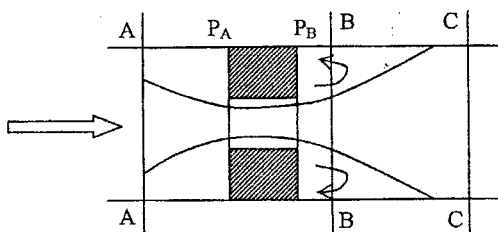


Рисунок 10.2 – Траєкторія потоку в дросельній шайбі

В витратомірах перепад тиску вимірюється не в перерізах А та В, а до і після діафрагми.

Відношення різниць тисків:

$$\psi = \frac{P_a - P_b}{P_1 - P_2} \quad (10.8)$$

$$V_b = \sqrt{\frac{\psi}{\xi + k_b - k_a \cdot \mu^2 \cdot m^2}} \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot (P_1 - P_2)} . \quad (10.9)$$

Масова витрата:

$$Q_m = \rho \cdot V_b \cdot F_b = \rho \cdot V_b \cdot \mu \cdot F_0 . \quad (10.10)$$

Масова витрата рідин визначається за формулою:

$$Q_m = \frac{\mu \cdot \sqrt{\psi} \cdot F_0}{\sqrt{\xi + k_b - k_a \cdot \mu^2 \cdot m^2}} = \alpha \cdot F_0 \cdot \sqrt{2\rho(P_1 - P_2)} . \quad (10.11)$$

Об'ємна витрата рідин:

$$Q_0^{рідин} = \frac{Q_m}{\rho} = \alpha \cdot F_0 \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot (P_1 - P_2)} . \quad (10.12)$$

Масова витрата газів:

$$Q_m^{гази} = \alpha \cdot E \cdot F_0 \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_1 - P_2)} , \quad (10.13)$$

де E – поправковий множник на розширення середовища, коли воно проходить через отвір діафрагми.

Коефіцієнт витрати α визначається так:

$$\alpha = \frac{\mu \sqrt{\psi}}{\sqrt{\xi + k_b - k_a \cdot m^2 \cdot \mu^2}} . \quad (10.14)$$

Рівняння масової витрати записуються так:

$$Q_m = 0,01252 \cdot \alpha \cdot E \cdot d^2 \sqrt{\rho \cdot \Delta P} , \quad (10.15)$$

де Q_m – кг/год;

d – [мм];

ΔP – [кГс/м²];

ρ – [кг/м³].

Розрахунок градуовальної характеристики звукувального пристрою передбачає обчислення α , E , d , ρ .

Коефіцієнт витрати:

- для діафрагми

$$\alpha = \alpha_B \cdot \kappa_{ш} \cdot \kappa_z ,$$

- для сопел

$$\alpha = \alpha_B \cdot \kappa_{ш} ,$$

де α – розрахунковий коефіцієнт витрати;

$\kappa_{ш}$ – коефіцієнт шорсткості трубопроводу, яка дещо збільшує α ,

κ_z – коефіцієнт, який вираховує затуляння вхідної крайки діафрагми,

α_B – вхідний коефіцієнт витрат, який залежить від m та Re .

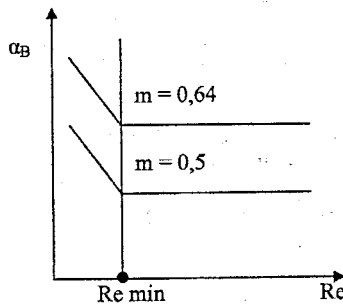


Рисунок 10.3 – Залежність коефіцієнта витрати від критерію Рейнольдса потоку

Коефіцієнт α_B визначається для $Re > Re_{min}$ і слабо залежить від Re . Значення α_B можна визначити за графіком лише за $Re > Re_{min}$. Для діафрагми $Re_{min} = 10^4$, для сопел $Re_{min} = 2 \dots 7 \cdot 10^4$.

Поправковий множник на розширення середовища зумовлений зниженням густини рідини, коли її потік проходить через діафрагму

$$E = f(\Delta P/P, m, \kappa),$$

де P – абсолютний тиск, Па;

ΔP – втрата тиску на діафрагмі, Па;

κ – показник адиабати.

Для однакових втрат тисків поправковий множник діафрагми більший ніж поправковий множник сопел через радіальне розширення. Звичайно $\Delta P/P < 0,05$

Поправковий множник для діафрагми – 0,97, для сопел – 0,94.

Діаметр звужувальних пристроїв та трубопроводів задається для $t = 20^\circ\text{C}$ та позначається d_{20} , D_{20} .

Для температур, відмінних від 20°C , вводять поправку:

$$d_t = d_{20} \cdot K'_t, \quad D_t = D_{20} \cdot K''_t$$

де K'_t , K''_t – поправкові коефіцієнти на температурне розширення матеріалів діафрагми та трубопроводів.

Термометр встановлюють перед діафрагмою на відстані не менше $5D$, де D – діаметр трубопроводу.

Застосування звужувальних пристроїв

Дифманометр з'єднується з діафрагмою трубками, діаметром не менше 8 мм (рис. 10.4).

Перепад тиску на діафрагмі повинен передаватися на дифманометр без переключень. Тому імпульсні лінії повинні бути вертикальні.

Для вимірювання витрат газів дифманометр рекомендується встановлювати вище діафрагми, щоб конденсат, який утворюється в імпульсних трубках, стікав в трубопровід (якщо це неможливо, то встановлюють додаткові посудини).

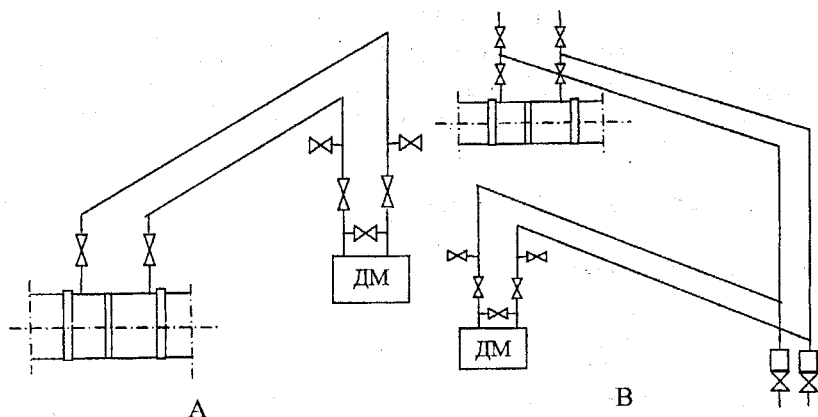


Рисунок 10.4 – Схема з'єднувальних ліній для вимірювання витрати газу з установкою дифманометра вище (А) і нижче (Б) звужувального пристрою

ЗАДАЧІ

1 По трубі, діаметром $D = 100$ мм рухається рідина з середньою швидкістю $V_c = 1,5$ м/с. Визначити масову витрату рідини, якщо її густина $\rho = 990$ кг/м³.

2 При вставленні діафрагми в трубопроводі припускалося, що номінальна витрата середовища складе 230 т/год, діафрагма була розрахована на $Q_{max} = 250$ т/год, а дифманометр на $P_{max} = 4$ кПа. Але в процесі експлуатації з'ясувалось, що витрата середовища дорівнюватиме 380 т/год. Замінити діафрагму неможливо. Підібрати дифманометр, яким можна виміряти витрату 380 т/год.

3 Сопло Вентурі (довге) використовується на насосній станції в схемі регулювання витрат води. Відносна площа сопла $m = 0,25$. Автоматичний регулятор підтримує постійним перепад тиску на соплі, який дорівнює 35 кПа. Розрахункова температура води 20 °С, але в денний час температура підвищується до 27 °С, а в нічний час до 10 °С. Визначити, на скільки відсотків буде збільшуватися чи знижуватися дійсна витрата води в денний час. Тиск води 0,6 МПа.

4 Витрата води, яка протікає трубопроводом $D = 200$ мм, дорівнює $Q_m = 100$ т/год, відносна площа діафрагми $m = 0,5$, тиск води $P = 10$ МПа, температура $t = 200$ °С. Визначити перепад тиску на діафрагмі.

5 На трубопроводі $D = 200$ мм перед звужувальним пристроєм з $m = 0,6$ треба встановити регулювальний вентиль. Знайти довжину прямої ділянки, а також її зміну при зменшенні m від 0,6 до 0,45.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №11

ВИМІРЮВАННЯ ОСНОВНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН

МЕТА РОБОТИ: Вивчення основних характеристик аналогових електромеханічних приладів; застосування цих приладів для вимірювання струму, напруги, потужності, частоти та зсуву фаз.

11.1 ПІДГОТОВКА ДО РОБОТИ

11.1.1 Повторити поняття діючих та середніх значень напруг та струмів, коефіцієнта форми кривої, які вивчаються в курсі ТОЕ.

11.1.2 Вивчити із літератури та конспекту лекцій означення абсолютної і відносної похибок вимірювання, основні характеристики електровимірювальних електромеханічних приладів: зведена похибка, клас точності, чутливість і постійна приладу, час заспокоєння, споживана потужність.

