

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

ЗАСОБИ ВИМІРЮВАННЯ НЕЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН

ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

з курсу

«ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ТЕХНІЧНІ ВИМІРЮВАННЯ»

для студентів спеціальності 6.051001
«Метрологія і інформаційно-вимірювальні технології»
денної та заочної форм навчання

Затверджено
редакційно-видавничою
радою університету,
протокол № 2 від 01.12.2010 р.

Харків
НТУ «ХПІ»
2011

ББК 34.9я7
336
УДК 681.2.08

Рецензенти: *Ю. Ф. Павленко*, д-р техн. наук, проф.,
ННЦ «Інститут метрології»
Г. М. Сучков, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ»

Автори: *В. К. Гусельніков, Л. О. Медведєва,*
О. Є. Тверитникова, І. В. Григоренко, О. В. Гусельніков

336 Засоби вимірювання неелектричних величин : лабораторний
практикум / В. К. Гусельніков, І. В. Григоренко, О. Є. Тверитникова та
ін. – Х. : НТУ «ХПІ», 2011. – 76 с.

ISBN

Практикум містить вісім лабораторних робіт, що призначені
для глибокого засвоєння теоретичних основ побудови неелектричних
вимірювальних перетворювачів, а також набуття практичних навичок
роботи з приладами.

Для студентів технічних вузів денної й заочної форм навчання
електротехнічних спеціальностей.

Табл. 25. Іл. 33. Библиогр. : 27 назв

ББК 30.10+34.9

ISBN

© В. К. Гусельніков,
І. В. Григоренко,
О. Є. Тверитникова,
Л. О. Медведєва,
О. В. Гусельніков, 2011 р.

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень.....	4
Вступ.....	5
Лабораторна робота № 1 «Дослідження оптичних пірометрів».....	6
Лабораторна робота № 2 «Дослідження індуктивних вимірювальних перетворювачів».....	14
Лабораторна робота № 3 «Дослідження реостатних вимірювальних перетворювачів».....	23
Лабораторна робота № 4 «Дослідження фотоелектричних люксометрів».....	32
Лабораторна робота № 5 «Дослідження ємнісних вимірювальних перетворювачів».....	39
Лабораторна робота № 6 «Дослідження теплових вимірювальних перетворювачів».....	45
Лабораторна робота № 7 «Дослідження п'єзоелектричних вимірювальних перетворювачів».....	55
Лабораторна робота № 8 «Дослідження тензорезисторних вимірювальних перетворювачів».....	67
Список літератури.....	74

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ФВ – фізична величина;
ПП – первинний перетворювач;
ГХ – градуювальна характеристика;
ЗВ – засіб вимірювання;
МХ – метрологічна характеристика;
ФП – функція перетворення;
ЧЕ – чутливий елемент;
КР – кільцевий реостат;
ДЖ – джерело живлення;
ПС – поглинаюче скло;
ПЛ – пірометрична лампа;
ЧС – червоний світлофільтр;
ЗО – зразковий опір;
РК – регулювальне кільце;
ОК – окуляр;
ОБ – об'єктив;
ЦВ – цифровий вольтметр;
ЕВ – електронний вольтметр;
ЦО – цифровий омметр;
ТКЧ – температурний коефіцієнт частоти;
ФНЧ – фільтр низьких частот;
БЖ – блок живлення;
ТКР – термочутливий кварцовий резонатор;
Г – генератор.

ВСТУП

Найбільш важливу роль при вимірюванні неелектричних величин відіграють перетворювачі неелектричних величин в електричні. Вхідною величиною таких перетворювачів може бути зосереджена сила, крутний момент, тиск газу або рідини. Вихідною величиною, як правило, є деформація тіла самого перетворювача, сприймана наступним перетворювальним елементом, вхідною величиною якого є механічне переміщення або механічна напруга.

Цей лабораторний практикум, що містять вісім робіт, призначено для глибокого засвоєння теоретичних основ побудови неелектричних вимірювальних перетворювачів, а також набуття практичних навичок роботи з приладами. Наводяться описи приладів, їх функціональні схеми, технічні можливості, джерела похибок. Детально розглянута підготовка до роботи, налагодження та методика зняття показань.

Перша лабораторна робота присвячена ознайомленню з принципом дії, пристроєм оптичних пірометрів зі зникаючою ниткою. У другій роботі проводиться градування індуктивного диференціального перетворювача й дослідження його характеристик при роботі в різних режимах. Третя робота присвячена вивченню принципів побудови реостатних перетворювачів. У четвертій роботі проводиться дослідження фотоелектричних люксометрів. У п'ятій роботі проводиться дослідження принципів дії ємнісних перетворювачів. Шоста робота присвячена дослідженню теплових вимірювальних перетворювачів. Сьома робота присвячена п'єзоелектричним вимірювальним перетворювачам. Восьма робота – дослідженню тензорезисторних вимірювальних перетворювачів.

Теми лабораторних робіт являють інтерес для майбутньої практичної діяльності бакалаврів і відповідають програмі курсу «Інформаційні технології та технічні вимірювання» для студентів спеціальності "Метрологія та інформаційно-вимірювальні технології" денної та заочної форм навчання.

Лабораторна робота № 1

ДОСЛІДЖЕННЯ ОПТИЧНИХ ПІРОМЕТРІВ

Мета роботи: ознайомлення з принципом дії і будовою оптичних пірометрів зі зникаючою ниткою, вивчення установки для перевірки пірометрів, набуття навичок перевірки й експлуатації оптичних пірометрів.

Загальні відомості

Оптичні пірометри зі зникаючою ниткою застосовуються для вимірювання яскравісних температур (температур, що відповідають випромінюванню абсолютно чорного тіла) різних об'єктів в області спектра. Інтервал вимірюваних температур для таких пірометрів становить від 700 до 8000 °С. Принцип дії полягає в порівнянні яскравості (інтенсивності випромінювання) нагрітого тіла в променях певної довжини хвиль із яскравістю нитки пірометричної лампи розжарювання, попередньо проградуваної за випромінюванням абсолютно чорного тіла. При цьому, якщо нагріте тіло й нитка лампи мають однакову яскравість світіння та однакову яскравісну температуру, то нитка немов би зникає на тлі тіла, тому такі пірометри й називаються пірометрами зі зникаючою ниткою.

До числа найпоширеніших оптичних пірометрів зі зникаючою ниткою відносять досліджуваний у цій роботі переносний пірометр типу «ОППИР-09». Він має такі технічні характеристики (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 – Технічні характеристики «ОППИР-09»

Діапазон вимірюваних температур, °С	800–2000
Основна припустима похибка, °С	
для піддіапазону 800–1400 °С	± 20
для піддіапазону 1400–2000 °С	± 30
Варіація, °С	
для піддіапазону 800–1400 °С	± 15
для піддіапазону 1400–2000 °С	± 20 ± 30

Схему будови пірометра «ОППИР-09» наведено на рис. 1.1, його принципову електричну схему наведено на рис. 1.2.

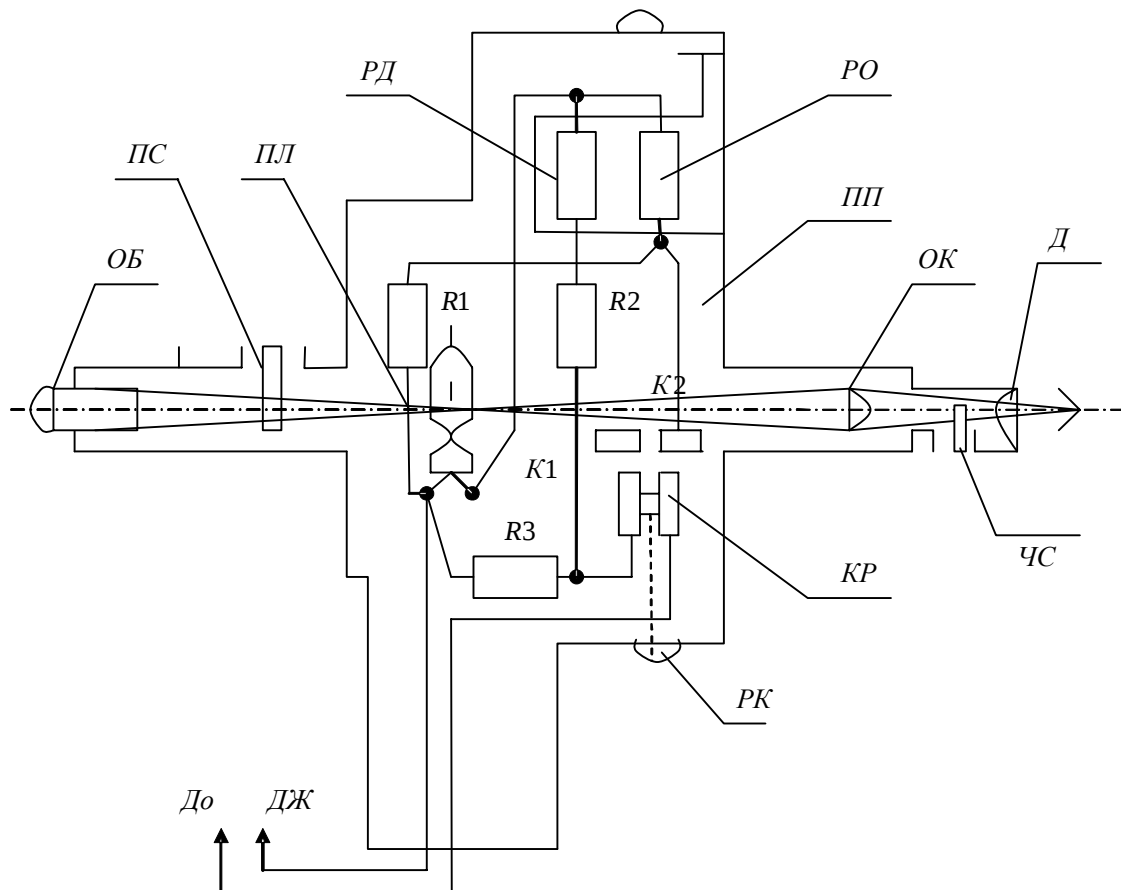


Рисунок 1.1 – Схема й будова «ОППИР-09»

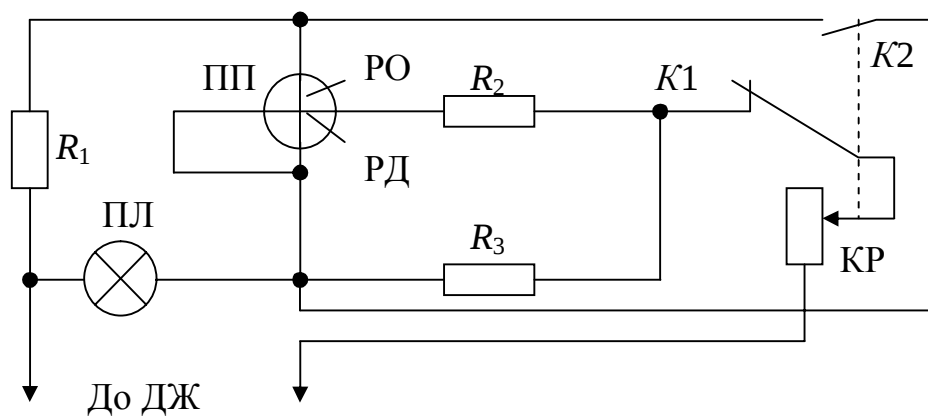


Рисунок 1.2 – Принципова електрична схема «ОППИР-09»

Прилад складається з первинного перетворювача – телескопа (об'єктив ОБ, окуляр ОК, червоний світлофільтр ЧС, діафрагма Д,

поглинач ПС) і електровимірjuвальної системи (пірометрична лампа ПЛ, кільцевий реостат КР, прилад, що показує, ПП, резистори, джерело живлення ДЖ).

Для забезпечення чіткості зображення об'єкта, температура якого вимірюється, об'єктив ОБ й окуляр ОК мають можливість пересування уздовж оптичної осі. Діафрагма Д використовується для обмеження й забезпечення сталості вихідного кута. Червоний світлофільтр ЧС призначений для монохроматизації пучка променів. При його введенні між окуляром і діафрагмою людське око сприймає тільки вузьку частину спектра з довжиною хвилі λ . ЧС можна виводити з поля зору для полегшення наведення й фокусування телескопу, але в момент зрівноважування яскравостей нагрітого тіла й нитки пірометричної лампи він обов'язково повинен бути введений. Поглинач ПС використовується для розширення робочого діапазону пірометра у бік високих температур. При виведенні ПС із поля зору робочий діапазон пірометра становить 800 – 1400 °С, при його введенні в поле зору – 1400 – 2000 °С. Як прилад, що показує, ПП використовується диференціальний амперметр магнітоелектричної системи із двома рамками. Рамка РО є основною й через додатковий резистор R_1 включається паралельно нитці пірометричної лампи ПЛ. Рамка РД є додатковою й через додатковий R_2 і шунтувальний R_3 резистори включається послідовно з ниткою ПЛ. Обертаючі моменти, створювані основною й додатковою рамками, спрямовані в протилежні сторони. Така схема ПП дозволяє зменшити неробочу ділянку його шкали до мінімального значення. Сила струму, що протікає через нитку ПЛ, а отже, і яскравість цієї нитки регулюється за допомогою кільцевого реостата КР. Повзунець П реостата з'єднаний з регулювальним кільцем РК, при повороті якого за годинниковою стрілкою опір КР зменшується, а яскравість нитки ПЛ збільшується. У крайньому лівому положенні кільця контакти К1 відключають джерело живлення, а контакти К2 замикають накоротко основну рамку ВП, що сприяє заспокоєнню рухомої частини ВП і зменшенню її коливань при перенесенні пірометра.

Для перевірки оптичних пірометрів призначена установка УПО-6 М2, що має технологічні характеристики, наведені у табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Технологічні характеристики установки УПО-6 М2

Границі безпосередньої повірки пірометрів, °C	800–2200
Живлення температурної лампи, А	6–35
Похибка вимірювання струму, А: при струмі 6 А	± 0,001
Похибка вимірювання струму, А: при струмі 35 А	± 0,006
Гранична припустима похибка повірки пірометрів, °C при 800 °C	± 5
Гранична припустима похибка повірки пірометрів, °C при 2000 °C	± 9

Зовнішній вигляд і електричну схему установки УПО-6 М2 наведено відповідно на рис. 1.3 і рис. 1.4.

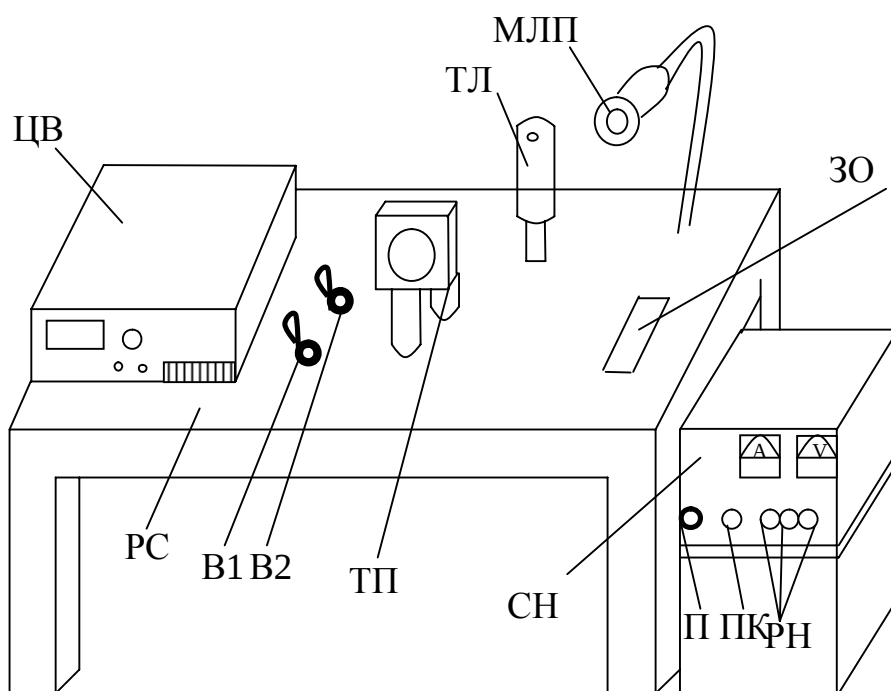


Рисунок 1.3 – Зовнішній вигляд установки УПО-6

Установка складається з робочого стола РС із тримачем пірометра ТП, світлофільтра С, об'єктива О, температурної лампи ТЛ, матової лампи підсвічування МЛП, зразкового опору ЗО ($R = 0,001 \text{ Ом}$), блока живлення пірометра БЖП, стабілізатора напруги СН, цифрового вольтметра ЦВ.

Увага! Під час роботи в установці протікають струми до 40 А, тому перед початком роботи необхідно перевірити якість заземлення всіх приладів.

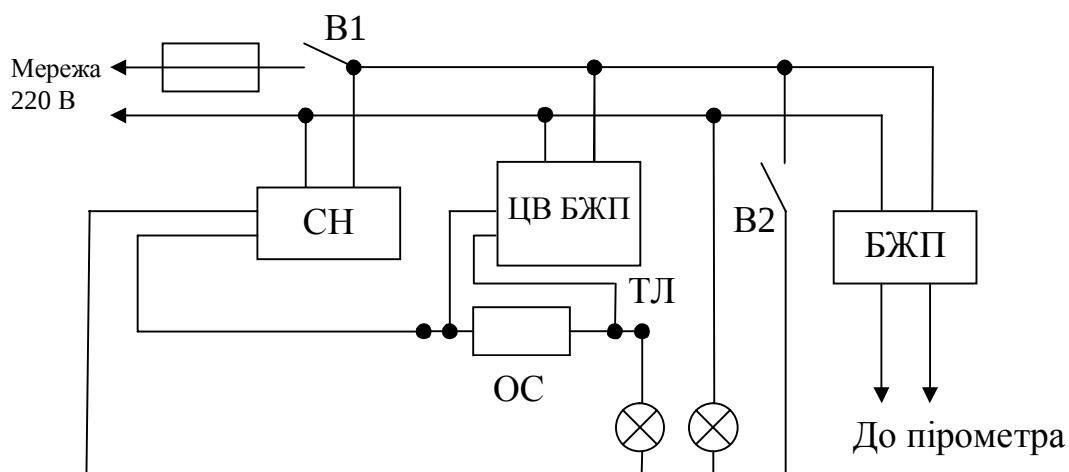


Рисунок 1.4 – Електрична схема установки УПО-6

Дослід 1. Повірка пірометра

Для перевірки пірометра на установці УПО-6 М2 необхідно виконати такі операції:

1. Установити вимикачі В1 В2, мережні вимикачі стабілізатора СН у положення ОТКЛ.

2. Встановити ручки регулювання напруги РН стабілізатора СН у крайнє ліве положення, а тумблер пульта керування ПК у нижнє положення.

3. Установити пірометр, що повіряється, у тримачі ТП так, щоб зображення нитки пірометричної лампи було розташовано симетрично зображенню стрічки температурної лампи ТЛ у місці, зазначеному індексом ТЛ. Об'єктив пірометра присунути до світлофільтра С із зазором 15 ± 5 мм, регулювальне кільце РК установити в крайнє ліве положення. Червоний світлофільтр ЧС і поглинач ПС вивести з поля зору.

4. Підключити установку УПО-6 М2 до мережі 220 В, 50 Гц і перевести вимикачі стабілізатора СН і цифрового вольтметра в положення «ВКЛ». Натиснути кнопку «ПУСК» на стабілізаторі СН.

5. Прогріти прилад протягом 20 хв.

6. На цифровому вольтметрі встановити значення напруги, еквівалентної струмам, наведеним на робочому місці. Значення I_i і T_i занести до табл. 1.3.

7. Змінюючи положення окуляра ОК і об'єктива О пірометра, домогтися чіткого зображення стрічки температурної лампи, увести в поле

зору червоний світлофільтр ЧС і, обертаючи регульовальне кільце РК, зрівняти яскравість нитки розжарювання пірометричної лампи й стрічки температурної лампи (нитка повинна зникнути на тлі стрічки). Якщо яскравість зображення стрічки недостатня для вимірювань при температурі 800 °С, світлофільтр ЧС необхідно вивести з поля зору.

8. За показаннями відлікового пристрою пірометра відрахувати значення яскравісної температури T_1' при підході до рівності з боку меншої яскравості й значення яскравісної температури T_1'' – при підході до рівності з боку більшої яскравості. Повторити ці операції 5 разів і занести отримані результати в табл. 1.3.

9. Визначити й занести в табл. 1.3 значення варіації ΔT_1 показань пірометра як найбільшу різницю з п'яти відліків за формулою:

$$\Delta T_1 = T'_{1\max} - T''_{1\min}.$$

10. Обчислити й занести в таблицю 1.3 середнє арифметичне значення температури:

$$\bar{T}_1 = 0,1 \left(\sum_1^5 T'_1 + \sum_1^5 T''_1 \right).$$

11. Визначити похибку γ_1 пірометра при вимірюванні температури T_1 за формулою:

$$\gamma_1 = \left[(\bar{T}_1 - T_1) / T_1 \right] \cdot 100\%,$$

де T_1 – температура стрічки ТЛ.

12. Повторити операції, викладені в пп. 6–11 для температур, що відповідають усім оцифрованим оцінкам верхньої шкали пірометра.

13. Зробити перевірку пірометра за нижньою шкалою, для чого ввести в поле зору поглинач ПС і проробити операції, викладені в пп. 5–12. Результати вимірювань і обчислень занести в табл. 1.3.

Таблиця 1.3 – Результати дослідів

T_i °С	I_i А	T_i' °С	T_i'' °С	T_i' °С	T_i'' °С	T_i' °С	T_i'' °С	T_i' °С	T_i'' °С	T_i' °С	T_i'' °С	ΔT_i °С	$\bar{T}_i$ °С	γ %

Дослід 2. Вимірювання температури нагрітого тіла

Оптичний пірометр «ОППИР-09» вимірює яскравісну температуру T нагрітого тіла, що відповідає випромінюванню абсолютного чорного тіла. Дійсна температура Θ нагрітого тіла відрізняється від яскравісної і може бути визначена за показниками пірометра в такий спосіб:

$$\Theta = \frac{9568 \cdot \bar{T}}{9568 - \bar{T} \cdot \lg\left(\frac{1}{\varepsilon_\lambda}\right)}, \quad (1.1)$$

де ε_λ - коефіцієнт монохроматичного випромінювання при певній довжині хвилі.

Коефіцієнт ε_λ залежить від матеріалу й стану поверхні фізичного тіла. Значення коефіцієнтів ε_λ для деяких матеріалів при $\lambda = 0,65\text{мкм}$ напівтемних (червоне світло) наведено в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 – Значення коефіцієнта ε_λ

Матеріал	ε_λ
Сталь вуглеродиста тверда	0,440
Сталь рідка	0,370
Срібло тверде	0,070
Вольфрам	0,437
Вугілля й графіт	0,900

У цій частині роботи потрібно за допомогою пірометра «ОППИР-09» визначити дійсну температуру вольфрамової нитки температурної стрічки ТЛ при протіканні по ній електричного струму. Для вирішення цього завдання необхідно:

1. Занести в табл. 1.5 надані викладачем значення струмів.
2. Виконуючи операції, викладені в пп. 5 – 7 попереднього досліді, встановити значення струму I_1 (табл. 1.3) з похибкою не більше $5 \cdot 10^{-3}$ А та зрівняти яскравість нитки пірометричної лампи й стрічки температурної лампи.
3. Знати показання з еталонного приладу і занести в табл. 1.3

значення яскравісних температур T'_1 и T''_1 при підході до рівності з боку відповідно до меншої та більшої яскравості.

4. Обчислити й занести в таблицю 1.5 середнє значення температури:

$$\overline{T}_1 = 0,5(T'_1 + T''_1).$$

5. За формулою (1.1) визначити й занести в табл.1.5 дійсне значення температури Θ_1 стрічки температурної лампи при протіканні нею струму I_1 .

6. Визначити різницю між яскравісною $\overline{T}_1$ і дійсною Θ_1 температурами стрічки $\Delta_1 = |\overline{T}_1 - \Theta_1|$ при струмі I_1 .

7. Визначити й занести в табл. 1.5 значення дійсних температур для інших значень струмів, виконуючи операції, викладені в пп. 1 – 6.

Таблиця 1.5 – Дані досліду

I_i, A	$T'_i, ^\circ C$	$T''_i, ^\circ C$	$\overline{T}_i, ^\circ C$	$\Theta, ^\circ C$	$\Delta, ^\circ C$

Зміст звіту

Схеми пірометра «ОППИР-09» (рис. 1.1, 1.2), електрична схема установки УПО-6 М2 (рис. 1.4), таблиці експериментальних даних (табл. 1.3, 1.5).

Контрольні запитання

1. Призначення й принцип дії оптичних пірометрів зі зникаючою ниткою.
2. Конструкція й електрична схема пірометра «ОППИР-09».
3. Будова телескопа пірометра «ОППИР-09».
4. Призначення червоного світлофільтра ЧС і поглинач ПС пірометра.
5. Електрична схема установки УПО-6 М2.
6. Призначення зразкового опору ЗО.
7. Порядок повірки пірометрів на установці УПО-6 М2. Причини виникнення похибки пірометра й варіації його показань. Яскравісна температура тіла. Формула, що пов'язує яскравісну й дійсну температури.

Лабораторна робота № 2

ДОСЛІДЖЕННЯ ІНДУКТИВНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

Мета роботи: градування індуктивного диференціального перетворювача й дослідження його характеристик при роботі в різних режимах.

Загальні відомості

Принцип дії індуктивних перетворювачів заснований на залежності індуктивності або взаємної індуктивності обмоток на магнітопроводі від положення, геометричних розмірів і магнітного стану елементів їхнього магнітного ланцюга (рис. 1.5).

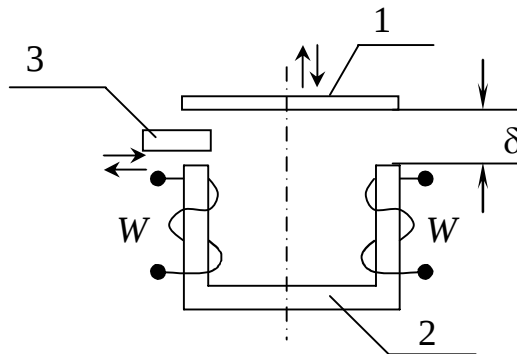


Рисунок 1.5 – Магнітопровід із зазором і двома обмотками

Індуктивність обмотки, розташованої на магнітопроводі:

$$L_i = \frac{w_i^2}{Z_m}, \quad (1.2)$$

де Z_m – магнітний опір магнітопроводу;
 w_i – число витків обмотки.

Взаємна індуктивність двох обмоток, розташованих на тому ж магнітопроводі:

$$M = \frac{w_1 \cdot w_2}{Z_m}, \quad (1.3)$$

де w_1, w_2 – число витків першої й другої обмоток.

Наведені співвідношення показують, що індуктивність і взаємні індуктивності можна змінювати, впливаючи на довжину δ , перетин повітряної ділянки магнітопроводу, на втрати потужності в магнітопроводі й інших шляхах. Цього можна досягти переміщенням рухомого осердя (якоря) 1 щодо нерухомого 2, введенням немагнітної металевої пластини 3 у повітряний зазор і т.п. Індуктивний перетворювач зі змінною довжиною повітряного зазору δ характеризується нелінійною залежністю $L = f(\delta)$. Такий перетворювач звичайно застосовують при переміщеннях якоря на 0,01–5 мм. Значно меншою чутливістю, але лінійною залежністю $L = f(S)$ відрізняються перетворювачі зі змінним перетином повітряного зазору. Ці перетворювачі використовують у переміщеннях до 10–15 мм.

Широко розповсюджені індуктивні диференціальні перетворювачі, у яких під впливом вимірюваної величини одночасно й при тому з різними знаками змінюються два зазори електромагнітів (рис. 1.6).

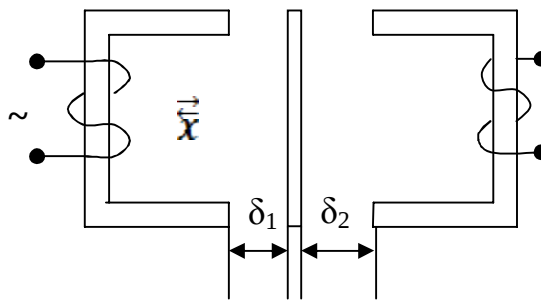


Рисунок 1.6 – Індуктивний диференціальний перетворювач

Диференціальний перетворювач у сполученні з відповідним вимірювальним ланцюгом (звичайно мостовим) має більш високу чутливість, меншу нелінійність характеристики перетворювача, зазнає меншого впливу від зовнішніх факторів й знижене результуюче зусилля на яскравість із боку електромагніту, ніж недиференціальні перетворювачі.

Індуктивні перетворювачі використовують для перетворення переміщення та інших неелектричних величин, які можуть бути перетворені в переміщення (зусилля, тиск, момент). У порівнянні з іншими перетворювачами переміщення індуктивні перетворювачі відрізняються значними за потужністю вхідними сигналами, простотою й надійністю в роботі.

Недолік їх – зворотний вплив перетворювача на досліджуваний об'єкт (вплив електромагніта на якір) і вплив на частотні характеристики приладу.

Досліджуваний індуктивний вимірювач переміщення заснований на тому, що під дією переміщення феромагнітної платівки-якоря змінюються індуктивності двох параметричних індуктивних датчиків, що, у свою чергу, приводить до зміни частоти резонансного коливального LC-контура, у якому послідовно із зазначеними індуктивностями включені дві ємності.

Зміна частоти в остаточному підсумку викликає зміну різницевої постійної напруги, а отже, електричного струму в ланцюзі вимірювального приладу, мікроамперметра РАІ. Таким чином, здійснюється перетворення переміщення платівки-якоря в електричний струм, що фіксується приладом.

Індуктивний вимірювач переміщень складається з автогенератора коливань, індуктивного диференціального перетворювача низьковольтного стабілізатора постійної напруги (рис. 1.7).