11.1.3 Вивчити із літератури [2-4] позначення принципу дії приладів, що наносяться на їх шкали.

11.1.4 Визначити постійну (ціну поділки) ватметра, який має межі вимірювання напруги U_{max} і струму I_{max} , що вказані в табл.11.1 відповідно до номера своєї бригади. Кількість поділок шкали ватметра дорівнює 150.

Таблиця 11.1 – Вибір варіанта завдання

№ бригади	1	2	3	4	5	6
Границі						
U_{max} В	75	150	300	300	75	150
I_{max} А	1	2	5	10	5	1

11.1.5 Нарисувати схему, за допомогою якої можна провести перевірку двох вольтметрів за показаннями третього, зразкового.

11.1.6 Скласти (нарисувати) схему увімкнення приладів для вимірювання потужності, а також діючих значень струму та напруги на котушці індуктивності, що увімкнена в одну із схем рис.11.1 (відповідно до номера своєї бригади). Для вимірювання потужності включити ватметр.

11.1.7 Скласти схему увімкнення приладів для вимірювання на вході кола, схема якого наведена на рис.11.1 (відповідно до номера своєї бригади), таких електричних величин:

- діючого значення напруги;
- діючого значення струму;
- частоти;
- потужності (ватметром);
- зсуву фаз між напругою і струмом (фазометром).

11.2 ПОРЯДОК РОБОТИ

11.2.1 За допомогою зразкового вольтметра типу Д5015, який має клас точності 0,2, одержати дані для визначення зведених похибок двох вольтметрів:

- вольтметра діючих значень типу Э515, який має клас точності 0,5;
- вольтметра середніх значень типу Ц58, який має клас точності 1,0.

Вказані дані величини потрібно одержати для трьох значень напруг, які встановлюються на вольтметрі Д5015 за вказівкою викладача в діапазоні 0+60 В. Напряга на вольтметри подається з виходу ЛАТРа.

Під час виконання експерименту вольтметр Д5015 повинен бути встановлений за рівнем.

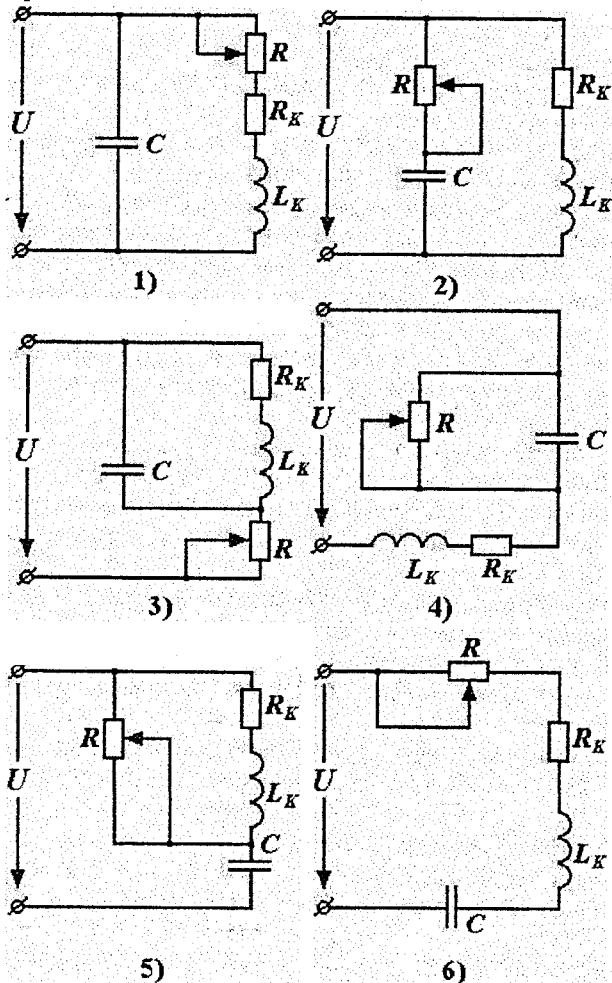


Рисунок 11.1 – Схеми електричних кіл

В зв'язку з грубим регулюванням напруги ЛАТРОм не обов'язково встановлювати вказівник зразкового вольтметра Д5015 на оцифровану відмітку. Для більш точного відліку напруг вольтметр має ноніусну шкалу.

11.2.2 Визначити час заспокоєння рухомої частини вольтметра Э515. Використати при цьому або електромеханічний секундомір, або секундомір на ручного годинника. Чи відповідає час заспокоєння вимогам ДСТУ ?

11.2.3 Записати значення опорів вольтметра Э515 на всіх межах вимірювання (які необхідно буде використати при визначенні споживаної потужності).

11.2.4 Виміряти потужність і діючі значення струму та напруги на котушці індуктивності, яка вклочена в одне з кіл, схеми яких наведені на рис.11.1 (відповідно до номера своєї бригади).

На лабораторному стенді R – реостат, $R_k - L_k$ – котушка індуктивності, C – ємність конденсаторів, які з'єднуються паралельно при допомозі вимикачів (гумблерів).

Положення повзуна реостата R і ємність C вказуються викладачем.

Струм через котушку не повинен перевищувати 0.5 А.

Для вимірювання діючого значення напруги використати вольтметр Э515.

Після виконання цього досліду положення ручки регулювання ЛАТРа і повзуна реостата **не змінювати!** Це необхідно для того, щоб струм через котушку індуктивності для виконання наступного досліду не виявився більшим 0.5 А.

11.2.5 Переключити прилади для вимірювання діючих значень струму та напруги, потужності і зсуву фаз між напругою та струмом на вході кола для тих самих положень регулювань, що і в попередньому пункті.

Виміряти і записати вказані величини.

11.2.6 Заповнити таблицю використаних приладів, вказавши межі, за яких проводились вимірювання.

11.2.7 За результатами вимірювань п.11.2.1 визначити зведені похибки вольтметрів діючих та середніх значень (для трьох значень встановлених в досліді напруг).

Обчислити за показами вольтметрів діючих та середніх значень коефіцієнт форми кривої вимірюваних напруг.

Яким він повинен бути для синусоїдної напруги?

11.2.8 За результатами вимірювань п.11.2.4 визначити параметри котушки індуктивності.

11.2.9 Обчислити максимальні відносні похибки вимірювань всіх величин, виконаних в п.11.2.5. Похибки вимірювань потужності обчислити двома методами:

1 - методом безпосередньої оцінки (за допомогою ватметра);

2 - опосередкованим методом, (потужність розраховано за формулою:

$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$, де U , I і φ – покази, відповідно, вольтметра, амперметра та фазометра).

11.2.10 Обчислити споживану потужність вольтметра Э515 на всіх межах вимірювання.

11.2.11 Зробити висновки.

11.3 ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

11.3.1 Магнітоелектричний вимірювальний перетворювач

Принципи дії магнітоелектричних вимірювальних перетворювачів полягає у взаємодії поля постійного магніту з магнітним полем рамки (котушки), по якій протікає вимірюваний струм.

Основні елементи конструкції магнітоелектричного вимірювального перетворювача показані на рис. 11.2.

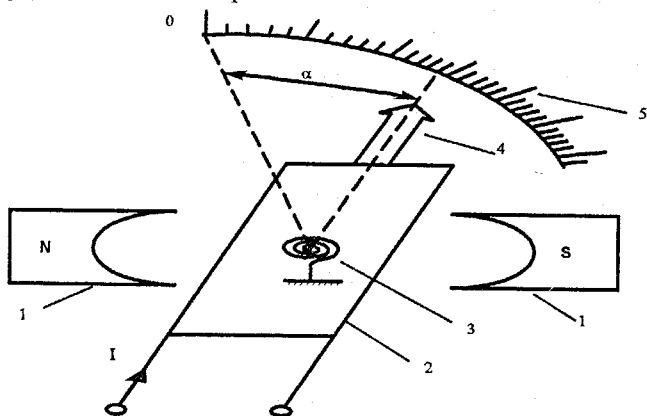


Рисунок 11.2 – Магнітоелектричний перетворювач

Постійний магніт, полюсні наконечники і циліндричне осердя складають магнітну систему механізму 1. В проміжку між полюсними наконечниками і осердям створюється сильне радіально-рівномірне магнітне поле, в якому знаходяться дві сторони рамки 2 з мідної чи алюмінієвої проволочки. По витках рамки протікає постійний струм, пов'язаний певним чином з вимірюваною електричною величиною (тобто з вимірюваним струмом чи напругою). Цей струм підводиться до рамки через спіральні пружини 3. Рамка закріплена між двома півосями. На одній із півосей закріплена стрілка 4, кінець якої переміщується над шкалою 5.

Магнітне поле постійного магніту N-S (рис. 11.2), взаємодіючи зі струмами в тих частинах рамки, які знаходяться в просторі між полюсними наконечниками і осердям, створює обертальний момент, який намагається повернути рамку так, щоб через площину, охоплену її витками, проходив максимальний магнітний потік. З поворотом рамки закручуються спіральні пружини 3 і створюється момент протидії. Поворот рамки припиниться, коли момент протидії стане рівним обертальному. В цьому стані рухомої частини за положенням стрілки над шкалою 5 можна визначити значення вимірюваної величини.