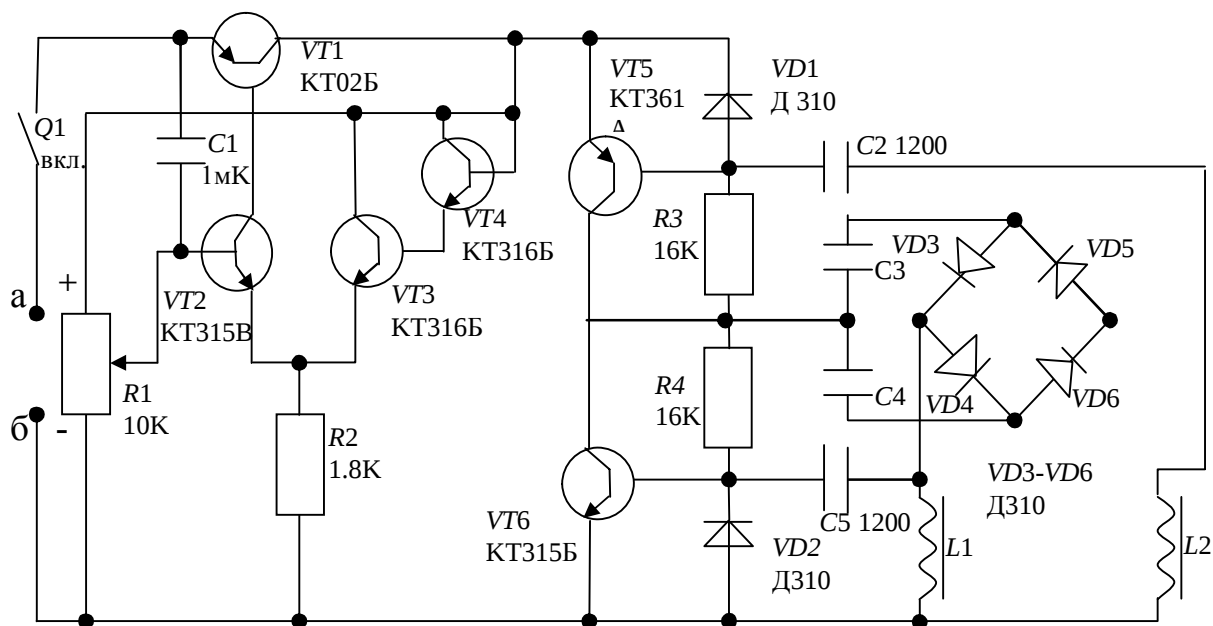


Рисунок 1.7 – Джерело живлення

Генератор зібраний за схемою двотактного релаксатора на комплементарній парі транзисторів VT5, VT6. Котушки L1 і L2 – індуктивні перетворювачі разом з конденсаторами C3, C4 – вимірювальні мости утворюють послідовний коливальний контур, що визначає частоту коливань

генератора. Ланцюг позитивного зворотного зв'язку утворюють конденсатори $C2$ і $C5$. Таке включення паралельних ланцюгів вимірювального моста автоматично забезпечує роботу перетворювача переміщень у резонансному режимі, оскільки індуктивний опір моста скомпенсований ємнісним опором і повний опір кожного ланцюга практично дорівнює активному опору обмоток. Оскільки добротність контуру $L1\ L2\ C3\ C4$ значно більше одиниці, напруга його навантаження при оптимальній глибині зворотного зв'язку має строго синусоїдну форму.

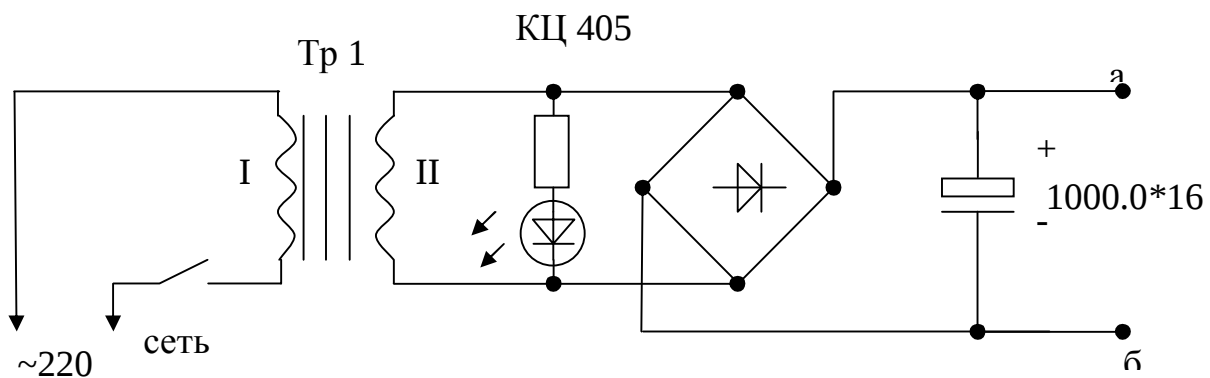


Рисунок 1.8 – Випрямна схема

Діоди $VD1$ і $VD2$ разом з конденсаторами $C2$ і $C5$ відповідно складають пристрій відновлення постійної складової, що збільшує напругу імпульсів, які запускають, й істотно полегшує порушення автоколивань при малому значенні напруги живлення. Виділення різницевої напруги постійного струму, пропорційної переміщенню платівки-якоря індуктивного перетворювача, забезпечує кільцевий детектор, зібраний на діодах $VD3 - VD6$.

Дана схема (рис. 1.7, 1.8) забезпечує сталість чутливості вимірювача при зміні ємності конденсаторів вимірювального моста в межах від 0,01 до 0,18 мкФ. При цьому резонансна частота встановлюється автоматично. Вона визначається параметрами послідовних LC -ланцюгів.

До дестабілізуючих факторів, що призводять до похибок вимірювань, варто віднести зміну напруги живлення й температури.

Для точної стабілізації напруги живлення вимірювача переміщень у схемі використаний компенсаційний стабілізатор, зібраний на

транзисторах $VT1 - VT4$ (коефіцієнт стабілізації – приблизно 150). Джерелом зразкової напруги є транзистор $VT4$, включений як діод.

На транзисторах $VT2, VT3$ зібраний диференціальний підсилювач, сигнал неузгодженості якого керує регулюючим елементом, виконаним на транзисторі $VT1$. Напругу стабілізації встановлюють підстроювальним резистором $R1$ у межах 1,8...2...2,5 В.

На рис. 1.9 показано конструкцію індуктивного перетворювача переміщень в електричний сигнал.

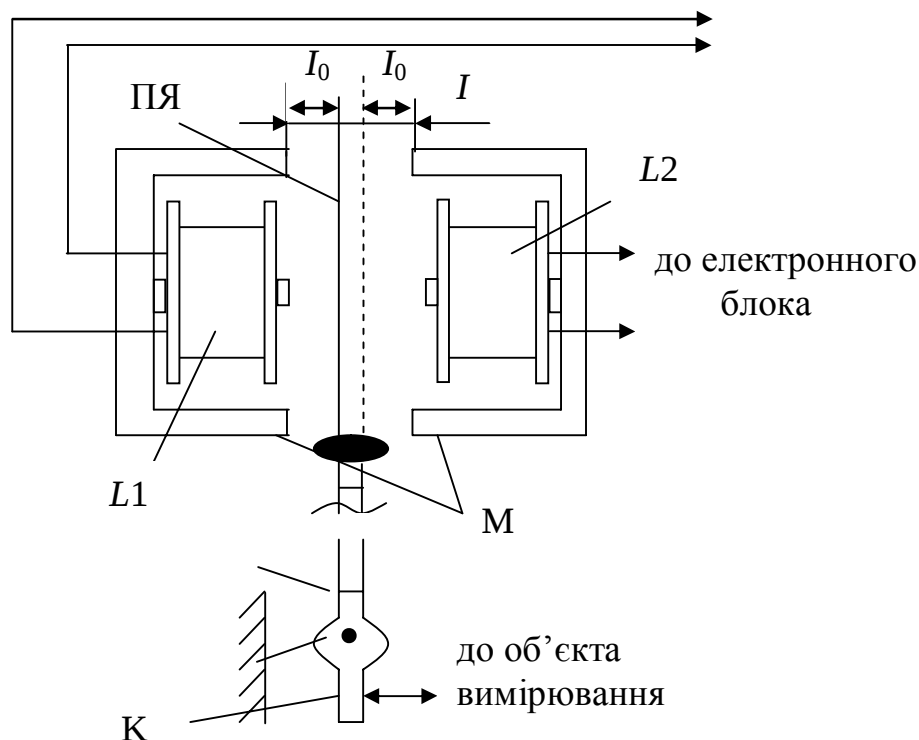


Рисунок 1.9 – Конструкція індуктивного перетворювача переміщень в електричний сигнал

Котушки $L1$ і $L2$ розміщені на середніх полюсах двох Ш-образних магнітопроводів M , установлених із зазором між полюсами. У цьому зазорі поміщена платівка-якір $ПЯ$, виконана з феромагнітного матеріалу. Платівка-якір механічно зв'язана коромислом K з ланкою, що переміщається, контрольованого механізму. Магнітопроводи перетворювача (Ш4Х4) виконані з фериту 2000 НМ. Величини переміщень платівки-якоря реєструються мікрометром з постійної $C = 0,01\text{мм/поділ}$.

Функціональний зв'язок між струмом вимірювача й переміщенням платівки-якоря виражається співвідношенням:

$$I_u = \frac{0,9U_m}{X_L + R} \cdot \frac{wL_0}{\sqrt{(AwL_0)^2 + r^2}} A, \quad (1.4)$$

де U_m – амплітудне значення напруги живлення;

X_L – індуктивний опір однієї котушки перетворювача;

R – опір мікроамперметра РАІ;

$\dot{A} = l/l_0$ – відношення переміщення платівки-якоря до зазору між якорем і полюсом магнітопроводу у вихідному стані (рис. 1.9);

L_0 – індуктивність однієї котушки перетворювача при середньому положенні платівки-якоря;

r – активний опір однієї котушки ($r_1 = r_2$);

w – циклічна частота струму, що живить котушку.

Вихідні сигнали перетворювача надходять на вхід електронного блока (рис. 1.7), що у підсумку дозволяє на окремих ділянках одержати практично лінійні функції перетворення вимірювача. При цьому можливі три режими роботи вимірювача:

1) відхилення платівки-якоря здійснюється в обидва боки від середнього її положення; у цьому випадку функція перетворення має вигляд

$$I_u = K \cdot I, \quad (1.5)$$

де K – коефіцієнт перетворення, що характеризує чутливість вимірювача до переміщення; діапазони зміни переміщення в цьому випадку

$$0 \leq I \leq \left(\frac{I_{max}}{2} \right) \quad \text{та} \quad \left(-\frac{I_{max}}{2} \right) \leq I \leq 0;$$

2) відхилення платівки-якоря від лівого крайнього до правого крайнього її положення, тут функція перетворення визначається як

$$I_u = K \cdot I', \quad (1.6)$$

де I' – переміщення в системі координат із центром у крайньому лівому

положенні якоря; $I' = I + I_{\max}/2$, величина $I' \geq 0$ й змінюється в межах $0 \leq I \leq I_{\max}$;

3) відхилення платівки-якоря від правого крайнього до лівого крайнього її положення; при цьому функція перетворення має вигляд

$$I_u = K \cdot I'', \quad (1.7)$$

де I'' – поточне переміщення в іншій системі координат із центром у крайньому правому положенні якоря; $I'' = I - I_{\max}/2$; величина $I'' \leq 0$ й змінюється в діапазоні $-I_{\max} \leq I \leq 0$.

Дослід 1. Визначення функцій перетворення вимірювача малих переміщень

Функцію перетворення визначають для заданого викладачем режиму роботи вимірювача. Спочатку визначають максимальну межу вимірювання мікрометра, тобто величину в $I_{\max}$. Потім для першого режиму встановлюють стрілку мікроамперметра РАІ посередині його шкали. Це відповідає середньому положенню якоря перетворювача. Далі обертаємо лімб мікроамперметра до співпадіння його поділки з нулем мікрометра. Після цього переміщають платівки-якір уліво до $-I_{\max}/2$ і вправо до $I_{\max}/2$ від середнього положення (крок переміщення задається викладачем). При фіксованих положеннях якоря реєструють значення струму мікроамперметра й переміщення стрілки мікрометра, зв'язаного механічно із платівкою-якорем.

Для другого режиму роботи стрілку мікроамперметра встановлюють у крайнє ліве положення, перемістивши відповідним чином платівку-якір. Далі ставлять на нуль мікрометр і, установлюючи задані фіксовані значення I' (від 0 до $I_{\max}$), знімають показання мікрометра й мікроамперметра.

Третій режим роботи вимірювача здійснюють, перемістивши платівку-якір у таке положення, при якому стрілка мікроамперметра буде у крайньому правому положенні. Потім ставлять на нуль мікрометр і визначають залежність $I_u = f(I'')$ при зміні I'' від 0 до $-I_{\max}$ із заданим кроком. Результати вимірювань заносять у табл. 1.6.

Таблиця 1.6 – Результати вимірювань

I, I', I''	x, x', x''	I_u , мкА	K , мкА/мм	K^* , мкА	$K_{\text{ср}}$, мкА/мм	$K_{\text{ср}}^*$, мкА	γ_k , %	$I_{\text{пр}}$, мкА	γ_m , %

Для першого режиму роботи в табл. 1.6 використовують два діапазони зміни I , по обох боках від 0.

За даними табл. 1.6 будують графіки залежностей $I = f(I)$, $I_u = f(I')$, $I_u = f(I'')$ і $I_u = f(x)$, $I_u = f(I')$ відповідно до заданого режиму роботи вимірювача.

Значення x , x' і x'' у табл. 1.6 знаходять як відношення $\pm 2I/I_{\text{max}}$; I/I_{max} і $(-I''/I_{\text{max}})$ відповідно за графіками і таблицею 1.6 визначають діапазони зміни переміщень, при яких вимірювач має лінійні й нелінійні ділянки характеристики.

Величини коефіцієнтів перетворення K и K^* знаходять із співвідношень I_u/I ; I_u/I' ; I_u/I'' і I_u/x ; I_u/x' ; I_u/x'' відповідно до заданого режиму вимірювача.

Значення K и $K_{\text{ср}}^*$ знаходять як середнє арифметичне значення для переміщень у лінійній області. Відносні розбіги коефіцієнтів перетворення $\gamma_{\text{до}}$ розраховують для всіх переміщень, виходячи з формули, %:

$$\gamma_k = \frac{K - K_{\text{ср}}}{K_{\text{ср}}} \cdot 100. \quad (1.8)$$

Після цього знаходять аналітичні вирази для функцій перетворення на лінійних і нелінійних ділянках характеристики. Причому записують спочатку формули для лінійних ділянок відповідно до заданого режиму роботи у вигляді:

$$I_{\text{пр}} = K_{\text{ср}} \cdot I; \quad \dots \leq I \leq \dots; \quad (1.9)$$

$$I_{\text{пр}} = K_{\text{ср}} \cdot I'; \quad \dots \leq I' \leq \dots; \quad (1.10)$$

$$I_{\text{пр}} = K_{\text{ср}} \cdot I''; \quad \dots \leq I'' \leq \dots \quad (1.11)$$

Розрахункові значення струмів $I_{\text{пр}}$ (табл. 1.6) для лінійних ділянок знаходять, підставляючи поточні величини I , I' , I'' у формули (1.9) – (1.11).

Потім знаходять аналітичні вирази для функцій перетворення на їхніх нелінійних ділянках. Зазначені вирази визначають, апроксимуючи функцію перетворення на цих ділянках у вигляді парабол.

При цьому:

$$I_{\text{пр}} = aI^2 + bI + c; \quad \dots \leq I \leq \dots; \quad (1.12)$$

$$I_{\text{пр}} = a(I')^2 + bI' + c; \quad \dots \leq I' \leq \dots; \quad (1.13)$$

$$I_{\text{пр}} = a(I'')^2 + bI'' + c; \quad \dots \leq I'' \leq \dots; \quad (1.14)$$

де a, b, c – розмірнісні коефіцієнти.

Значення цих коефіцієнтів знаходять, підставляючи в рівняння (1.12)–(1.14) величини переміщень (два з них на краях і один посередині нелінійної ділянки) і відповідні їм величини струмів. Таким чином, для кожного режиму складають систему із трьох рівнянь, у яких невідомими є коефіцієнти a, b, c . Далі вирішують цю систему й визначають величини a, b, c . Останні записуються у вигляді:

$$a = \text{мкА/мм}^2; \quad b = \text{мкА/мм}; \quad c = \text{мкА}.$$

Після цього записують аналітичні формули для нелінійних ділянок функцій перетворення у вигляді (1.12) – (1.14).

Потім в отримані аналітичні формули підставляють всі значення переміщень, що відповідають нелінійним ділянкам, і знаходять розрахункові значення струмів $I_{\text{пр}}$ для цих переміщень.

Визначають методичні похибки $\gamma_{\text{м}}$, що виникають при використанні аналітичних виразів для функцій перетворення в лінійній і нелінійній областях, %:

$$\gamma_{\text{м}} = \frac{I_{\text{пр}} - I_{\text{у}}}{I_{\text{у}}} \cdot 100. \quad (1.15)$$

Контрольні запитання

1. Поясніть принцип дії індуктивного перетворювача малих переміщень.
2. Як в електричній схемі вимірювача відбувається перетворення переміщення в електричний струм?
3. Поясніть роботу електричної схеми вимірювача переміщення. Опишіть конструкцію використовуваного в роботі індуктивного перетворювача.
4. Розкажіть про режими роботи вимірювача.
5. Як одержати експериментальним і розрахунковим шляхом функцію перетворення для лінійних і нелінійних її ділянок? Як знайти апроксимаційні функції?