Значення обертового моменту $M_{ос}$, як показано раніше, можна визначити як похідну від енергії електромагнітного поля W_e за кутом повороту рухомої частини α :

$$M_{ос} = \frac{dW_e}{d\alpha}. \quad (11.1)$$

Якщо площа рамки перпендикулярна лініям потоку (на рис.11.2 це відповідає вертикальному положенню рамки), то магнітне потокозчеплення з нею дорівнює повному потокозчепленню Ψ_o магнітного потоку з витками рамки. Енергія електромагнітного поля в цьому випадку

$$W_e = \Psi_o \cdot I, \quad (11.2)$$

де I – струм в провідниках рамки.

З поворотом рамки в радіально-рівномірному магнітному полі на кут $d\alpha$ відбувається зміна потокозчеплення на $d\Psi_o = \Psi_o \cdot d\alpha$ і зміна енергії на величину $dW_e = \Psi_o \cdot d\alpha \cdot I$. Звідси обертовий момент:

$$M_{ос} = \frac{dW_e}{d\alpha} = \Psi_o \cdot I, \quad (11.3)$$

де $\Psi_o = B S w$;

B – індукція магнітного поля постійного магніту;

S – площа рамки (котушки);

w – кількість витків рамки (котушки).

Таким чином, обертовий момент пропорційний струмові I в рамці.

Момент протидії M_{np} , який виникає з поворотом рамки та закручуванні пружини, пропорційний куту повороту α

$$M_{np} = W_{nm} \alpha. \quad (11.4)$$

В статичному режимі роботи рухома частина буде знаходитись у рівновазі, коли

$$M_{ос} = M_{np}.$$

Прирівняємо (11.3) і (11.4):

$$B \cdot S \cdot w \cdot I = W_{nm} \alpha$$

і отримаємо рівняння перетворення електромагнітного перетворювача

$$\alpha = \frac{B S w}{W_{nm}} \cdot I, \quad (11.5)$$

де W_{nm} – питомий протидійний момент пружини, тобто момент, який виникає при закручуванні пружини на одиницю кута.

Подано (11.5) у такому вигляді:

$$\alpha = S_I \cdot I, \quad (11.6)$$

де $S_I = \frac{BSw}{W_{\text{ин}}}$ - чутливість магнітоелектричного вимірювального перетворювача.

Проаналізуємо рівняння (11.6):

1. Якщо напрям струму зміниться на протилежний, то відповідно зміниться і напрям обертального моменту. Отже, за допомогою магнітоелектричного вимірювального приладу можна вимірювати тільки постійний струм (або напругу).
2. Статична характеристика $\alpha = f(I)$ даного перетворювача лінійна, оскільки чутливість

$$S_I = BSw = \text{const} \begin{cases} B = \text{const}, \\ S = \text{const}, \\ w = \text{const}. \end{cases}$$

3. В зв'язку з тим, що чутливість у магнітоелектричних перетворювачів постійна, то вони мають рівномірну шкалу.
4. До переваг магнітоелектричних вимірювальних перетворювачів (порівняно з іншими типами електромеханічних вимірювальних приладів) відносять також високу чутливість, мале споживання енергії від об'єкту вимірювання, малий вплив на покази приладів зовнішніх магнітних полів).
5. Магнітоелектричні вимірювальні перетворювачі мають такі недоліки: неможливість вимірювання змінних струмів (без додаткових перетворювачів), мала здатність до перевантажень, відносно висока вартість та складність вимірювального механізму.

11.3.2 Електромагнітний вимірювальний перетворювач

Принцип дії електромагнітного вимірювального механізму оснований на взаємодії магнітного поля, яке створюється струмом в нерухомій котушці, з рухомим феромагнітним осердям. Одна із найрозповсюдженіших конструкцій електромагнітного механізму показана на рис.11.3, де 1 – котушка; 2 – осердя, закріплене на осі 3 механізму; 4 – спіральна пружина; 5 – повітряний заспокоювач.

Під дією магнітного поля осердя втягується всередину котушки. Рухомою частиною механізму повертається до тих пір, поки обертальний момент не зрівноважиться моментом протидії. Як відомо, енергія магнітного поля котушки, по якій протікає постійний струм I ,

$$W_m = LI^2/2, \quad (11.7)$$

де L – індуктивність котушки, яка залежить від положення осердя, а, отже, і від кута повороту α рухомої частини. Обертальний момент:

$$M_{\text{об}} = \frac{dW_m}{d\alpha} = \frac{1}{2} \cdot \frac{dL}{d\alpha} \cdot I^2. \quad (11.8)$$

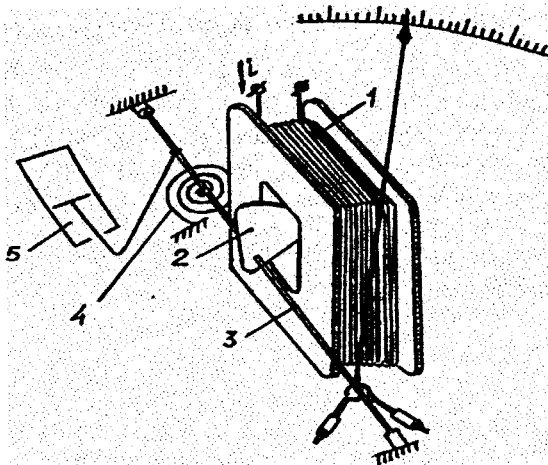


Рисунок 11.3 – Електромагнітний вимірювальний перетворювач

Якщо обертальний момент та момент протидії рівні, рухома частина зупиняється, займаючи положення, яке визначається кутом повороту:

$$\alpha = \frac{1}{2W_{\text{зм}}} \cdot \frac{dL}{d\alpha} \cdot I^2. \quad (11.9)$$

Якщо в котушці протікає змінний струм (не обов'язково синусоїдної форми), то рухома частина реагує на середнє значення обертального моменту

$$M_{\text{ос}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{dL}{d\alpha} \cdot \frac{1}{T} \int_0^T i^2 \cdot dt, \quad (11.10)$$

і займає положення

$$\alpha = \frac{1}{2W_{\text{зм}}} \cdot \frac{dL}{d\alpha} \cdot \frac{1}{T} \int_0^T i^2 \cdot dt. \quad (11.11)$$

Але $\frac{1}{T} \int_0^T i^2 \cdot dt = I^2$ – квадрат діючого значення періодичного струму. Тоді можна записати:

$$\alpha = \frac{1}{2W_{\text{зм}}} \cdot \frac{dL}{d\alpha} \cdot I^2, \quad (11.12)$$

де I – діюче значення змінного струму.

Величина I^2 завжди додатна, тому кут повороту рухомої частини не залежить від напрямку струму в котушці. Звідси виходить, що електромагнітні прилади можуть застосовуватись для вимірювань як у колах постійного, так і в колах змінного струмів.

З (11.12) випливає, що для $dL/d\alpha = \text{const}$ шкала електромагнітного приладу має квадратичний характер – стиснута на початку та розтягнута в кінці. Зміною залежності $L(\alpha)$ шляхом вибору відповідної форми осердя шкалу в значній мірі можна наблизити до рівномірної.

Струм в електромагнітному механізмі підводиться безпосередньо до нерухомої котушки (не через пружини). Провід обмотки котушки можна взяти великого перерізу, тому такий механізм здатний витримувати великі перевантаження.

11.3.3 Електродинамічний вимірювальний перетворювач

Принцип дії електродинамічного механізму оснований на взаємодії магнітних полів двох котушок із струмами (рис. 11.4): нерухомої 1 та рухомої 2.

Нерухома котушка для одержання більш рівномірного магнітного поля розділена на дві частини. Рухома котушка закріплена на осі або розтяжках і знаходиться в полі нерухомої. Струм до неї підводиться через спіральні пружини або розтяжки, які з поворотом рухомої котушки створюють момент протидії. При протіканні постійних струмів I_1 та I_2 через обмотки котушок виникає пара сил $F-F$, яка створює обертальний момент, що намагається повернути рухома котушку так, щоб магнітні потоки котушок збіглися.

Енергія магнітного поля двох котушок із струмами I_1 та I_2

$$W_m = \frac{L_1 \cdot I_1^2}{2} + \frac{L_2 \cdot I_2^2}{2} + M \cdot I_1 \cdot I_2, \quad (11.13)$$

де L_1 та L_2 – індуктивності котушок,

M – взаємна індуктивність.

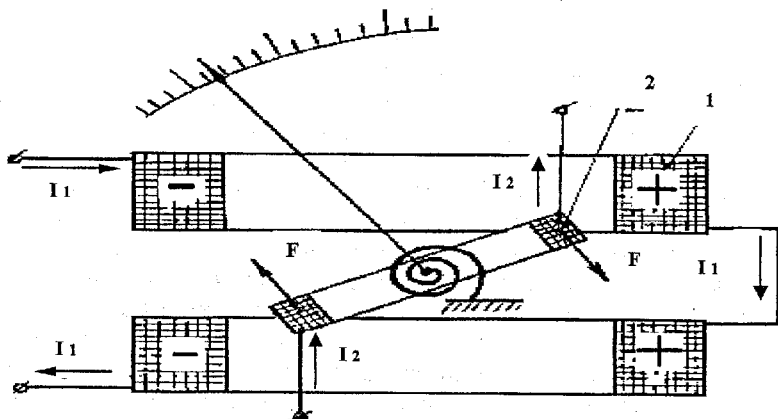


Рисунок 11.4 – Електродинамічний вимірювальний перетворювач

З поворотом рухомої котушки змінюється тільки взаємна індуктивність M між котушками. Індуктивності L_1 та L_2 і струми I_1 та I_2 від кута повороту не залежать.

Тому обертальний момент:

$$M_{об} = \frac{dW_m}{d\alpha} = I_1 \cdot I_2 \cdot \frac{dM}{d\alpha}. \quad (11.14)$$

З протіканням в котушках синусоїдних струмів $i_1 = I_{m1} \cdot \sin \omega t$ та $i_2 = I_{m2} \cdot \sin(\omega t - \varphi)$ рухома частина через інерційність реагує на середнє значення обертального моменту:

$$M_{об\varphi} = \frac{1}{T} \int_0^T M_{об}(t) \cdot dt = \frac{1}{T} \int_0^T i_1 \cdot i_2 \cdot \frac{dM}{d\alpha} dt = I_1 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi \frac{dM}{d\alpha}, \quad (11.15)$$

де: $M_{об}(t)$ – миттєве значення обертального моменту, I_1 та I_2 – діючі значення синусоїдних струмів, φ – зсув фаз між струмами в котушках.

З (11.15) виходить, що обертальний момент електродинамічного механізму пропорційний добуткові діючих значень струмів в котушках та косинусу кута між ними. Ця особливість електродинамічного механізму відкриває можливість побудови на його основі не тільки амперметрів та вольтметрів, але й засобів вимірювання інших величин (наприклад, ватметрів).

При рівності обертального $M_{об}$ та протидійного $M_{пр} = W_{пр} \cdot \alpha$ моментів, тобто в усталеному режимі, матимемо:

$$I_1 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi \frac{dM}{d\alpha} = W_{пр} \alpha, \quad (11.16)$$

звідки отримуємо рівняння перетворення електродинамічного механізму:

$$\alpha = \frac{1}{W_{пр}} \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi \frac{dM}{d\alpha}. \quad (11.17)$$

Якщо I_1 та I_2 – постійні струми, то в цьому рівнянні $\cos \varphi = 1$.

Магнітне поле електродинамічного механізму, силові лінії якого замикаються в повітрі, невелике. Зовнішні магнітні поля викликають додаткові обертальні моменти від взаємодії цих полів з полем рухомої котушки. Внаслідок цього виникають додаткові похибки. Для захисту механізмів від зовнішніх магнітних полів їх поміщають в феромагнітні екрани або механізм виготовляють у вигляді астатичної конструкції. Астатичний механізм складається з двох звичайних механізмів, рухомі котушки яких закріплені на деякій відстані одна від одної на одній осі. Магнітні поля нерухомих котушок направлені взаємно протилежно. Протилежно направлені також і поля рухомих котушок, тому обертальні моменти обох механізмів направлені однаково відносно спільної осі. Але зовнішнє поле з полем одного механізму складається, а від поля іншого – віднімається. Результуючий додатковий момент від зовнішнього поля виходить рівним нулю, якщо зовнішнє поле рівномірне.

Основними перевагами електродинамічних механізмів є однакові покази при постійному та змінному струмах, що дозволяє з великою точністю градувати їх при постійному струмі, а також стабільність показів у часі. Важливою перевагою цих механізмів є можливість побудови на їх основі ватметрів. Ці механізми не мають феромагнітних осердь, що виключає появу похибки від вихрових струмів та гістерезису.

Ці переваги дозволяють виготовляти прилади високих класів точності (0,1; 0,2; 0,5) для вимірювання при постійному та змінному струмах.

Недоліки електродинамічних механізмів: невисока чутливість, велике власне споживання потужності, чутливість до перевантажень.

Широке використання для побудови різних приладів знаходять логометричні електродинамічні механізми.

11.3.4 Амперметри і вольтметри електродинамічної системи

Найпростіше вимірювальне коло у міліамперметра - обидві котушки з'єднані послідовно, і через них протікає весь вимірюваний струм (рис.11.5, а).

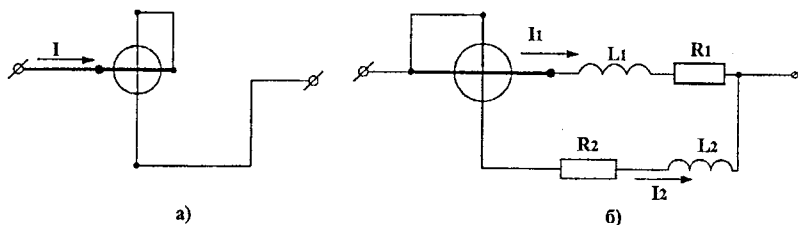


Рисунок 11.5 – Схеми амперметрів

Тому кут $\varphi = 0$, і рівняння перетворювання має вигляд:

$$\alpha = \frac{1}{W_{nm}} \cdot I^2 \frac{dM}{d\alpha}, \quad (11.18)$$

тобто кут відхилення пропорційний квадратові діючого значення струму. Отже, при $dM/d\alpha = \text{const}$ шкала приладу квадратична.

Щоб наблизити шкалу до рівномірної, форму та розташування котушок вибирають так, щоб відповідним чином змінилась похідна $dM/d\alpha$ з поворотом рухомої частини.

Послідовне з'єднання котушок використовується в амперметрах для малих струмів (від 1 мА до 0,5 А).

Для великих струмів (до 10 А) котушки з'єднуються паралельно (рис.11.5, б). Опори R_1 та R_2 та індуктивності L_1 та L_2 підбирають такими, щоб, по-перше, струм через рухоми котушку, який підводиться через спіральні пружини, не перевищував допустимого значення, а, по-друге, щоб зсув фаз між струмами I_1 та I_2 дорівнював нулю. Тоді залежність кута повороту від струму виражається рівнянням перетворення. Крім того, вклю-

чення в коло опорів R_1 та R_2 та індуктивностей L_1 та L_2 потрібне для компенсації частотної та температурної похибок.

Для отримання амперметрів з декількома межами нерухому котушку роблять секційною (найчастіше з двох секцій для одержання двох меж).

Для вимірювання струмів більше 10 А використовуються вимірювальні трансформатори струму.

Максимальна частота для електродинамічних амперметрів – 10 кГц.

В електродинамічних вольтметрах нерухома та рухома котушки з'єднані послідовно разом з додатковим резистором R_d із манганіну (рис.11.6).

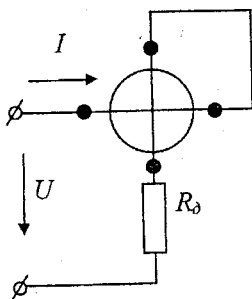


Рисунок 11.6 – Схема електродинамічного вольтметра.

Якщо повний опір вольтметра Z_e , то в колі буде протікати струм $I = U/Z_e$. Тоді

$$\alpha = \frac{1}{W_{\text{пр}}} \cdot \frac{dM}{d\alpha} \cdot \frac{1}{Z_e^2} \cdot U^2, \quad (11.19)$$

тобто характер шкали вольтметра такий самий, як і у амперметра. Так само, як і у амперметрів, зміною $dM/d\alpha$ добиваються у вольтметрах практично рівномірної шкали.

Для отримання багатомежевих вольтметрів застосовують декілька додаткових резисторів, з'єднаних послідовно.

В амперметрах з послідовною схемою з'єднання котушок опір кола приладу значно менший від опору кола, в якому вимірюється струм. Тому зміна опору приладу при зміні частоти вимірюваного струму мало впливає на покази приладу.

У вольтметрах струм через механізм для заданої напруги визначається тільки опором приладу. Якщо цей опір змінюється від частоти із незмінною напругою, то це безпосередньо впливає на покази приладу. Особливо це проявляється у вольтметрах з малим додатковим опором. Для компенсації частотної похибки паралельно додатковому резистору під'єднується ємність так само, як це робиться в електромагнітних вольт-

метрах. Частотний діапазон електродинамічних вольтметрів обмежується зверху частотою 5 кГц.