Лабораторна робота № 3

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕОСТАТНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

Мета роботи: вивчення принципів побудови реостатних перетворювачів і дослідження характеристик звичайного і профільованого (синтезованого) реостатного датчиків переміщення.

Загальні відомості

Робота реостатного перетворювача заснована на зміні електричного опору реостата при дії на його повзун перетворених вхідних неелектричних величин. У якості останніх можуть бути переміщення (лінійні й кутові), сила, тиск, момент. Реостатні перетворювачі широко застосовуються для вимірювання рівнів рідини за допомогою поплавця, механічно пов'язаного із движком перетворювача.

Конструктивно реостатний датчик являє собою каркас, на який намотано дріт (рис. 1.10).

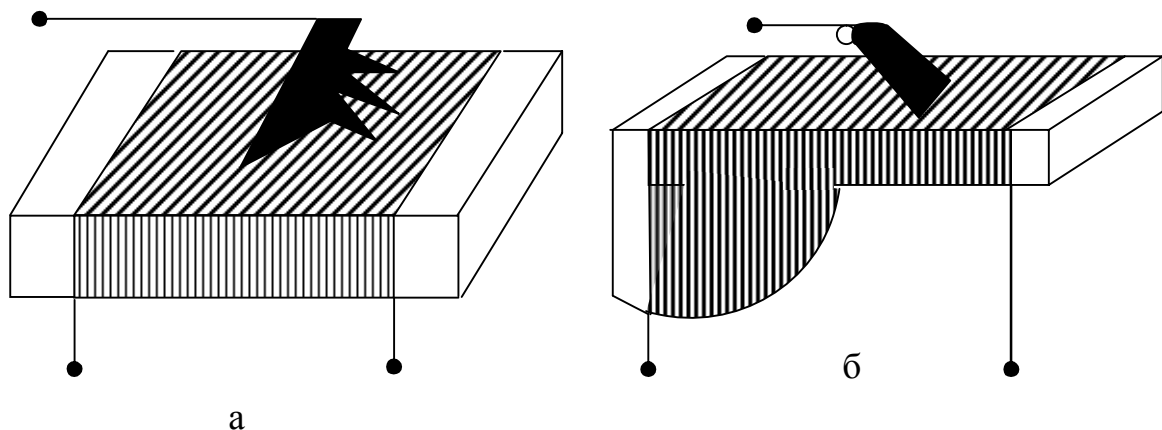


Рисунок 1.10 – Реостатні датчики

До матеріалу дроту реостатних перетворювачів ставиться ряд вимог, зокрема, він повинен мати високий питомий електричний опір, малий ТКО, мати стабільність характеристик у часі, високу корозійну стійкість, велику міцність на розрив. У реостатних перетворювачах широко використовують обмотки з манганіну, нікелю-константану, а у

випадках, коли перетворювач повинен працювати в умовах підвищення температур, обмотки виготовляють із залізо-хромових або нікелево-хромових сплавів.

В особливо відповідальних випадках і при специфічних умовах роботи застосовують сплави на основі благородних металів.

Для забезпечення високої стабільності характеристик реостатних перетворювачів ставляться певні вимоги й до каркасів. Вони повинні зберігати свої розміри в широкому температурному діапазоні, в умовах підвищеної вологості. Крім того, каркаси повинні мати високу теплопровідність, що дозволить підвищити потужність, яка розсіюється у перетворювачі. Тому каркаси прецизійних реостатних перетворювачів виготовляють із алюмінієвих сплавів АМг, Д1 і Д16. Перетворювачі, що допускають похибку перетворення 1 % і більше, можуть виготовлятися з ізоляційних матеріалів, наприклад, гетинаксу, текстоліту, склопластику.

Конструкція контактних щіток у значній мірі визначає якість перетворювача й у першу чергу рівень так званого контактного шуму, що генерується щіткою при її русі доріжкою перетворювача. Контактний шум, що виникає в області контакту, викликається варіаціями контактної площі й контактного тиску, особливо при наявності на доріжці сторонніх часток. Контактний шум має тенденцію до зростання в часі внаслідок зношування, забруднення й окислювання доріжки й щітки.

Вид функції перетворення $R_{\text{вих}} = f(x)$ реостатного перетворювача визначається характером зміни кроку намотування за довжиною каркаса або профілем каркаса при рівномірному кроці намотування.

Джерелами похибок реостатних перетворювачів є дискретність вихідного опору, відхилення функції перетворення від розрахункової, викликане мінливістю діаметра намотувального дроту і його питомого електричного опору, зміна температури перетворювача, термодинамічні й фотополяриметричні шуми, вплив опору навантаження.

Похибка дискретності для перетворювачів із рівномірним намотуванням (лінійних перетворювачів):

$$\delta_{\text{дискр}} = \frac{\Delta R_{\text{min}}}{R_{\text{П}}} = \frac{1}{\omega}, \quad (1.16)$$

де ΔR_{min} – опір одного витка перетворювача;

$R_{\text{П}}$, ω - повний опір і число витків обмотки перетворювача.

Для реальних конструкцій лінійних реостатних перетворювачів кількість витків становить близько 2000, а похибка дискретності відповідно дорівнює 0,05 %. Сумарна похибка, викликана мінливістю електричних параметрів перетворювача, досягає 0,03...0...0,1 %. Температурна похибка, обумовлена, насамперед, температурним коефіцієнтом опору намотувального дроту, не перевищує звичайно 0,1 % на 10 °С.

Методична похибка, викликана впливом опору навантаження, у загальному випадку визначається співвідношенням опорів перетворювача і навантаження у різних вимірювальних ланцюгах проявляється по-різному. Якщо, наприклад, лінійний реостатний перетворювач включений у ланцюг як подільник напруги (рис. 1.11), то

$$\frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{R_X / R_{\Pi}}{1 + R_X / R_{\Pi} (1 - R_X / R_{\Pi})}. \quad (1.17)$$

Оскільки для навантаженого перетворювача ($R_{\Pi} = \infty$)

$$\frac{U'_{\text{вих}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{R_X}{R_{\Pi}}, \quad (1.18)$$

то методична похибка, $U_{\infty} / U_{\text{вх}}$

$$\delta_U = \frac{U'_{\text{вих}} - U_{\text{вх}}}{U'_{\text{вих}}} = \frac{R_{\Pi}}{R_{\Pi}} \cdot \left(\frac{R_X}{R_{\Pi}} - 1 \right) \cdot \frac{R_X}{R_{\Pi}}. \quad (1.19)$$

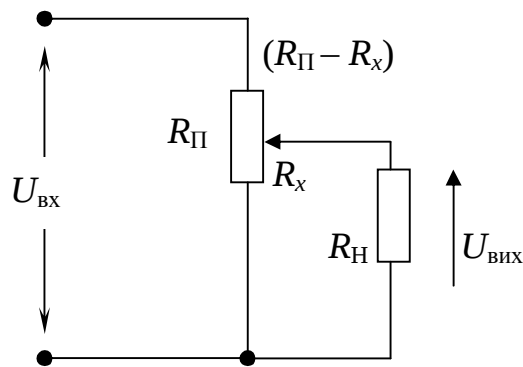


Рисунок 1.11 – Вимірювальний ланцюг реостатного перетворювача

На рис. 1.12 надано залежності похибки лінійного реостатного перетворювача від впливу опору навантаження

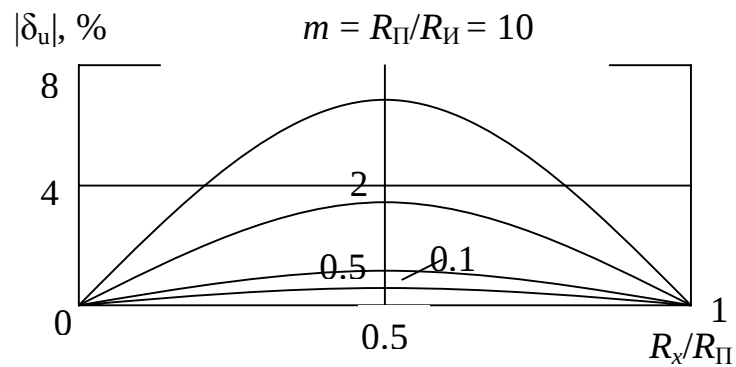


Рисунок 1.12 – Залежності похибки лінійного реостатного перетворювача від впливу опору навантаження

Дослід 1. Визначення залежності напруги від зміни опору звичайного реостатного перетворювача

Функціональну схему лабораторного макета наведено на рис. 1.13.

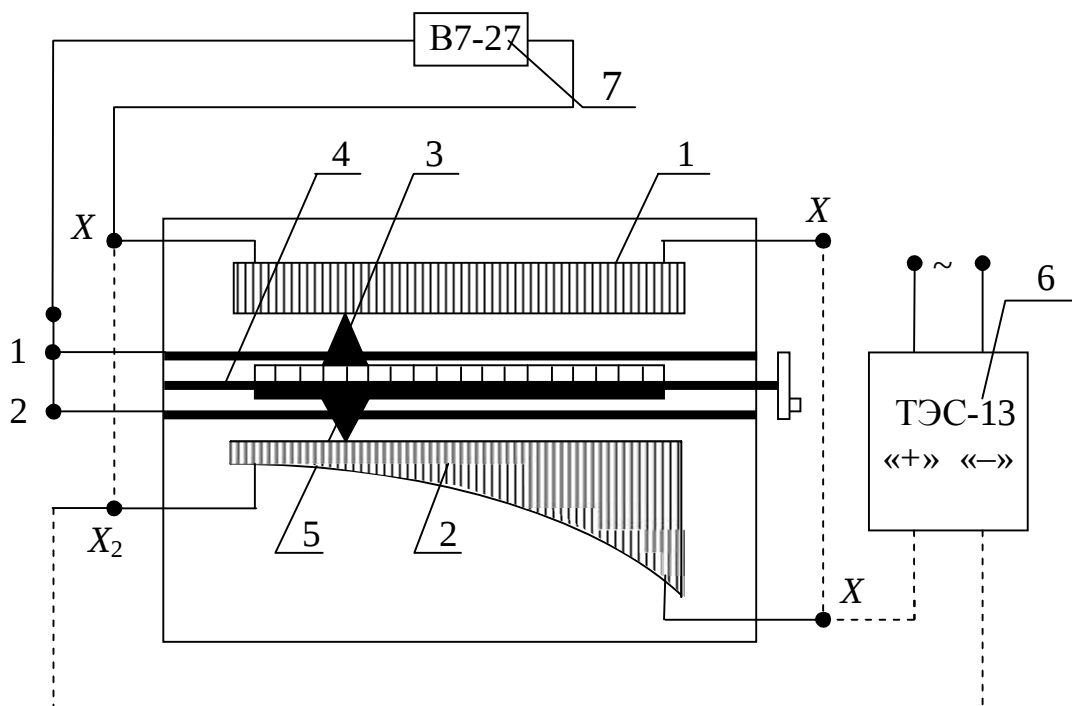


Рисунок 1.13 – Функціональна схема лабораторного макета

Макет складається зі звичайного (1) і профільованого (2) реостатних перетворювачів, рухливої каретки з контактами (3), гвинта (4), мірної лінійки (5), блока живлення (6), вимірювального приладу (7). Як вимірювальний прилад використовується цифровий вольтметр В7-27, що приєднується до клем $X_1 - X_2$ і 1 або 2 залежно від того, який з реостатних перетворювачів досліджується. Даний макет дає можливість одержати градувальні криві для двох типів реостатних перетворювачів, а також значення їхніх опорів у різних точках за довжиною перетворювача.

Порядок виконання досліду

За допомогою сполучних проводів включити звичайний реостатний перетворювач у ланцюг (рис. 1.13). Рознімання вимірювального приладу підключити до клем X_2 і X_3 відповідно. Вимірювальний прилад привести в режим «Вольтметр $U =$ ». Установити рухливу каретку 3 у початок координат. Після перевірки зібраної схеми викладачем включити прилади в мережу.

За завданням викладача встановити на блоці живлення необхідне значення напруги $U_{\text{ж}}$. Потім за допомогою ручки гвинта 4 переміщати каретку уздовж мірної лінійки й у фіксованих точках вимірювати значення напруги. Крок і діапазон переміщення каретки задає викладач. Повторити дослід для трьох значень $U_{\text{ж}}$.

Результати вимірювань напруги занести в табл. 1.7.

Таблиця 1.7 – Результати досліду

Режим роботи: $U_{\text{ж}} = \dots$							
l , мм				...			
U , В				...			
Режим роботи: $U_{\text{ж}} = \dots$							
l , мм				...			
U , В				...			
Режим роботи: $U_{\text{ж}} = \dots$							
l , мм				...			
U , В				...			

За даними табл. 1.7 побудувати графічні залежності $U=f(l)$.

Дослід 2. Визначення залежності напруги від зміни опору профільованого реостатного перетворювача

Порядок виконання дослідів

За допомогою сполучних проводів включити профільований реостатний перетворювач у ланцюг (рис. 1.13). Рознімання вимірювального приладу підключити до клем X_1 і X_2 ; сполучні дроти від блока живлення приєднати до клем X_2 і X_4 , відповідно.

Зняття показань здійснюється аналогічно методиці дослідів 1. Крок і діапазон переміщення каретки задає викладач. Результати вимірювань напруг занести в табл. 1.8, що заповнюється за формою табл. 1.7. За даними табл. 1.8 побудувати графічні залежності $U = f(I)$.

Дослід 3. Визначення залежності опору від зміни положення каретки звичайного реостатного перетворювача

За допомогою сполучних проводів включити звичайний реостатний перетворювач у ланцюг (рис. 1.14). Блок живлення в цьому досліді не використовується. Рознімання вимірювального приладу підключити до клем X_1 і 1 відповідно. Вимірювальний прилад привести в режим «Омметр». Після перевірки зібраної схеми викладачем включити прилад у мережу. Установити рухливу каретку на початку координат. Потім за допомогою ручки гвинта переміщувати каретку уздовж мірної лінійки й у фіксованих точках вимірювати значення опору. Крок і діапазон переміщення каретки задає викладач. Результати вимірювань опору занести в табл. 1.9.

Таблиця 1.9 – Результати дослідів

l , мм				...			
R , Ом				...			

За даними табл.1.9 побудувати графічні залежності $R = f(l)$.

Дослід 4. Визначення залежності опору від зміни положення каретки профільованого реостатного перетворювача

Порядок виконання дослідів

За допомогою сполучних проводів включити профільований реостатний перетворювач у ланцюг (рис. 1.14). Рознімання вимірювального приладу підключити до клем X_1 і 2 відповідно. Блок живлення в цьому досліді також не використовується. Зняття показань виконується аналогічно методиці дослідів 3. Крок і діапазон переміщення каретки задає викладач. Результати вимірювань опорів занести в табл. 1.10, що заповнюється за формою табл. 1.9.

Таблиця 1.10 – Результати дослідів

l , мм				...			
R , Ом				...			

За даними табл. 1.10 побудувати графічні залежності $R = f(l)$.