Вольтметри електродинамічної системи застосовуються із безпосереднім їх вмиканням для вимірювання напруг від 1,5 до 600 В. Струм повного відхилення у них – від 3 до 60 мА. Для вимірювання напруг більше 600 В застосовуються вимірювальні трансформатори напруги.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

- 1 Структурна схема і принцип дії магнітоелектричного вимірювального механізму. Виведення рівняння перетворення та його аналіз.
- 2 Структурна схема і принцип дії електромагнітного вимірювального механізму. Виведення рівняння перетворення та його аналіз.
- 3 Структурна схема і принцип дії електродинамічного вимірювального механізму. Виведення рівняння перетворення та його аналіз.
- 4 Структурна схема і принцип дії електродинамічного амперметра. Виведення рівняння перетворення та його аналіз.
- 5 Структурна схема і принцип дії електродинамічного вольтметра. Виведення рівняння перетворення та його аналіз.
- 6 Як визначити абсолютну та відносну похибку вимірювання?
- 7 Назвіть основні шляхи визначення дійсного значення.
- 8 Як визначити зведену похибку?
- 9 Назвіть шляхи визначення нормувального значення.
- 10 Як визначити ціну поділки?
- 11 Як знайти чутливість засобу вимірювання?
- 12 Що таке поправки і як їх експериментально визначити?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №12

ПОВІРКА ОДНОФАЗНОГО ЛІЧИЛЬНИКА АКТИВНОЇ ЕНЕРГІЇ

МЕТА РОБОТИ: вивчення основних характеристик лічильника, засвоєння методики його повірки

12.1 ПІДГОТОВКА ДО РОБОТИ

12.1.1 Визначимо номінальну постійну для лічильника СО-2М, передатне число якого $n = 1280$ об/кВт.год.

$$C = \frac{P \cdot t}{n} = \frac{1000 \cdot 3600}{1280} = 2812,5 \text{ Вт} \cdot \text{с/об}.$$

12.1.2 Визначимо, скільки обертів зробить диск лічильника за одну хвилину при $U_n = 220\text{В}$; $I_n = 5\text{А}$; $\cos\varphi = 1$, а також визначимо, яким буде при цьому показ ватметра.

$$P_n = U_n \cdot I_n \cdot \cos\varphi = 220 \cdot 5 \cdot 1 = 1100 \text{ Вт}.$$

12.1.3 Кількість обертів
$$n = \frac{P \cdot t}{c} = \frac{1100 \cdot 60}{2812,5} = 23,47 \text{ об.}$$

Отже, $n = 23$ обертів.

12.2 ПРОГРАМА РОБОТИ

12.2.1 Виконати експеримент з перевірки лічильника для $U = U_{\text{ном}} = 220\text{В}$ $\cos\varphi = 1$ і значення струму навантаження, рівних ста, восьмидесяти, шестидесяти, сорока та двадцяти відсоткам від I_n . Результати експерименту занести в таблицю.

12.2.2 Виконати п.1 при $\cos\varphi = 0,5$.

12.2.3 Перевірити лічильник на самохід.

12.2.4 Визначити поріг чутливості лічильника.

12.2.5 Обчислити похибки лічильника для умов перевірки за п.п.12.2.1 і 12.2.2.

12.2.6 Побудувати графіки залежностей похибок від струму навантаження.

12.2.7 Зробити висновки.

12.3 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

12.3.1 Виконаємо експеримент з перевірки лічильника для $U = U_{\text{ном}} = 220\text{В}$ $\cos\varphi = 1$ і значеннях струму навантаження 5, 4, 3, 2 та 1А, використовуючи схему, наведену на рис.12.1. Кожне вимірювання проводимо тричі. Результати експерименту заносимо до таблиці 12.1.

12.3.2 Встановлюємо $\cos\varphi = 0,5$ і проводимо експеримент аналогічно п.12.3.1. Результати експерименту заносимо до таблиці 12.1.

Таблиця 12.1 - Результати вимірювань

	$I_{\text{ном}}$	$80\% I_{\text{ном}}$	$60\% I_{\text{ном}}$	$40\% I_{\text{ном}}$	$20\% I_{\text{ном}}$
$U, \text{В}$					
$\cos\varphi$					
$I, \text{А}$					
$n, \text{об}$					
$t, \text{с}$					
$P, \text{Вт}$					

12.3.3 Перевірка лічильника на самохід.

Лічильник на самохід перевіряється при напрузі $U = 110\%$ від $U_{\text{ном}}$ і відключеному струмі через струмову обмотку лічильника. Виконавши ці умови експерименту встановлюють, чи не обертався при цьому диск лічильника. Це означає, що самохід у даного лічильника відсутній.

12.3.4 Визначення порогу чутливості лічильника.

Для того, щоб знайти поріг чутливості лічильника, визначають мінімальне значення струму через струмову обмотку лічильника, для якого диск робить більше одного оберту і не зупиняється.

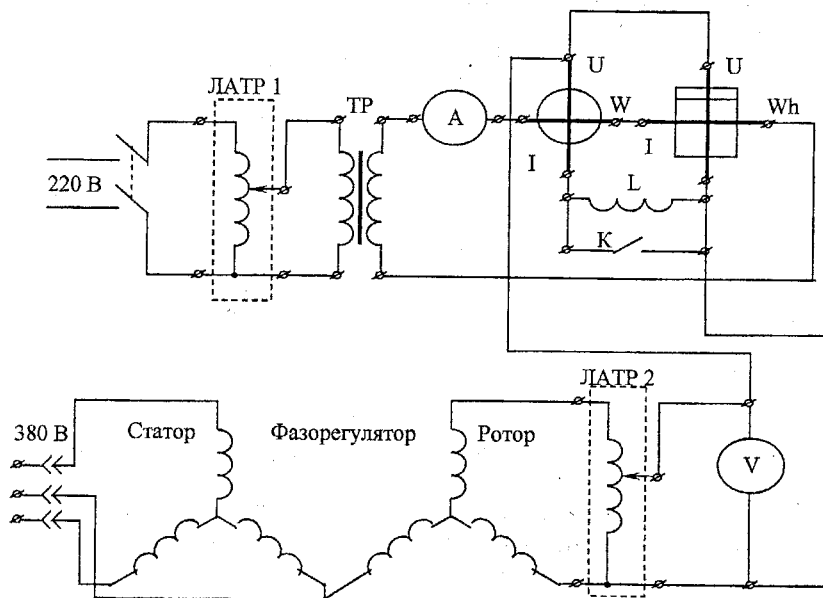


Рисунок 12.1 – Схема перевірки лічильника активної енергії

12.3.5 Складемо таблицю використаних в даній роботі засобів вимірювань (табл. 12.2).

Таблиця 12.2 - Засоби вимірювань

№ приладу	Назва приладу, тип	Клас точності	Умовне позначення	Діапазон вимірювання	Заводський номер	Використаний діапазон вимірювання
1.	Амперметр Э539					
2.	Вольтметр Э545					
3.	Ватметр Д5066					
4.	Міліамперметр Э59					
5.	Лічильник СО-М446					

12.4 ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТУ

12.4.1 Обчислимо похибки лічильника за умов перевірки п.12.3.1.

Визначимо спочатку номінальну постійну досліджуваного лічильника і приймемо його за дійсне значення:

$$C_n = \frac{P_{\text{ам}} \cdot t_{\text{сек}}}{n_{\text{об}}} \quad (12.1)$$

Визначаємо виміряну постійну лічильника для $I_1 = 5\text{A}$,

$$t_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{N}, \quad (12.2)$$

$$C_e = \frac{P_e \cdot t_{\text{ср}}}{n_e} \quad (12.3)$$

Відносна похибка лічильника:

$$\delta = \frac{C_e - C_n}{C_n} \cdot 100\%. \quad (12.4)$$

Аналогічно розраховуються дійсні постійні та відносні похибки лічильника для інших струмів навантаження. Результати розрахунків записуємо в таблицю (табл. 12.3).

12.4.2 Оцінимо похибки лічильника за умов перевірки п.3.2 аналогічно тому, як виконували розрахунки в попередньому пункті. Результати розрахунків записуємо в таблицю (табл.12.3).

Таблиця 12.3 - Результати розрахунків та оцінки похибок лічильника

I, A	5	4	3	2	1
$C, \frac{\text{Вт} \cdot \text{с}}{\text{об}}$					
$\delta, \%$					

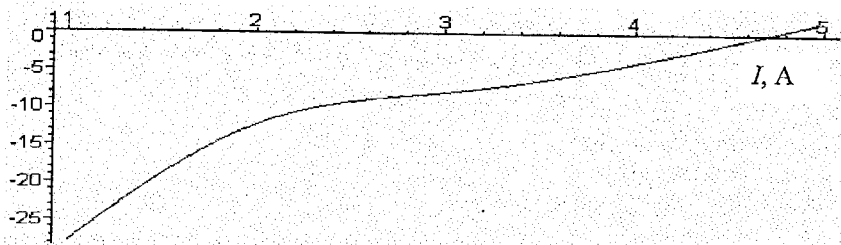
12.4.3 Визначимо поріг чутливості лічильника СО-М446

$$S = \frac{I_{\text{мін}}}{I_{\text{ном}}} \cdot 100\%. \quad (12.5)$$

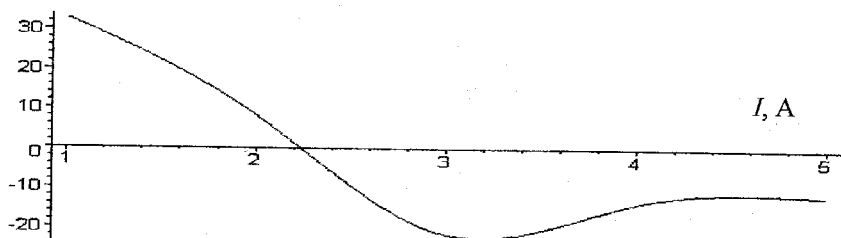
12.4.4 Побудуємо графіки залежностей похибки від струму навантаження для $\cos\phi = 1$ і $\cos\phi = 0,5$. Вони можуть мати такий вигляд (рис.12.2, а),б).