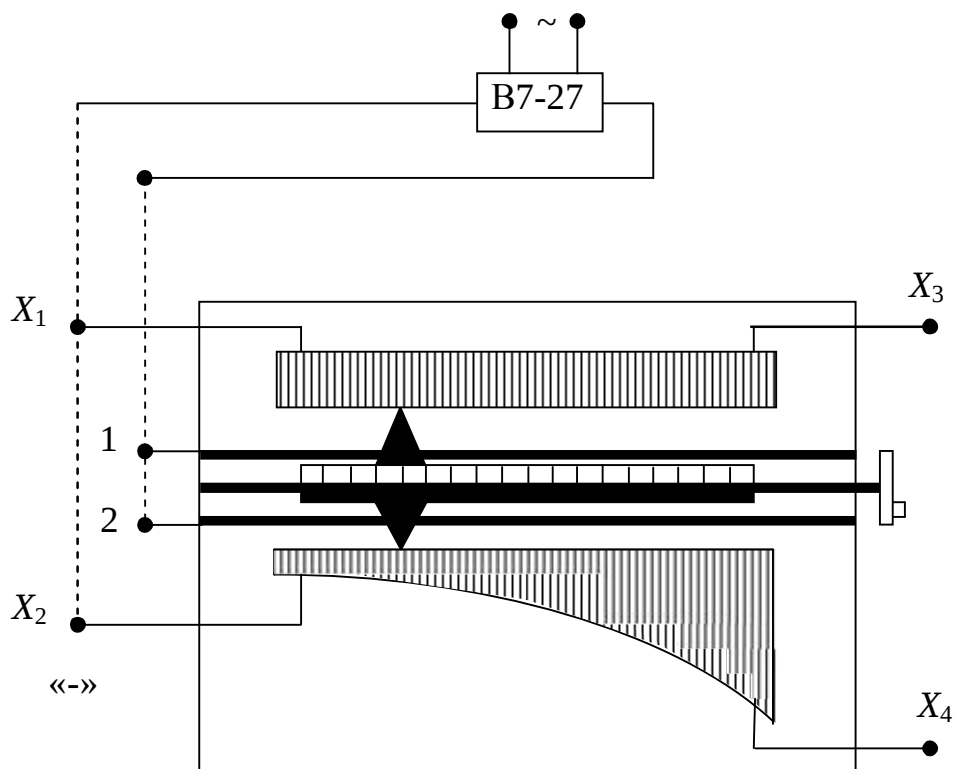


Рисунок 1.14 – Схема реостатного перетворювача при $R = f(l)$.

Дослід 5. Визначення залежності струму від зміни опору звичайного реостатного перетворювача

Порядок виконання дослідів

За допомогою сполучних проводів включити звичайний реостатний перетворювач у ланцюг (рис. 1.15). Рознімання вимірювального приладу підключити до клем X_1 і «-» блоку живлення відповідно, сполучним проводом «+» від блоку живлення приєднати до клем X_3 . Вимірювальний прилад привести в режим «Амперметр $I =$ ». Установити рухливу каретку на початку координат. Після перевірки зібраної схеми викладачем включити прилад у мережу.

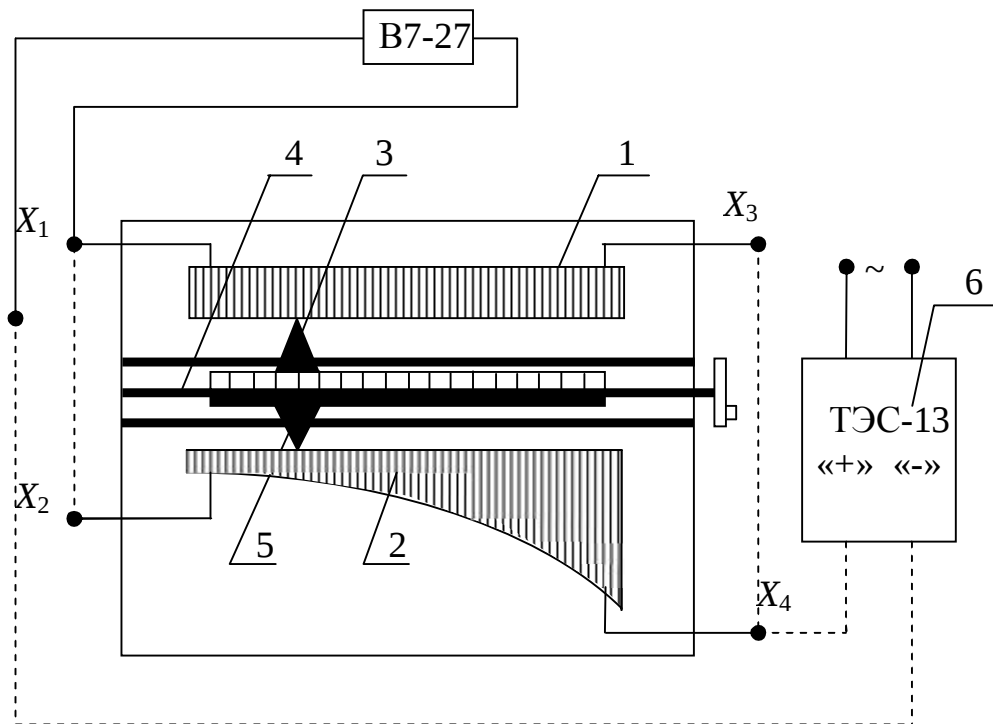


Рисунок 1.15 – Схема реостатного перетворювача при $I = f(l)$

За завданням викладача встановити на блоці живлення необхідні значення напруги $U_{\text{ж}}$. Потім за допомогою ручки гвинта переміщувати каретку уздовж мірної лінійки й у фіксованих точках вимірювати значення струму. Крок і діапазон переміщення каретки задає викладач. Результати вимірювань струму занести в табл. 1.11.

Таблиця 1.11 – Режим роботи $U_{ж} =$

l , мм				...			
I , А				...			

За даними табл. 1.11 побудувати графічні залежності $I = f(l)$.

Дослід 6. Визначення залежності струму від зміни опору профільованого реостатного перетворювача

Порядок виконання дослідів

За допомогою сполучних проводів включити профільований реостатний перетворювач у ланцюг (рис.1.15). Рознімання вимірювального приладу підключити до клем X_2 і « – » блока живлення відповідно; сполучний провід від блока живлення приєднати до клем X_4 .

Зняття показань виконується аналогічно методиці дослідів 5. Крок і діапазон переміщення каретки задає викладач. Результати вимірювань струму занести в табл. 1.12, що заповнюється за формою табл. 1.11.

За даними табл. 1.12 побудувати графічні залежності $I = f(l)$.

Оформлення звіту

У звіті повинні бути наведені всі співвідношення, що описують заданий режим роботи перетворювача, принципова схема лабораторного макета, таблиці, криві залежностей $U = f(l)$, $R = f(l)$, $I = f(l)$.

Контрольні запитання

1. Будова, принцип дії й галузі застосування реостатних перетворювачів.
2. Основні схеми включення реостатних перетворювачів.
3. Як одержати лінійну струмову характеристику реостатного перетворювача в широкому діапазоні переміщення ?
4. Виведіть співвідношення для функцій перетворення звичайного й профільованого реостатного перетворювача.
5. Синтез реостатного перетворювача переміщення.
6. Одержання формули для функцій перетворення при переносах початку системи координат у різні точки.
7. Як визначити експериментально функції перетворення (градувальні криві) реостатних датчиків у заданому режимі їхньої роботи?

Лабораторна робота № 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ЛЮКСМЕТРІВ

Мета роботи: набуття навичок експлуатації люксметрів, а також вивчення принципів побудови їх вентильних фотоелементів.

Загальні відомості

Діапазон електромагнітних хвиль охоплює близько 50 октав (октаві відповідає інтервал частот (або довжин хвиль), у якого відношення граничних частот дорівнює 1:2), з яких на видиме світло доводиться тільки одна октава. Цей діапазон хвиль від 390 до 770 нм і називають світлом у вузькому змісті слова.

Освітленістю E називається відношення світлового потоку до площі освітлюваної поверхні.

$$E = \frac{I \cdot \cos \alpha}{r^2}, \quad (1.20)$$

де E – освітленість, лк;

I – сила світла, кд;

r – відстань між джерелом світла й освітлюваною поверхнею, м;

α – кут між напрямком поширення світла й нормаллю до поверхні.

Для вимірювання освітленості використовується люксметр. Люксметр являє собою мікроамперметр, підключений до фотоелемента. Для узгодження спектральної чутливості фотоелемента із кривої видимості ока використовується фільтр.

Фотоелектричними датчиками називаються пристрої, що змінюють свої параметри під впливом світлової енергії. Перевагою фотоелектричних датчиків є їхня простота, малі габарити, висока чутливість і відсутність механічного зв'язку із процесом перетворення. Основні характеристики фотоелектричних датчиків:

1. Світлова характеристика – залежність фотоструму від інтенсивності падаючого на фотоелемент світлового потоку.

2. Спектральна характеристика – залежність фотоструму від довжини хвилі падаючих променів при постійній освітленості.

3. Інерційна (частотна) характеристика – залежність фотоструму від частоти зміни інтенсивності падаючого світлового потоку.

4. Вольтамперна характеристика – залежність фотоструму від фотоелемента, що прикладається між електродами, напруги при постійному світловому потоці.

Крім зазначених характеристик, фотоелементи оцінюються за стабільністю їхніх параметрів із часом (старіння) і при зміні температури робочого середовища.

Фотоелементи знаходять широке застосування як датчики різних вимірювальних і регулюючих пристроїв для вимірювань і регулювання температури, рівнів, переміщень і швидкості, для сортування й відбраковування деталей тощо. Чутливість фотоелемента визначають як відношення збільшення фотоструму до збільшення світлового потоку:

$$S = \frac{\Delta I_{\Phi}}{\Delta \Phi}. \quad (1.21)$$

Вона залежить від типу фотоелемента й величини навантажувального опору. Для підвищення чутливості фотоелементи можуть бути включені електрично послідовно один з одним.

Вентильні фотоелементи можуть працювати у двох режимах: фотогенераторному (вентильному) й фотодіодному. У фотогенераторному режимі джерело зовнішньої напруги відсутнє. У фотодіодному режимі до фотодіода прикладено замикаючу напругу. При відсутності опромінення під дією цієї напруги проходить лише невеликий струм, а при висвітленні *p-n* - переходу струм збільшується залежно від інтенсивності опромінення. Вентильні фотоелементи використовуються, в основному, у діодному режимі, тобто із зовнішнім джерелом напруги, підключеним до фотоелемента у зворотному напрямку. При такому включенні потенційний бар'єр зростає й визначається зовнішньою напругою. Умова проникнення неосновних носіїв через *p-n*-перехід істотно полегшується, а зворотний опір цього переходу різко зростає. У результаті зростає чутливість, а світлові характеристики стають лінійними в широкому діапазоні світлових потоків. Найбільше поширення одержали кремнієві й германієві фотодіоди.

Люксметр. Призначення, принцип побудови

У даній роботі досліджується промисловий люксметр типу Ю-116 з вентильним фотоелементом ФЭСС-2. Вентильний фотоелемент являє собою напівпровідниковий діод (рис. 1.16), чутливим елементом якого є напівпровідник p -типу, на якому спеціальною обробкою утворений тонкий шар напівпровідника n -типу, і поділяючий їх найтонший запірний шар, названий p - n -переходом.

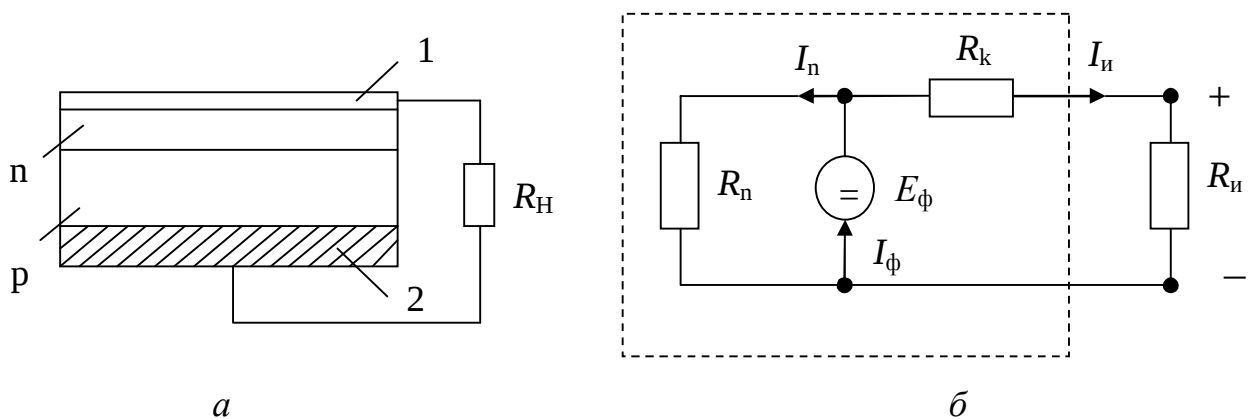


Рисунок 1.16 – Вентильний фотоелемент і його еквівалентна схема

Зверху напівпровідник покритий напівпрозорим металевим шаром або сіткою 1 зі срібла, золота або платини, що служить верхнім електродом. Нижнім електродом є металева основа 2. Під дією світлового потоку, що проникає через напівпрозорий електрод і тонкий шар n -напівпровідника, внаслідок фотоефекту в p -напівпровіднику утвориться підвищена концентрація електронно-діркових пар. Електрони захоплюються потенційним бар'єром на границі p - n -переходу й безперешкодно проникають у шар n -напівпровідника, заряджаючи його негативно, а дірки, що залишилися в p -напівпровіднику, заряджають його позитивно. У результаті цього процесу між електродами виникає різниця потенціалів, значення якої залежить від інтенсивності світлового потоку й інтегральної чутливості фотоелемента.

Якщо до електродів освітлюваного вентильного фотоелемента підключити опір навантаження R_H , то під дією виниклої фото-ЕРС у ланцюзі протікатиме електричний струм, що, як це видно з еквівалентної схеми фотогенератора (рис. 1.16), дорівнюватиме:

$$I_n = I_\Phi \frac{R_n(\Phi)}{R_n(\Phi) + R_k + R_n} = \frac{K \cdot \Phi}{1 + \frac{(R_k + R_n)}{R_n(\Phi)}}, \quad (1.22)$$

де $R_n(\Phi)$ – внутрішній опір фотоелемента, що є функцією світлового потоку;

R_k – опір контактів;

$I_\Phi = K\Phi$ – первинний фотострум, збуджуваний у фотогенераторі (вентильному фотоелементі).

При малих значеннях потоку й малих опорах навантаження $R_k + R_n \ll R_n(\Phi)$ струм у навантаженні буде лінійною функцією світлового потоку. При більших світлових потоках світлові характеристики нелінійні навіть у режимах короткого замикання, тому що в цьому випадку $R_n(\Phi) < R_k$. Слід зазначити, що вентильні фотоелементи мають велику інерційність, через це вони можуть бути використані лише при постійних світлових потоках.

Як приклад у таблиці 1.13 наведено основні технічні характеристики вентильного фотоелемента ФЭСС-2 (зірчасто-срібний).

Таблиця 1.13 – Основні параметри вентильного фотоелемента ФЭСС-2

Тип фотоелемента	Інтегральна чутливість, мкА/лм	Внутрішній темновий опір, Ом	Максимальна частота, Гц	Фото-ЕРС, мВ
ФЭСС-2	3500...8000	1500...3000	5...10...10	60.....150

Люксметр Ю-116 дозволяє вимірювати освітленість у діапазоні від 5 до 100 лк. Існує дві основних границі вимірювань: (5–30) і (17–100). Вибір межі здійснюється дискретно. На рис. 1.17 зображена передня панель люксметра Ю-116. Фіксацією кнопок 1 або 2 можна вибрати необхідну границю вимірювань. Розширення границі здійснюється за допомогою світлофільтрів М10, М100, М1000, позначених на рисунку (К, М), (К, Р) відповідно. Функціональну схему люксметра Ю-116 подано на рис. 1.18.