12.5 ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Індукційні лічильники застосовуються для вимірювання як активної, так і реактивної енергії. Реактивна енергія, як і реактивна потужність, у виробничих умовах вимірюється тільки в трифазних колах. Конструктивно лічильники активної та реактивної енергії нічим не відрізняються, однак підключення обертальних елементів реактивних лічильників здійснюється за іншими схемами, ніж підключення елементів лічильників активної енергії.



a) $\cos \varphi = 1$



б) $\cos \varphi = 0.5$

Рисунок 12.2 – Графіки залежностей похибки лічильника від струму навантаження

Індукційні вимірювальні механізми лічильників електричної енергії бувають двох типів: радіальні та тангенціальні. Однак принцип дії їх однаковий.

Розглянемо будову та принцип дії індукційного механізму лічильника радіального типу (рис.12.3).

В механізмі є два електромагніти (рис.12.3, а) з феромагнітними шихтованими осердями, на одному із яких (A) знаходиться обмотка W_U , а на другому (B) – W_I . Обмотка W_U підключається до напруги на навантаженні U , через неї протікає струм I_U , а через обмотку W_I протікає струм навантаження I .

Між полюсами електромагніту A і над полюсами електромагніту B проходить закріплений на осі алюмінієвий диск D . Диск проходить також між полюсами постійного магніту M . На осі є черв'ячна передача, за допомогою якої обертова вісь діє на відліковий механізм BM .

В електромагніті A струмом, що проходить в обмотці W_U , створюються два магнітні потоки: Φ_U і Φ_L ; в електромагніті B потік Φ_I створюється струмом I в обмотці W_I . Потік Φ_U перетинає диск один раз, потік Φ_I – два рази, потік Φ_L диск не перетинає і називається неробочим потоком.

На рис.12.3, б) показані сліди потоків Φ_U та Φ_I , а також контури, в яких протікають вихрові струми, що виникають у дискові під дією перетинаючих диск змінних потоків Φ_U та Φ_I . Як результат взаємодії кожного з потоків Φ_U , Φ_I та $-\Phi_I$ з вихровими струмами, викликаними потоком, що

знаходиться по сусідству з кожним із них, виникає обертальний момент, під дією якого диск починає обертатись. Обертальний момент дорівнює:

$$M_{об} = C \cdot f \cdot \Phi_U \cdot \Phi_I \cdot \sin \Psi, \quad (12.6)$$

де C – постійний коефіцієнт;

f – частота струму;

Ψ – зсув фаз між потоками Φ_U та Φ_I .

При роботі на лінійній ділянці кривої намагнічування матеріалів осердя електромагнітів маємо:

$$\Phi_I = K_1 \cdot I; \quad \Phi_U = K_2 \cdot I_U = K_2 \cdot U / Z_U,$$

де K_1, K_2 – постійні коефіцієнти;

Z_U – повний опір обмотки напруги, який має практично індуктивний характер.

Можна прийняти $Z_U \approx X_U = 2\pi f \cdot L_U$, де L_U – індуктивність обмотки напруги.

Тоді $\Phi_U = K_2 \cdot U / 2\pi f \cdot L_U = K_3 \cdot U / f$, де $K_3 = K_2 / (2\pi \cdot L_U)$.

Підставивши вирази Φ_U та Φ_I в (12.6), одержимо:

$$M_{об} = K \cdot U \cdot I \cdot \sin \Psi, \quad (12.7)$$

де $K = C \cdot K_1 \cdot K_3$.

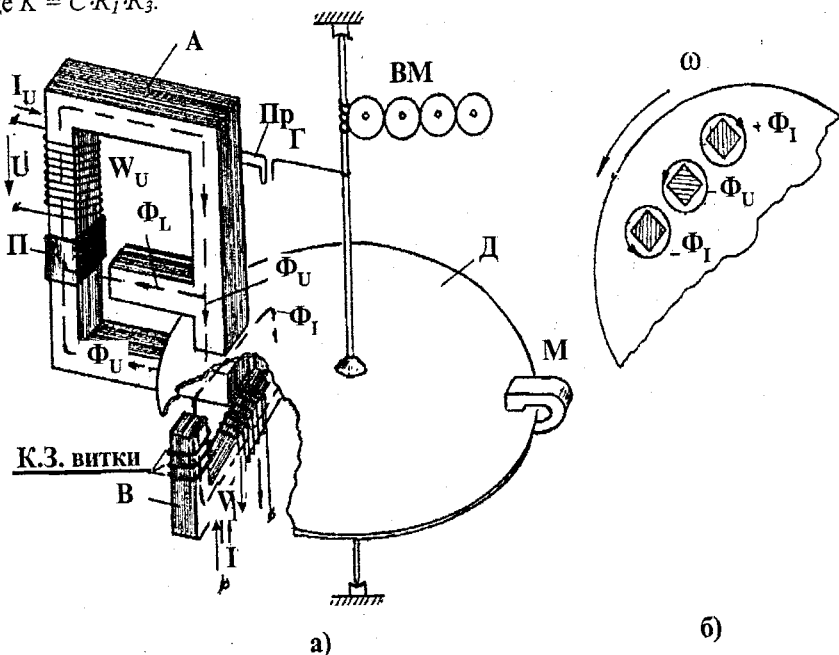


Рисунок 12.3 – Індукційний механізм лічильника радіального типу

Щоб обертальний момент був пропорційний потужності P , потрібно, щоб $\sin \Psi = \cos \varphi$. Звернемося до векторної діаграми на рис.12.4.

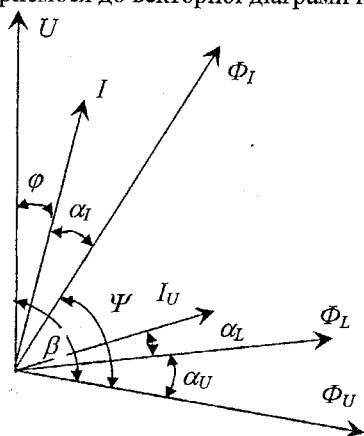


Рисунок 12.4 – Векторна діаграма лічильника

Потік Φ_I відстає від струму I на кут α_I внаслідок втрат на вихрові струми в диску. Потоки Φ_U та Φ_L відстають від струму I_U на кути α_U та α_L , але $\alpha_U > \alpha_L$, оскільки потік Φ_U перетинає диск і створює вихрові струми в ньому. Як було відмічено вище, потрібно, щоб $\sin \Psi = \cos \varphi$, або $\Psi + \varphi = 90^\circ$. Кут $\beta = \Psi + \alpha_I + \varphi$, тобто кут β повинен бути $> 90^\circ$. Для цього в механізмі лічильника і створюється неробочий потік Φ_L , а виконання рівності $\Psi + \varphi = 90^\circ$ досягається зміною кута α_I . Кут α_I регулюється числом короткозамкнених витків на магнітопроводі B (грубе регулювання) та плавною зміною струму в додатковій обмотці з регульованим опором, яка намотується також на цей магнітопровід (на рис.12.3, а) додаткова обмотка не показана). Крім того, на кут β впливає також і потік Φ_L , а також і кут α_L . Для регулювання α_L на шляху потоку Φ_L розташовується мідна пластина, яка переміщається вздовж осердя електромагніту. При цьому відбувається зміна втрат в пластині і, таким чином, кута α_L . Переліченими прийомами добиваються, щоб $\Psi + \varphi = 90^\circ$, тоді $\sin \Psi = \cos \varphi$.

В результаті можна записати:

$$M_{об} = K \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi = K \cdot P. \quad (12.8)$$

Під дією цього моменту диск лічильника обертався би, якби не було ніяких інших моментів, із зростаючою швидкістю. Але диск проходить своїм краєм між полюсами постійного магніту M . В результаті взаємодії магнітного поля постійного магніту із струмами, які з'явилися в диску з його переміщенням між полюсами, виникає гальмівний момент, значення якого пропорційне кутовій швидкості диска $\omega = d\alpha/dt$.

$$M_z = C_1 \cdot \omega = C_1 \cdot \frac{d\alpha}{dt}. \quad (12.9)$$

Для рівності обертального та гальмівного моментів диск буде обертатись з рівномірною швидкістю, і будемо мати:

$$K \cdot P = C_1 \cdot d\alpha/dt \text{ або } K \cdot P \cdot dt = C_1 \cdot d\alpha$$

Проінтегрувавши останню рівність, одержимо:

$$\int_{t_1}^{t_2} K \cdot P \cdot dt = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} C_1 \cdot d\alpha \text{ або } K \cdot W = C_1 \cdot \alpha \text{ або } W = (C_1/K) \cdot \alpha. \quad (12.10)$$

Із (12.9) виходить, що активна енергія, яка пройшла через лічильник за час від t_1 до t_2 в навантаження, пропорційна куту повороту диска α . Якщо розділити кут α на 2π , вийде число обертів диска N : $N = \alpha/2\pi$, звідки $\alpha = N \cdot 2\pi$.

Підставивши $\alpha = 2\pi N$ в (12.9), одержимо $W = (C_1/K) \cdot 2\pi \cdot N$ або

$$W = C \cdot N, \quad (12.11)$$

де $C = (C_1 \cdot 2\pi)/K$ називається *постійною лічильника*, $C = W/N$ та показує, яка енергія проходить через лічильник за один оберт диска.

Величина, що обернена постійній лічильника і показує скільки обертів диск лічильника робить при проходженні через нього одиниці енергії (наприклад, 1 кВт·год), називається *передатковим числом* лічильника. Номінальне передаточне число вказується на щитку лічильника.

Ми розглядали роботу механізму лічильника в припущенні, що крім обертального та гальмівного моментів ніякі інші моменти на рухому частину механізму не діють. Насправді в опорах, лічильному механізмі має місце тертя. Для компенсації моменту тертя створюється додатковий (компенсаційний) обертальний момент. Але за незмінної напруги компенсаційний момент є величиною постійною, а момент тертя залежить від швидкості диска. Компенсація, зазвичай, здійснюється для струму навантаження, рівному 10% від номінального.

Компенсаційний момент може бути більшим від моменту тертя і тоді, навіть з відключеним навантаженням, диск може обертатися. Це явище називається *самоходом лічильника*. Усувається самохід за допомогою гачка Г, який закріплюється на осі, та прапорця Пр пластини, яка використовується для створення компенсаційного моменту (рис. 12.3, а).

До характеристик лічильника відноситься *поріг чутливості*, під яким розуміють найменше значення струму у процентах від $I_{\text{ном}}$, для якого починається безперервне обертання диска.

Клас точності лічильника дорівнює максимально допустимій відносній похибці (у відсотках) для номінальних значень струму та коефіцієнта потужності. З відхиленням цих величин від номінальних похибка лічильника визначається за таблицею.

Наприклад, для лічильника класу точності 1,0 для струму, який складає 5–10% від номінального та $\cos\varphi = 1$, межа припустимої похибки дорівнює $\pm 2,0\%$; для лічильника класу 2,5 для струму 10–20% від номінального та $\cos\varphi = 1$ межа припустимої похибки дорівнює $\pm 3,5\%$.

Значення порогу чутливості S залежно від класу точності індукційних лічильників показані в табл. 12.4.

Таблиця 12.4 – Залежність порогу чутливості від класу точності

Клас точності	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
Поріг чутливості S , %	0,3	0,4	0,5		1,0	

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

- 1 Структурна схема і принцип дії індукційного лічильника.
- 2 Вивести рівняння перетворення індукційного лічильника.
- 3 Які моменти діють на рухому частину індукційного вимірювального механізму?
- 4 Як визначається стала (постійна) лічильника і її фізичний зміст?
- 5 Що таке передагкове число лічильника?
- 6 Як визначити абсолютну похибку лічильника?
- 7 Як визначити відносну похибку лічильника?
- 8 За рахунок якого фізичного явища створюється гальмівний момент і як він визначається?
- 9 За рахунок якого фізичного явища створюється обертальний момент і як він визначається?
- 10 Поясніть фізичну сутність явища “самохід лічильника”. Що таке компенсаційний момент лічильника?
- 11 Дайте поняття чутливості і порогу чутливості. Як експериментально визначити поріг чутливості індукційного лічильника?

ДОДАТКИ

Додаток А

Таблиця А.1 - Термо-е.р.с. стандартизованих термопар

Термо-пара	Термо – е. р. с. , мВ								
	МКн (Т)	ЖКн (J)	ХК (E)	ХА (K)	ВР 5/20 (C)	ВР 10/ 20	ПР 10/0 (S)	ПР 13/0 (R)	ПР 30/6 (B)
t, °C									
100	4,28	5,27	6,898	4,095	1,33	1,00	0,645	0,647	0,033
200	9,28	10,77	14,57	8,137	2,87	2,10	1,440	1,468	0,178
300	14,86	16,32	22,88	12,207	4,52	3,20	2,323	2,400	0,431
400	20,87	21,84	31,48	16,395	6,21	4,30	3,260	3,407	0,786
500		27,39	40,27	20,640	7,91	5,40	4,234	4,471	0,241
600		33,09	49,09	24,902	9,6	6,50	5,237	5,582	1,791
700		39,13	57,82	29,128	11,27	7,60	6,274	6,741	2,430
800		45,50	66,42	33,277	12,93	8,65	7,345	7,949	3,154
900		51,87		37,325	14,56	9,70	8,448	9,203	3,957
1000		57,94		41,269	16,14	10,70	9,585	10,503	4,833
1100		63,78		45,108	17,67	11,70	10,754	11,846	5,777
1200		69,54		48,828	19,15	12,65	11,947	13,224	6,783
1300				52,398	20,58	13,60	13,155	14,624	7,845
1400					21,96	14,50	14,368	16,035	8,952
1500					23,30	15,35	15,576	17,445	10,094
1600					24,59	16,15	16,771	18,842	11,257
1700					25,82	16,90	17,942	20,215	12,426
1800					27,0	17,60			13,585
2000					29,18	18,90			
2200					31,14	20,15			
2400					32,86	21,30			
2500					33,64	21,85			

Температура холодних спаїв при 0°C

Додаток Б

Протокол повірки приладу вимірювання температур

Вінницьке енергетичне підприємство						Протокол № Лабораторна перевірка														
„Теплові мережі”																				
Найменування приладу																				
Тип									Завод - виробник											
Градуювання									Клас точності											
Межі вимірювань																				
Зразковий прилад																				
Результати зовнішнього огляду																				
Перевірка основної похибки																				
Покази приладу що повіряється					Покази зразкового приладу					Похибка приладу, що повіряється					Допустима похибка			Умови повідомлення		
мВ, з врахуванням температури вільних кінців °С					хід					хід										
					прямий		зворотний			прямий		зворотний								варіанти
Висновок																				
Лабораторну повірку виконав																				
															підпис, прізвище, дата					
Протокол перевірки															підпис, прізвище, дата					

Додаток В

Таблиця В1 - Значення нормальної функції розподілу

$$\Phi^*(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt$$

X	$\Phi^*(x)$	X	$\Phi^*(x)$	X	$\Phi^*(x)$	X	$\Phi^*(x)$
-0.00	0.5	-1.6	0.0548	0.00	0.5	1.6	0.99452
-0.1	0.4602	-1.7	0.0495	0.1	0.5398	1.7	0.9554
-0.2	0.4207	-1.8	0.0359	0.2	0.5793	1.8	0.9641
-0.3	0.3821	-1.9	0.0288	0.3	0.6179	1.9	0.9713
-0.4	0.3446	-2	0.0226	0.4	0.6554	2	0.9772
-0.5	0.3085	-2.2	0.0139	0.5	0.6915	2.2	0.9861
-0.6	0.2743	-2.4	0.0082	0.6	0.7257	2.4	0.9918
-0.7	0.2420	-2.6	0.0047	0.7	0.7580	2.6	0.9953
-0.8	0.2119	-2.8	0.0026	0.8	0.7881	2.8	0.9974
-0.9	0.1841	-3	0.0014	0.9	0.8159	3	0.9986
-1	0.1587	-3.2	0.0007	1	0.8413	3.2	0.993
-1.1	0.1357	-3.4	0.0003	1.1	0.8643	3.4	0.997
-1.2	0.1151	-3.6	0.0002	1.2	0.8849	3.6	0.998
-1.3	0.0968	-3.8	0.00007	1.3	0.9032	3.8	0.99993
-1.4	0.0808	-4.0	0.00003	1.4	0.9192	4.0	0.99997
-1.5	0.0668	-5.0	0.000003	1.5	0.9332	5.0	0.99999