Рисунок 1.17 – Передня панель люксметра Ю-116

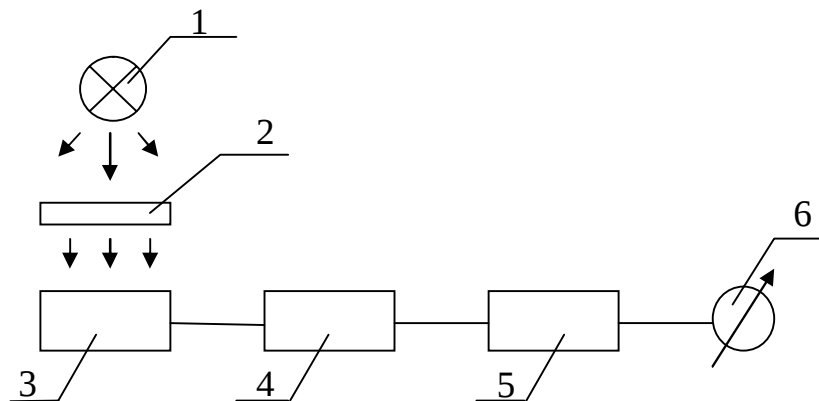


Рисунок 1.18 – Функціональна схема пристрою для дослідження люксметра Ю-116:

1 – джерело світла; 2 – світлофільтр; 3 – вентильний фотоелемент; 4 – подільник напруги; 5 – підсилювач; 6 – мікроамперметр

Світловий потік, що проходить крізь світлофільтр 2, перетвориться у вентильному фотоелементі в електричний сигнал. Цей сигнал після перетворення в блоці 4 і посилення в блоці 5 надходить до мікроамперметра. Шкала мікроамперметра градуйована в одиницях освітленості.

Дослід 1. Визначення залежності освітленості від відстані між джерелом світла й освітлюваною поверхнею при $U = const$

Функціональну схему лабораторного макета наведено на рис. 1.19. Вона складається з ЛАТРа 1, цифрового вольтметра 2, фотозбільшувача 3, фотоелемента 4, люксметра з набором фільтрів 5.

Даний макет дає можливість одержати залежності освітленості від відстані між джерелом світла й освітлюваною поверхнею, освітленості від живлячої напруги.

Порядок виконання дослідів

1. Зібрати схему (рис. 1.19).
2. Перевести вимірювальний прилад у режим «V ~» і встановити границю вимірювання 1000 В.
3. Після перевірки зібраної схеми викладачем включити прилад у мережу.
4. За допомогою ЛАТРа встановити на вимірювальному приладі значення напруги 220 В.
5. Крок і діапазон переміщення джерела світла задає викладач.
6. Змінюючи значення висоти h , зняти залежність $Q = f(h)$ і результати занести до табл. 1.14.
7. Повторити дослід з використанням фільтрів М10 і М100.
8. За результатами вимірювань побудувати графіки $Q = f(h)$.

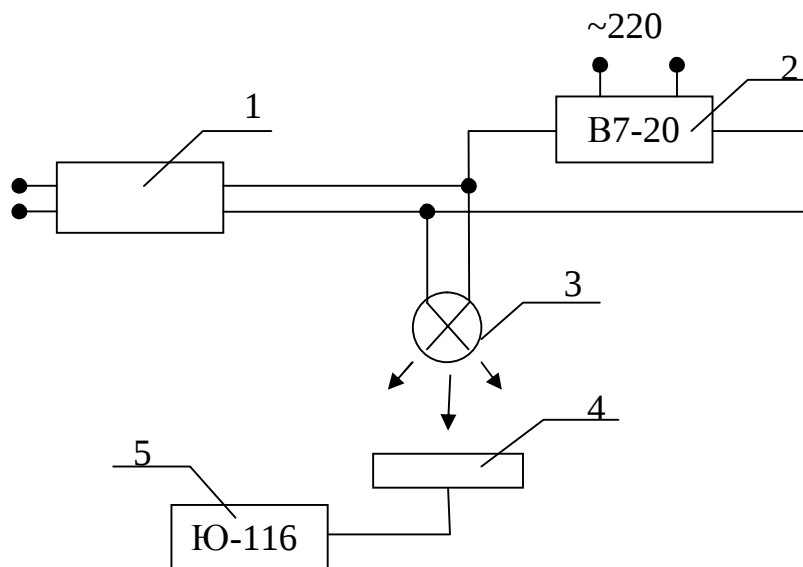


Рисунок 1.19 – Функціональна схема лабораторного макета

Таблиця 1.14 – Розрахункові залежності

Режим роботи: $U = 220 \text{ В}$							
$h, \text{ см}$				...			
$Q, \text{ лк}$				...			
Режим роботи: $U = 220 \text{ В}$, фільтр М10							
$h, \text{ см}$				...			
$Q, \text{ лк}$				...			
Режим роботи: $U = 220 \text{ В}$, фільтр М100							
$h, \text{ см}$				...			
$Q, \text{ лк}$				...			

Таблиця 1.15 – Результати досліду

Режим роботи: $h = \dots \text{ см}$							
$U, \text{ В}$				...			
$Q, \text{ лк}$				...			

Оформлення звіту

У звіті повинні бути наведені співвідношення, що описують заданий режим роботи люксметра, принципова схема лабораторного макета, таблиці, графіки залежностей $Q = f(h)$, $Q = f(U)$.

Контрольні запитання

1. Люксметр. Призначення. Принцип побудови.
2. Вентильний фотоелемент. Принцип побудови.
3. Пояснити отримані графіки залежностей.

Лабораторна робота № 5

ДОСЛІДЖЕННЯ ЄМНІСНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

Мета роботи: дослідження принципів дії ємнісних перетворювачів лінійного й кутового переміщень, набуття навичок роботи із цифровим вимірювачем ємності Е 8-4.

Загальні відомості

Ємнісні перетворювачі можуть бути розподілені на дві групи: генераторні й параметричні. Вхідною величиною генераторних ємнісних перетворювачів звичайно є електрична напруга, вихідною – лінійне або кутове переміщення рухливого електрода. До цієї групи належать електростатичні механізми, а також зворотні електростатичні перетворювачі приладів зрівноважування для вимірювання механічних величин. Вхідною величиною параметричних ємнісних перетворювачів є переміщення, а вихідною – зміна ємності. У сполученні з механічними перетворювачами тисків, сил, прискорень і вібрацій у механічне переміщення вони є невід'ємними елементами ємнісних манометрів, динамометрів, віброметрів, акселерометрів і т.д. Ємнісні перетворювачі являють собою електричні конденсатори, ємності яких можуть мінятися під дією вимірюваної величини на площу прикриття обкладок, величину зазору або діелектричну проникність середовища між обкладками.

За структурою побудови ємнісні перетворювачі можна розділити на диференціальні й недиференціальні. Перетворювачі другої групи мають рухливу й нерухливу обкладки, розділені повітряним зазором. Переміщення рухливої обкладки приводить до зміни корисної площі обкладок або повітряного зазору між ними. Диференціальні перетворювачі містять два конденсатори, ємності яких змінюються з різним знаком при переміщенні рухливої обкладки. Незважаючи на деяке ускладнення конструкції, такі схеми мають більш високу чутливість і лінійність характеристики, а також мають меншу залежність точності вимірювань від джерела живлення і зміни вологості й температури навколишнього середовища.

За конструктивним рішенням чутливих елементів ємнісні перетворювачі підрозділяють на плоскопаралельні, коаксіальні, стрижневі, з обкладками, виконаними зі штока, однопроменеві, багатопроменеві й т.д.

Незважаючи на відмінності, всі конструктивні рішення перетворювачів можна звести, в основному, до двох типів: коаксіального й плоскопаралельного.

Обмежившись розглядом типів ємнісних перетворювачів, використовуваних як вимірювальні перетворювачі лінійних переміщень, їх основні конструктивні схеми й вихідні характеристики можна надати у вигляді таблиці (див. додаток А).

Вираз для ємності перетворювача із плоскопаралельними обкладками, що працює в діелектричних середовищах, без урахування крайового ефекту, можна записати у вигляді, пФ:

$$C = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{S}{d} = 8,85 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon \cdot \frac{S}{d}, \quad (1.23)$$

де ε_0 – електрична постійна ($8,85 \cdot 10^{-2}$, пФ/см);

ε – відносна діелектрична проникність середовища;

d – відстань між обкладками конденсатора, см;

S – площа пластини, см².

Формула (1.23) поширюється на випадок, коли ε має однорідний характер, і надалі будуть розглядатися тільки такі типи перетворювачів.

Для всіх типів ємнісних перетворювачів з постійною величиною зазору між обкладками інформативним параметром є зміна площі покриття пластин S , а для перетворювачів з постійною площею пластин – змінний зазор d .

Відносна зміна ємності для перетворювачів із плоскопаралельними обкладками (1.23) визначається як

$$\delta_C = \delta_\varepsilon + \delta_S - \delta_d. \quad (1.24)$$

Площа S визначається лінійними розмірами, що становлять 10–100 мм, і зміна цих розмірів на 0,1 – 1 мкм викликає малу зміну, якою можна знехтувати, площі S і ємності C .

Зазор d у ємнісних перетворювачах становить від 10 мкм до 1 мм і його зміна навіть на 0,1 мкм може викликати істотну похибку. Однієї з основних причин зміни зазору є зміна геометричних розмірів, викликаних лінійним розширенням матеріалів під впливом температури. Діелектрична проникність повітря досить стабільна й мало змінюється під дією зовнішніх умов: при зміні температури на 10 °C $\delta_\varepsilon = 0,002$ %, при зміні вологості від 30 % до 40 % $\delta_\varepsilon = 0,01$ %, при зміні тиску на 105 Н/м² $\delta_\varepsilon = 0,06$ %.

Дослід 1. Дослідження циліндричного ємнісного вимірювального перетворювача (ЄВП) лінійного переміщення

На рис. 1.20 зображені відповідно схематична конструкція й електрична еквівалентна схема даного перетворювача.

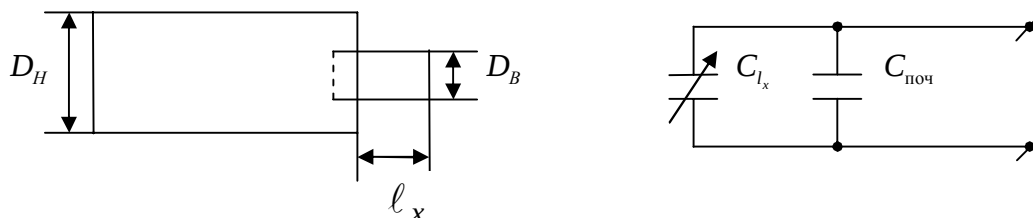


Рисунок 1.20 – Схематична конструкція й електрична еквівалентна схема ємнісного вимірювального перетворювача

Ємність циліндричного перетворювача переміщення:

$$C_{l_x} = 8,85 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{2\pi\epsilon l_x}{\ln(D_H / D_B)}, \quad (1.25)$$

де l_x – переміщення електрода, [см];
 D_H – діаметр зовнішнього електрода ($D_H = 3,39$ см);
 D_B – діаметр внутрішнього електрода ($D_B = 3,1$ см);
 ϵ – діелектрична проникність повітря ($\epsilon = 1$).

Використовуючи ці дані, одержимо

$$C_{l_x} = 6,22 \cdot l_x. \quad (1.26)$$

Еквівалентна ємність даного ЄВП:

$$C = C_{\text{поч}} + C_{l_x}, \quad (1.27)$$

де $C_{\text{поч}}$ – початкова ємність досліджуваного ЄВП ($C_{\text{поч}} = 20$ пФ).

Вимірювання проводяться за допомогою цифрового вимірювача ємності *E* 8-4, призначеного для вимірювання ємності й тангенса кута втрат ємнісних конденсаторів у лабораторних і цехових умовах. Границі вимірювання ємності конденсаторів, залежно від з'єднувальних проводів, – від 0,03 пФ до 15,999 мкФ.

Вимірювання ємності конденсатора здійснюється за допомогою мостового вимірювального ланцюга змінного струму, виконаного за схемою трансформаторного моста.

Напруга на вимірюваному об'єкті не перевищує 18 В.

Час одного виміру, включаючи автоматичний вибір границі вимірювання, не перевищує 1 с.

Підготовка приладу до роботи

Установити тумблер **МЕРЕЖА**, тумблер **СПОСТЕРЕЖЕННЯ** в нижнє положення. Установити перемикач **КАЛІБРУВАННЯ** в положення **ВИМК**. Включити кабель живлення в мережу.

Вимірювання в режимі періодичного запуску

Установити перемикач **ЗАПУСК** у положення **ПЕРІОДИЧ**. Включити тумблер **МЕРЕЖА**, і дати прогрітисся приладу 5 хв. Приєднати досліджуваний ВП до затискачів з'єднувального кабеля. Після запуску приладу за допомогою кнопки **ЗАПУСК** прилад буде робити періодичні вимірювання з індикацією результату вимірювання протягом 2 с.

Порядок виконання досліду

Виміряти ємність перетворювача при різних переміщеннях внутрішнього електрода. Крок вимірювань задає викладач. Дані занести в табл.1.16. Визначити чутливість вимірювального перетворювача.

$$S_{\text{ном}} = k_{\text{ном}} = (C_{\text{ном}} - C_{\text{поч}}) / l_{\text{ном}}, \quad (1.28)$$

де $k_{\text{ном}}$ – номінальний коефіцієнт перетворення.

Записати рівняння номінальної характеристики даного ємнісного ВП. Побудувати графіки $C_{\text{ср}} = f(l_x)$, $C = f(l_x)$.

Таблиця 1.16 – Результати досліду

Експериментальні дані					Розрахункові дані		
l_x , см	C_1 , пФ	C_2 , пФ	C_3 , пФ	$C_{\text{ср}} = (C_1 + C_2 + C_3) / 3$	$C = C_{\text{поч}} + C_{\text{розр}}$	$\Delta = C_{\text{ср}} - C$	$J = (\Delta / C_{\text{ном}}) \cdot 100 \%$

Дослід 2. Дослідження ЄВП кутового переміщення, град

Уведений у кінематичну схему редуктор дозволяє з необхідною точністю встановити кут повороту (перекриття) пластин ротора й статора (рис. 1.21). Ємність ВП кутового переміщення, град :

$$C_{\varphi x} = \frac{8,85 \cdot 10^{-2} \cdot \pi (R^2 - r^2)}{d} \cdot (N - 1) \varphi, \quad (1.29)$$

де $R = 2$ см – зовнішній радіус кільця; $r = 1,5$ см – внутрішній радіус кільця; $N = 8$ – кількість пластин; $(N-1)$ – кількість проміжків; φ – кут переміщення в рад; $d = 0,09$ см – відстань між пластинами.

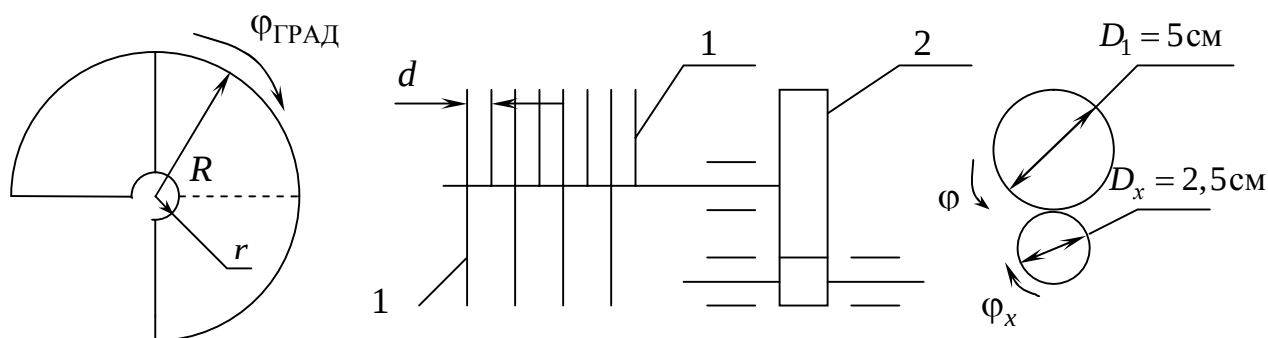


Рисунок 1.21 – Конструкція й кінематична схема ЄВП кутового переміщення:
1 – пластини конденсатора; 2 – редуктор приводу ротора конденсатора

Порядок виконання дослідів

Виміряти ємність ВП при різних переміщеннях ротора. Крок вимірювань задає викладач. Дані занести в табл. 1.17. Побудувати графіки залежності $C = f(\varphi_x)$, $C_{\text{ср}} = f(\varphi_x)$. Записати рівняння номінальної характеристики даного ємнісного ВП.

Таблиця 1.17 – Результати дослідів

Експериментальні дані							Розрахункові дані		
φ_x , град.	$\varphi = \varphi_x / 2$, град.	φ , рад.	C_1 , пФ	C_2 , пФ	C_3 , пФ	$C_{\text{ср}} = (C_1 + C_2 + C_3) / 3$	$C = C_{\text{поч}} + C_{\text{розр}}$	$\Delta = C_{\text{ср}} - C$	$j = (\Delta / C_{\text{ном}}) \cdot 100\%$

Дослід 3. Дослідження ЄВП кутового переміщення (розподілу)

На рис. 1.22 схематично зображено конструкцію даного перетворювача. Еквівалентна ємність цього ВП:

$$C = C_{\text{поч}} + C_{l_x} = C_{\text{поч}} + k_{\text{ном}} \cdot l_x, \quad (1.30)$$

де $k_{\text{ном}}$ – коефіцієнт перетворення, $k_{\text{ном}} = S_{\text{ном}}$.

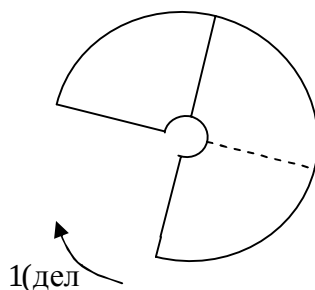


Рисунок 1.22 – Конструкція ємнісного ВП кутового переміщення

Порядок виконання дослідів

Виміряти ємність ВП при різних переміщеннях ротора й заповнити стовпці таблиці 1.18 експериментальних даних. По них визначити чутливість ВП.

$$S_{\text{ном}} = \frac{C_{\text{ср.мах}} - C_{\text{нач}}}{l_{\text{мах}}}, \quad (1.31)$$

Крок вимірювань задає викладач. Визначити точки номінальної характеристики ВП, знаючи, що $k_{\text{ном}} = S_{\text{ном}}$, і заповнити в таблиці стовпці розрахункових даних. Побудувати графіки залежності $C = f(l_x)$.

Таблиця 1.18 – Результати дослідів

Експериментальні дані					Розрахункові дані		
l , поділи	C_1 , пФ	C_2 , пФ	C_3 , пФ	$C_{\text{ср}}$, пФ	$C = C_{\text{поч}} + C_{l_x}$	$\Delta_{\text{НЛ}} =$ $= C_{\text{ср}} - C$	$J = (\Delta_{\text{НЛ}}/C_{\text{мах}}) \cdot 100 \%$

Контрольні запитання

1. Поясніть принцип дії параметричних ємнісних перетворювачів. Наведіть приклади їхнього використання.
2. Укажіть позитивну якість диференціальних ємнісних перетворювачів.
3. Поясніть суть крайового ефекту.

Лабораторна робота № 6

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

Метою роботи є одержання навичків контактного вимірювання температури, вивчення характеристик теплових перетворювачів і знімання їх градуювальних кривих.

Загальні відомості

Температура поряд з тиском і об'ємом являє собою одну із трьох основних величин, що характеризують термодинамічний стан речовини, і безпосередньо пов'язана з його внутрішньою енергією.

Температура – це статистичне поняття, яке застосовне до систем, що складаються з великої кількості часток, які перебувають у тепловій рівновазі. Енергія часток, усереднена за їхнім числом, визначає температуру об'єкта системи.

Якщо кілька тіл з різними температурами привести в зіткнення, то відбувається теплообмін, що приводить до вирівнювання температур.

Теплообмін здійснюється трьома різними способами:

- а) за допомогою теплопровідності (у твердих тілах);
- б) за допомогою конвекції (рідини й газу);
- в) за допомогою випромінювання.

Тепловими називаються перетворювачі, принцип дії яких заснований на використанні теплових процесів (нагрівання, охолодження, теплообміну) і вхідною величиною яких є температура.

Температура як параметр теплового процесу не піддається безпосередньому вимірюванню.

У той же час вона є функцією стану речовини, безпосередньо пов'язаною із внутрішньою енергією тіла, а через неї і з іншими властивостями. Отже, при зміні температури міняється й багато інших фізичних властивостей тіл (об'ємне розширення тіл при нагріванні; залежність опору речовини від температури, виникнення термо-ЕРС), які можна виміряти.

Засоби вимірювань температури різноманітні й різняться діапазоном вимірювань, типом використовуваного термоперетворювача, наявністю

або відсутністю контакту між термоперетворювачем і об'єктом вимірювань. За останньою ознакою всі засоби вимірювань температури ділять на контактні й безконтактні.

Засоби для безконтактних вимірювань застосовують у випадках, коли вимірювана температура перевищує 2500 °С, коли контакт термоперетворювача з об'єктом вимірювання утруднений або неможливий (об'єкт, що рухається, або вилучений об'єкт, агресивне середовище й т.п.), або коли неприпустиме викривлення температурного поля об'єкта за рахунок розміщення в ньому термоперетворювача.

Для вимірювання температури залежно від її значення, необхідної точності й умов вимірювань можуть бути використані різні прилади. У таблиці (див. додаток А) наведені орієнтовні значення діапазонів вимірюваних температур і досягнута точність вимірювань найпоширенішими приладами для вимірювання температур.

Для вимірювання температури контактними засобами в основному використовують термометри опору й термоелектричні термометри.

1. Метали, призначені для виготовлення чутливих елементів термометрів опору, повинні мати високостабільний ТКО, лінійну залежність опору від температури, гарну відтворюваність значень електричного опору в інтервалі робочих температур, інертність до впливів навколишнього середовища. До таких матеріалів належить платина. Якщо верхня границя температури застосування термометра невисока, то широко застосовуються мідні, вольфрамові й нікелеві терморезистори.

У даній роботі використовується мідний термометр опору КТ2 типу ТСМ. Мідні термометри опору типу ТСМ можуть застосовуватися для тривалого вимірювання температури від – 50 до 200 °С (понад 200 °С мідь інтенсивно окислюється). Основні технологічні дані мідних перетворювачів надано в додатку Б.

До позитивних якостей міді як матеріалу, застосовуваного для виготовлення чутливих елементів термометрів опору типу ТСМ, варто віднести дешевину, простоту одержання такого дроту в різній ізоляції, можливість одержання провідникової міді високої чистоти (сплави мають менше значення ТКО), лінійний характер залежності опору міді від температури. До числа недоліків міді варто віднести малий питомий опір ($\rho = 1,7 \cdot 10^{-8}$ Ом·м) й інтенсивне окислення при невисоких температурах.

Залежність електричного опору міді від температури в діапазоні від

–50 до – 200 °С підкоряється рівнянню:

$$R_t = R_0(1 + \alpha t),$$

де R_t і R_0 – опори терморезистора відповідно при температурі t і 0 °С;
 α – ТКО міді ($\alpha = 4,26 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, K^{-1}).

Якщо для мідного терморезистора потрібно визначити R_2 (при температурі t_2) по відомому опорі R_1 (при температурі t_1), то варто користуватися формулою:

$$R_2 = R_1(1 + \alpha t_2) / (1 + \alpha t_1). \quad (1.32)$$

Розглянемо графічну залежність $R_t = f(t)$ (рис. 1.23).

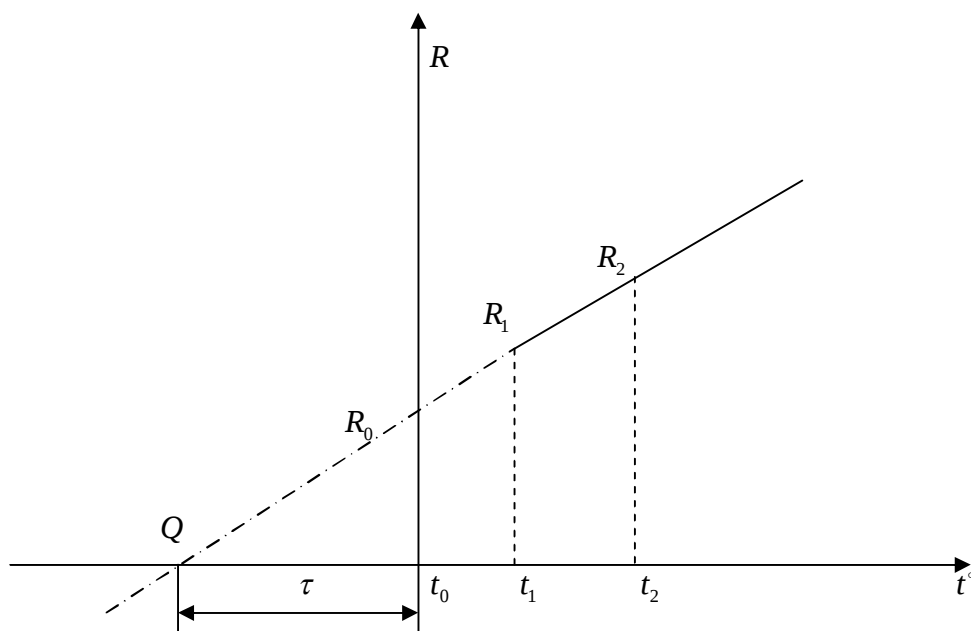


Рисунок 1.23 – Графічна залежність $R_t = f(t)$

Якщо продовжити пряму R_1R_2 до перетинання з віссю температур у точці Q , то одержимо ряд подібних трикутників. Звідси знайдемо співвідношення:

$$\frac{R_1}{t_1 + \tau} = \frac{R_2}{t_2 + \tau} = \frac{R_0}{\tau}. \quad (1.33)$$

Фізичний зміст параметра τ полягає в тому, що він являє собою ту температуру, яка відповідає нульовому опору терморезистора за умови збереження лінійної залежності до низьких температур.

Із графіка рис. 1.23 можна визначити R_0 , що відповідає $t = 0^\circ\text{C}$.

Похибки, що виникають при вимірюванні температури термометрами опору, викликаються нестабільністю в часі початкового опору термометра і його ТКО, зміною опору лінії, що з'єднує термометр із вимірювальним приладом, перегрівом термометра вимірювальним струмом (звичайно струм значно менший 10 мА).

2. Напівпровідникові терморезистори мають нелінійну функцію перетворення:

$$R_t = R_{t_{20}} e^{\alpha(t-t_{20})}, \quad (1.34)$$

де $\alpha = -(0,025 - 0,04) \frac{1}{^\circ\text{C}}$; $t = 20^\circ\text{C}$.

Вони відрізняються від металевих терморезисторів більшими значеннями ТКО, а отже, меншими габаритами, меншою інерційністю, більшою чутливістю. ТКО напівпровідникових терморезисторів негативний і зменшується обернено пропорційно квадрату абсолютної температури.

До числа недоліків напівпровідникових терморезисторів можна віднести такі:

- а) нелінійність залежності від температури;
- б) мала допустима потужність розсіювання при проходженні вимірювального струму;
- в) значний розкид від зразка до зразка як номінального опору, так і ТКО (тобто відсутність взаємозамінності, необхідність індивідуального градуювання).

Похибка вимірювання температури напівпровідниковими терморезисторами залежить в основному від нестабільності його опору, похибки градуювання, похибки перегріву.

У даній роботі використані напівпровідникові терморезистори типу КМТ-17А, СТЗ-1, ММТ-1.

3. При щільному з'єднанні (контакті) двох металевих поверхонь електрони з металу з меншою роботою виходу будуть переходити до

металу з більшою роботою виходу. При цьому виникає контактна різниця потенціалів, значення якої залежить від температури.

Термоелемент складається із двох таких з'єднань (зварених або спаяних); якщо їхні температури однакові, то контактні напруги компенсуються. Якщо контактні з'єднання мають різну температуру, то виникає термо-ЕРС, що викликає термострум. Його значення залежить від опору ланцюга, матеріалів і різниці температур. Термоелектричний метод вимірювання температур заснований на суворій залежності термо-ЕРС від температури.

До термоелектродних матеріалів, призначених для виготовлення термопар, пред'являють ряд вимог: однозначна, бажано близька до лінійної, залежність термо-ЕРС від температури; стабільність і відтворюваність термоелектричної характеристики; висока чутливість, жаростійкість і механічна міцність; хімічна інертність; термоелектрична однорідність.

Функція перетворення термопари:

$$E(t, t_0) = f(t) - f(t_0), \quad (1.35)$$

де $E(t, t_0)$ – термо-ЕРС перетворювача;

$f(t), f(t_0)$ – функції температур робочого спаю й вільних (холодних) кінців термопари.

Дослід 1. Вимірювання температури мідним терморезистором

На рисунку 1.24 зображено макет для контролю основних характеристик теплових перетворювачів у діапазоні від 0 до 110 °С.

Термопари й терморезистори можуть бути підключені до зовнішнього приладу безпосередньо або за допомогою перемикачів К1 і К2 відповідно.

У даному досліді температуру масла вимірюють за допомогою мідного терморезистора R_{T_2} .

Порядок виконання дослідів

Увага! Дослід 1, дослід 2, дослід 3 виконуються одночасно.

1. До клем лабораторного макета (рис. 1.24) підключити прилад для вимірювання опору (границя вимірювання).

2. Перемикач К1 перевести в положення 2.
3. Після перевірки схеми викладачем підключити прилад до мережі.
4. Включити тумблер ВКЛ на панелі макета, при цьому повинна засвітитися лампочка сигналізації.
5. Виміряти опір мідного терморезистора при різних температурах масла.
6. Діапазон і крок вимірювань задає викладач.
7. Результати вимірювань занести в табл. 1.19.
8. Побудувати графік $R_2 = f(t)$, за ним, використовуючи графічні побудови, визначити значення R_0 , τ для обраної лінійної ділянки графіка. Визначити клас точності мідного терморезистора.

Градуювальні значення мідного терморезистора й припустимі відхилення від номінальних значень опору ТСМ дані в додатку Б.

Таблиця 1.19 – Результати дослідів

Ртутний термометр t , °С	Опір мідного терморезистора R_2 , Ом	Градуювальні значення $R_{2Г}$, Ом	$\delta = \frac{R_2 - R_{2Г}}{R_{2Г}} \cdot 100 \%$

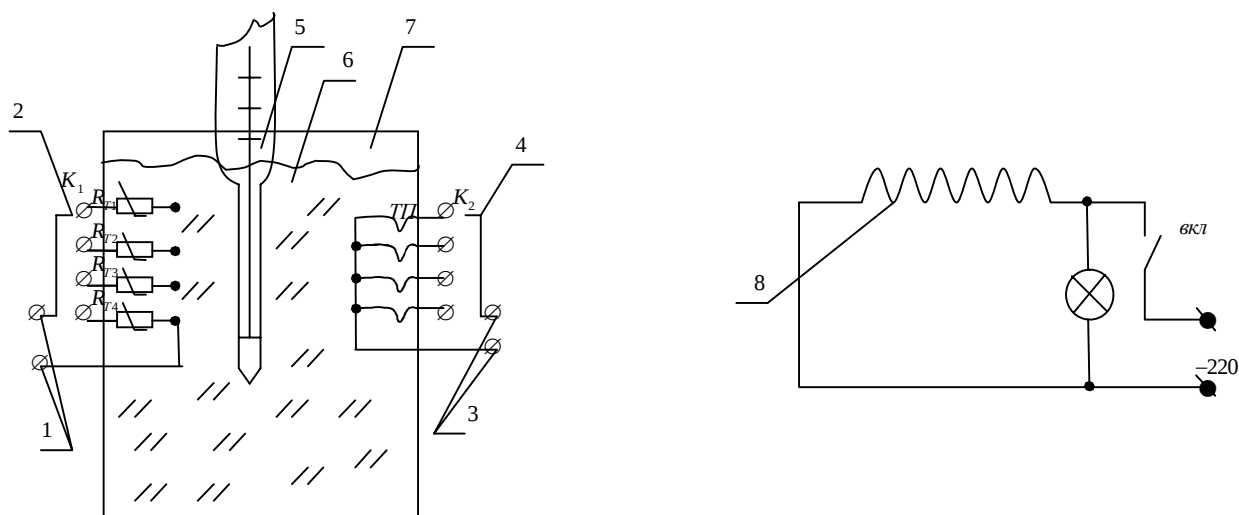


Рисунок 1.24 – Зовнішній вигляд і електрична схема макета для контролю характеристик теплових перетворювачів :

- 1 – клеми підключення терморезисторів; 2 – перемикач підключення терморезисторів K_1 ; 3 – клеми підключення термопар; 4 – перемикач підключення термопар K_2 ; 5 – термометр; 6 – масло; 7 – колба; 8 – нагрівач

Дослід 2. Вимірювання температури напівпровідниковим терморезистором

У даному досліді температуру масла вимірюють напівпровідниковими резисторами R_{T_1} , R_{T_3} , R_{T_4} .