Додаток Г
Таблиця Г.1 - Значення критерію χ^2 для довірчої імовірності P

Число ступенів свободи	χ^2 при довірчій імовірності, P													
	0,999	0,995	0,99	0,95	0,9	0,7	0,5	0,3	0,1	0,05	0,25	0,01	0,05	0,001
15	3,48	4,605	5,23	7,26	8,55	11,7	14,3	17,2	22,4	25	27,4	30,6	32,9	37,6
16	3,94	5,14	5,81	7,97	9,31	12,6	15,3	18,4	23,5	26,2	28,8	32	34,6	39,2
17	4,42	5,7	6,41	8,67	10,1	13,5	16,3	19,3	24,8	27,5	30,3	33,3	35,7	40,8
18	4,9	6,26	7,02	9,4	10,9	14,4	17,3	20,5	25,9	28,8	31,5	34,7	37,1	42,3
19	5,42	6,84	7,64	10,1	11,6	15,4	18,3	21,7	27,2	30,2	32,9	36,1	38,6	43,9
20	5,92	7,44	8,26	10,9	12,4	16,3	19,3	22,8	28,4	31,4	34,2	37,6	40	45,4
22	6,97	8,65	9,55	12,3	14,0	18,1	21,3	24,9	30,8	33,9	36,7	40,3	42,9	48,2
24	8,09	9,89	10,8	13,8	15,6	19,9	23,3	27,1	33,1	36,5	39,4	43	45,6	51,1
26	9,23	11,2	12,2	15,4	17,3	21,8	25,3	29,1	35,6	39	41,9	45,8	48,4	54,1
28	10,4	12,5	13,6	16,9	18,9	23,7	27,3	31,4	37,8	41,4	44,5	48,2	51	56,8
30	11,6	13,8	14,9	18,5	20,6	25,5	29,3	33,6	40,2	43,8	47,1	51	53,7	59,7
35	14,7	17,2	18,5	22,5	24,8	30,2	34,3	38,8	46,2	49,7	53,2	57,4	60,2	66,5
40	17,9	20,7	22,2	26,5	29,0	34,9	39,3	44	52	55,6	59,2	63,6	66,8	73,6
45	21,2	24,3	25,9	30,6	33,3	39,6	44,3	49,5	57,6	61,6	65,2	69,8	73,4	80,1
50	24,7	28	29,7	34,8	37,7	44,3	49,4	54,5	63	67,5	71,5	76	79,5	86,5

Додаток Д

Таблиця Д1 - Граничні значення нормованих відхилень дослідного розподілу від значення теоретичного розподілу для заданих довірчих імовірностей (за Колмогоровим)

Довірча імовірність	Нормоване відхилення	Довірча імовірність	Нормоване відхилення
0,01	0,44	0,6	0,89
0,05	0,52	0,7	0,97
0,10	0,57	0,8	1,07
0,15	0,61	0,9	1,22
0,20	0,65	0,95	1,36
0,30	0,71	0,98	1,52
0,40	0,77	0,99	1,63

Таблиця Д2 - Значення коефіцієнтів t розподілу Стьюдента

n - 1	P=0.683	0.9	0.95	0.99	0.997	0.999
	t	t	t	t	t	t
1	1.833	6.314	12.71	66.66	23.48	636.6
2	1.283	2.920	4.303	9.825	18.72	31.62
3	3.197	2.353	3.182	5.841	9.005	12.91
4	1.142	2.132	2.776	4.604	6.485	8.615
5	1.110	2.015	2.571	4.032	5.404	6.865
6	1.089	1.934	2.447	3.707	4.819	5.963
7	1.075	1.895	2.365	3.499	4.455	5.408
8	1.066	1.859	2.306	3.355	4.209	5.041
9	1.058	1.833	2.262	3.250	4.032	4.783
10	1.052	1.812	2.228	3.169	3.898	4.596
12	1.042	1.782	2.179	3.054	3.711	4.322
14	1.036	1.761	2.145	2.977	3.586	4.146
16	1.031	1.746	2.120	2.921	3.496	4.025
18	1.027	1.734	2.101	2.878	3.43	3.929
20	1.024	1.725	2.086	2.845	3.378	3.853
22	1.021	1.717	2.074	2.819	3.336	3.792
24	1.020	1.711	2.064	2.797	3.302	3.747
26	1.019	1.706	2.056	2.779	3.274	3.719
28	1.017	1.701	2.048	2.763	3.250	3.676
30	1.016	1.697	2.042	2.750	3.230	3.654
40	1.011	1.684	2.021	2.704	3.160	3.551
60	1.007	1.671	2	2.660	3.093	3.463
100	1.003	1.660	1.984	2.626	3.042	3.402
200	0.999	1.653	1.972	2.601	3.003	3.358
	0.998	1.645	1.960	2.576	2.966	3.294

Додаток Е

Таблиця Е1 - Номінальна статична характеристика перетворювача ХА (К)

t, °C	Термо- е.р.с., мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
20	0,798	0,838	0,879	0,919	0,960	1	1,041	1,081	1,122	1,162
30	1,203	1,244	1,285	1,325	1,366	1,407	1,448	1,489	1,529	1,57
40	1,611	1,652	1,693	1,734	1,776	1,817	1,858	1,899	1,94	1,981
50	2,022	2,064	2,105	2,146	2,188	2,229	2,270	2,312	2,353	2,394
60	2,436	2,477	2,519	2,560	2,601	2,643	2,684	2,726	2,767	2,809
70	2,850	2,892	2,933	2,975	3,016	3,058	3,1	3,141	3,183	3,224
80	3,266	3,307	3,349	3,390	3,432	3,473	3,515	3,556	3,598	3,639
90	3,681	3,722	3,764	3,805	3,847	3,888	3,93	3,971	4,012	4,054
100	4,095	4,137	4,178	4,219	4,261	4,302	4,343	4,384	4,426	4,467
110	4,508	4,549	4,590	4,632	4,673	4,714	4,755	4,796	4,837	4,878
120	4,919	4,960	5,001	5,042	5,083	5,124	5,164	5,205	5,246	5,287
130	5,327	5,368	5,409	5,450	5,490	5,531	5,571	5,612	5,626	5,693
140	5,733	5,774	5,814	5,855	5,895	5,936	5,976	6,016	6,057	6,097
150	6,137	6,177	6,218	6,258	6,298	6,338	6,378	6,419	6,459	6,499
160	6,539	6,579	6,619	6,659	6,699	6,739	6,779	6,819	6,859	6,899
170	6,939	6,979	7,019	7,059	7,099	7,139	7,179	7,219	7,259	7,299
180	7,338	7,378	7,418	7,458	7,498	7,538	7,578	7,618	7,658	7,697
190	7,737	7,777	7,817	7,857	7,897	7,937	7,977	8,017	8,057	8,097
200	8,137	8,177	8,217	8,257	8,297	8,337	8,377	8,417	8,457	8,497
210	8,537	8,577	8,617	8,657	8,697	8,737	8,777	8,817	8,857	8,898
220	8,938	8,978	9,018	9,058	9,099	9,139	9,179	9,22	9,260	9,3
230	9,341	9,381	9,421	9,462	9,507	9,543	9,583	9,624	9,664	9,705
240	9,745	9,786	9,826	9,867	9,907	9,948	9,989	10,029	10,07	10,111
250	10,151	10,192	10,233	10,274	10,315	10,355	10,396	10,437	10,478	10,519
260	10,560	10,600	10,641	10,628	10,723	10,764	10,805	10,805	10,887	10,928
270	10,969	11,011	11,051	11,093	11,134	11,175	11,216	11,257	11,298	11,339
280	11,380	11,422	11,463	11,504	11,576	11,587	11,628	11,669	11,711	11,752
290	11,793	11,835	11,876	11,911	11,959	12	12,042	12,083	12,125	12,166
300	12,207	12,249	12,290	12,332	12,373	12,415	12,456	12,498	12,539	12,581

ЛІТЕРАТУРА

- 1 Иванова Г.М., Кузнецов Н.Д., Чистяков В.С. Теплотехнические измерения и приборы. – М.: 1984. – 232 с.
- 2 Кузнецов Н.Д., Чистяков В.С. Сборник задач и вопросов по теплотехническим измерениям и приборам. – М.: 1985. – 328 с.
- 3 Кухарчук В.В., Кучерук В.Ю., Долгополов В.П., Грумінська Л.В. Метрологія та вимірювальна техніка. Навчальний посібник. – Вінниця: УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2004. – 252 с.
- 4 Г.А. Мурин. Теплотехнические измерения. – М.: Энергия, 1979.- 424 с.
- 5 Бурдун Г.Д., Марков Б.Н. Основы метрологии. – М.: Изд-во стандартов, 1975. – 335 с.
- 6 Грохольский А.Л. Основы авиационной метрологии. – К.: КИИГА, 1983. – 80с.
- 7 Сергеев А.Г., Крохин В.В. Метрология. – М.: Логос, 2001. – 408с.
- 8 Володарський Є.Т., Кухарчук В.В., Поджаренко В.О., Сердок Г.Б. Метрологічне забезпечення вимірювань і контроль. – Вінниця: ВДТУ, 2001. – 219с.

Навчальне видання

**Олексій Михайлович Головченко
Олександр Юрійович Співак
Лариса Василівна Грумінська**

Теплотехнічні вимірювання та метрологія

Лабораторний практикум

Оригінал-макет підготовлено авторами

Редактор Т.О. Старічек

Навчально-методичний відділ ВНТУ
Свідоцтво Держкомінформу України
серія ДК № 746 від 25.12.2001
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ВНТУ.

Підписано до друку 18.07.2006 р.	Гарнітура Times New Roman
Формат 29,7×42¼	Папір офсетний
Друк різнографічний	Ум. друк. арк. 5.02
Тираж 75 прим.	
Зам. № 2006-129	

Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі
Вінницького національного технічного університету
Свідоцтво Держкомінформу України
серія ДК № 746 від 25.12.2001
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95.