Порядок виконання досліді

1. Дослід 2 проводиться аналогічно досліді 1. Перемикач K_1 ставимо в положення 1, 3, 4 і проводимо вимірювання.
2. Результати вимірювань занести в табл. 1.20.
3. Побудувати графіки $R = f(t)$, $R_p = f(t)$.

Таблиця 1.20 – Результати досліді

Ртутний термометр t , °C	Опір п/п терморезистора R , кОм R_1, R_3, R_4	Опір п/п терморезистора R_p , кОм (розрахункове)	$\delta = \frac{R - R_p}{R_p} \cdot 100 \%$

Дослід 3. Вимірювання температури термоелектричним перетворювачем

У даному досліді температуру масла вимірюють різними видами термопар.

Порядок виконання досліді

1. До клем III і IV лабораторного макета підключити прилад для вимірювання ЕРС.
2. Перемикач K_2 установити в положення 1, 2, 3 або 4 (за завданням викладача).
3. Підключити прилад до мережі.
4. Виміряти ЕРС термопар при різній температурі масла.

5. Діапазон і крок вимірювання задає викладач.
6. Результати вимірювань занести в таблицю 1.21. Градувальні значення стандартних термопар наведено в додатку В.
7. Побудувати графіки $E = f(t^\circ)$, $E_\Gamma = f(t^\circ)$.

Таблиця 1.21 – Результати досліду

Ртутний термометр t , $^\circ\text{C}$	Вимірювана термо-ЕРС, E , мВ	Градувальне значення стандартної термопари, E_Γ	$\delta = \frac{E - E_\Gamma}{E_\Gamma} \cdot 100 \%$

Зміст звіту

У звіті повинні бути наведені таблиці експериментальних даних, за даними вимірювань і обчислень побудувати графіки, зазначені в описі дослідів.

Контрольні запитання

1. Які існують методи вимірювань температури?
2. Чому чутливий елемент первинного вимірювального перетворювача значною мірою визначає головні його можливості?
3. Назвіть теплові чутливі елементи, обґрунтуйте можливі границі їхнього використання.
4. Перелічіть переваги й недоліки металевих термометрів.
5. Перелічіть переваги й недоліки напівпровідникових термо-резисторів.
6. Поясніть суть термоелектричного методу вимірювання.

ДОДАТОК А

Прилади для вимірювань температури	Діапазон вимірювань, °C	Досягнута похибка, %
Контактні		
Термометри опору з терморезисторами:		
із благородних металів	–260 ÷ 1300	±0,002
з неблагородних металів	– 200 ÷ 200	±0,5
з напівпровідникових матеріалів	–270 ÷ 300	±1,0
Термометри опору з термотранзисторами		
Кварцові термометри	– 60 ÷ 100	±1,0
Термоелектричні термометри з термопарами:		
із благородних металів	– 50 ÷ 100	±0,05
з неблагородних металів	– 20 ÷ 1800	±0,1
з напівпровідникових матеріалів	– 200 ÷ 1300	±1,0
	0 ÷ 2500	±1,0
Безконтактні		
Пірометри випромінювання:		
радіаційні	20 ÷ 4000	±1,0
оптичні (яскравісні)	700 ÷ 10000	±0,5
кольорові	900 ÷ 300	±1,0

ДОДАТОК Б

Таблиця Б1 Градувальна таблиця для мідних термометрів опору

Температура, °C	Опір, Ом
1	2
–50	41,71
–40	43,97
–30	46,23
–20	48,48
–10	50,74
0	53,00
10	55,26
20	57,52
30	59,77

Продовження таблиці Б1 :

1	2
40	62,03
50	64,29
60	66,55
70	68,81
80	71,06
90	73,32
100	75,58
110	77,84
120	80,09
130	82,35

**Таблиця Б2 Припустимі відхилення, %, від номінальних значень опору,
металевих термоперетворювачів опору (при 0 °С)**

Тип	Клас точності				
	I	II	III	IV	V
ТСП	±0,05	±0,1	±0,4	±0,2	±0,8
ТСМ		±0,1	±0,5	±0,2	±1,0

ДОДАТОК В

Температура робочого кінця спаю, °С	Термо-ЕРС, мВ			
	ТП мідь- константан	ТП залізо- константан	ТП хромель- копель	ТП хромель- алюмель
30	1,196	1,536	1,801	1,203
40	1,611	2,058	2,419	1,611
50	2,035	2,585	3,047	2,022
60	2,467	3,115	3,683	2,430
70	2,908	3,649	4,329	2,850
80	3,357	4,186	4,983	3,266
90	3,813	4,725	5,646	3,681
100	4,277	5,268	6,317	4,095
110	4,749	5,812	6,996	4,508
120	5,227	6,359	7,683	4,919
130	5,712	6,907	8,377	5,327

Лабораторна робота № 7

ДОСЛІДЖЕННЯ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

Метою роботи є ознайомлення із принципом роботи, будовою п'єзореzonансного перетворювача “температура-частота” і визначення основних характеристик даного перетворювача.

Загальні відомості

П'єзоелектричними називаються кристали й текстури, що електризуються під дією механічних напруг (прямий п'єзоефект) і деформуються в електричному полі (зворотний п'єзоефект). П'єзоефект має знакочутливість, тобто відбувається зміна знака деформації при зміні напрямку поля.

П'єзоелектричні властивості мають багато кристалічних речовин: кварц, турмалін, ніобат літію, сегнетова сіль й ін., а також штучно створювані й спеціально поляризовані в електричному полі п'єзокераміки: титанат барію, титанат свинцю й ін.

Оборотність п'єзоелектричного ефекту дозволяє виконувати п'єзореzonатор у вигляді двополюсника, що поєднує системи електричного збудження механічних коливань і знімання електричного сигналу. Резонансні коливання в п'єзоелементі виникають у результаті встановлення в ньому стоячих ультразвукових хвиль. Довжина хвилі

$$\lambda = v / f ,$$

де v – швидкість поширення ультразвуку,

f – частота випромінювання.

Якщо довжина хвилі λ – така, що на відрізку h між гранями, від яких відбиваються хвилі, укладається ціле число напівхвиль, то в п'єзоелементі встановлюються стоячі хвилі. Стоячим хвилям відповідає частота збуджуючої напруги

$$f_{\text{пр}} = \frac{n}{2h} \sqrt{\frac{E_{ij}}{\rho}} ,$$

де n – кількість напівхвиль, що уклалися;
 E_{ij} – константа пружності матеріалу;
 ρ – густина матеріалу.

Частота коливань, при яких на довжині h укладається одна напівхвиля, є резонансною (основною) частотою й дорівнює

$$f_{\text{пр}} = \frac{1}{2h} \sqrt{\frac{E_{ij}}{\rho}}.$$

Основою досліджуваного п'єзрезонансного частотного перетворювача є п'єзрезонатор, частота якого змінюється під впливом температури, що впливає на геометричні розміри, густину, і, головним чином, на пружні властивості кварцу. Сучасні кварцові резонатори розраховані на застосування в діапазоні частот 1кГц – 200МГц. Перекриття такого широкого діапазону частот можливо лише при використанні п'єзоелементів, які значно відрізняються один від одного. Так, мінімальна товщина п'єзоелемента становить приблизно 0,05 мм (елементи меншої товщини німічні й нетехнологічні), а максимальний розмір досягає 50 мм. Залежно від вибору частотовизначальних розмірів п'єзоелемента вдається змінювати частотний діапазон у 1000 разів.

За конструктивним виконанням (видом герметизації) кварцові резонатори поділяються на дві групи: вакуумні (залишковий тиск менше 10^{-3} мм рт.ст.) і герметизовані, а за функціональним призначенням – генераторні (для застосування в схемах генераторів), а також фільтрові.

Генераторні резонатори залежно від рівня точності настроювання й стабільності частоти підрозділяються на резонатори загального типу й прецизійні, термостатовані (для використання разом із термостатом) і термокомпенсовані (для схем генераторів з термокомпенсацією).

До прецизійних належать резонатори із припустимим відхиленням робочої частоти від номінальної $3 \cdot 10^{-6}$ Гц і менше, і зміною частоти в часі, що не перевищує 10^{-8} Гц за тиждень (або 10^{-9} Гц у добу).

У досліджуваному перетворювачі використовується герметизований ТКР LC- зрізу з коливаннями за товщиною.

Основні характеристики перетворювача «температура-частота»

До основних характеристик перетворювача належать:

1. Термочутливість – залежність резонансної частоти п'єзоелектричного резонатора від температури, Гц/°С.

$$S = C_{\theta} = \left. \frac{\partial f}{\partial \theta} \right|_{\theta = \theta_0}.$$

Кількісно термочутливість прийнято оцінювати через коефіцієнт термочутливості C_{θ} , який визначений при фіксованій температурі θ_0 і чисельно дорівнює похідній від частоти f за температурою.

2. Для порівняння за термочутливістю резонаторів з різними робочими частотами зручно користуватися поняттям температурного коефіцієнта частоти (ТКЧ), °С⁻¹

$$\text{ТКЧ} = T_f = \frac{\partial f}{f \partial \theta}.$$

Коефіцієнти C_{θ} й ТКЧ однозначно пов'язані між собою співвідношенням

$$C_{\theta} = T_f \cdot f.$$

Залежність частоти резонатора від температури $f(\theta)$ називається температурно-частотною характеристикою (ТЧХ). Експериментально встановлено [1], що ТЧХ будь-якого кварцового резонатора має форму квадратичної або кубічної параболи або прямої лінії й з достатньою для практики точністю може в діапазоні температур від – 200 до + 200 °С бути подана у вигляді полінома третього ступеня:

$$\begin{aligned} f(\theta) &= f_0 \left[1 + \sum_{n=1}^3 \dot{\theta}_f^{(n)} (\theta - \theta_0)^n \right] = \\ &= f_0 \left[1 + \dot{\theta}_f^{(1)} \cdot (\theta - \theta_0) + \dot{\theta}_f^{(2)} \cdot (\theta - \theta_0) + \dot{\theta}_f^{(3)} \cdot (\theta - \theta_0) \right] \end{aligned} \quad (1.36)$$

де $T_f^{(1)} = \left. \frac{\partial f}{\partial \theta f_0} \right|_{\theta = \theta_0}$; $T_f^{(2)} = \left. \frac{\partial^2 f}{2 \partial \theta^2 f_0} \right|_{\theta = \theta_0}$; $T_f^{(3)} = \left. \frac{\partial^3 f}{6 \partial \theta^3 f_0} \right|_{\theta = \theta_0}$ – ТКЧ першого, другого й третього порядків.

Для реалізації перетворювачів, що мають лінійну ТЧХ, необхідно, як це видно з (1.36), виконання одночасно двох умов:

$$T_f^{(2)} = 0; \quad T_f^{(3)} = 0.$$

Ці властивості має температурний коефіцієнт опору (ТКО) LC – зрізу (від англ. Linear coefficient – лінійний коефіцієнт). Для LC – зрізу температурний коефіцієнт індуктивності (ТКІ), близький до $36 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$.

1. Градувальна характеристика перетворювача

$$\begin{aligned} f(\theta) &= f_1(\theta) - f_2 = f_1(\theta) - f_2 + \Delta f = \\ &= f_1(\theta) - f_2 + T_f \cdot f_1(\theta) \cdot \theta = f(\theta) + C_\theta \cdot \theta, \end{aligned}$$

де $f_1(\theta)$, f_2 – вихідні частоти вимірювального Г1 і опорного Г2 генераторів, Гц;

$f_1(\theta_0)$ – частота вимірювального генератора при температурі калібрування термочутливого кварцового резонатора ($\theta_0 = 0^\circ\text{C}$), Гц;

θ – поточне значення температури, $^\circ\text{C}$.

2. Похибка перетворювача

$$\gamma = \frac{f_D(\theta) - f_G(\theta)}{f_G(\theta_K) - f_G(\theta_H)} \cdot 100\% \quad (1.37)$$

де $f_{\hat{A}}(\theta)$ – значення вихідної частоти перетворювача;

$f_{\hat{A}}(\theta)$ – дійсне значення вихідної частоти перетворювача, отримане з дослідних даних;

$f_{\hat{A}}(\theta_{\hat{E}})$, $f_{\hat{A}}(\theta_{\hat{I}})$ – вихідні частоти перетворювача, що відповідають початковому і θ_H кінцевому θ_K значенням вимірюваних температур.

Принцип дії й будова п'єзокварцового перетворювача «температура-частота»

Структурну схему досліджуваного перетворювача наведено на рис. 1.25.

Він складається з вимірювального Γ_1 і опорного Γ_2 генераторів електричних коливань, змішувача частот ЗЧ, фільтра низьких частот ФНЧ, підсилювача ВП і блоку живлення БЖ.

Вимірювана температура сприймається термочутливим кварцовим резонатором ТКР, що є частотоподавальним елементом вимірювального генератора. Таким чином, зміна температури θ на величину $\Delta\theta$ викликає зміну частоти $f_1(\theta)$ вимірювального генератора на величину Δf . Опорний генератор виробляє електричні коливання стабільної частоти f_2 , близької до частоти $f_1(\theta)$ вимірювального генератора при температурі калібрування ТКР, що дорівнює $\theta = 0^\circ\text{C}$. Частоти $f_1(\theta)$ й f_2 подаються на змішувач ЗЧ, у якому формується вихідний сигнал перетворювача:

$$f(\theta) = f_1(\theta) - f_2.$$

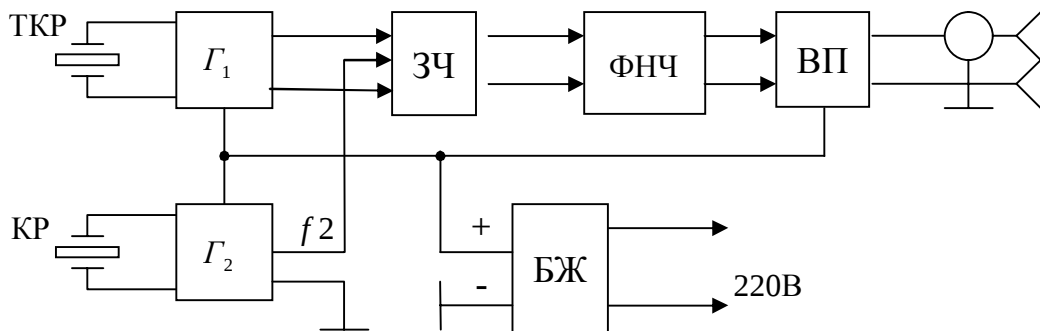


Рисунок 1.25 – Структурна схема п'єзокварцового перетворювача

Після заглушення вищих гармонік і посилення цей сигнал може бути виміряний стандартним електронно-лічильним частотоміром або переданий для реєстрації й керування.

Вимірювальний генератор перетворювача (рис. 1.26) зібраний за ємнісною триточною схемою на транзисторі $VT1$. На транзисторі $VT2$ побудовано істоковий повторювач.

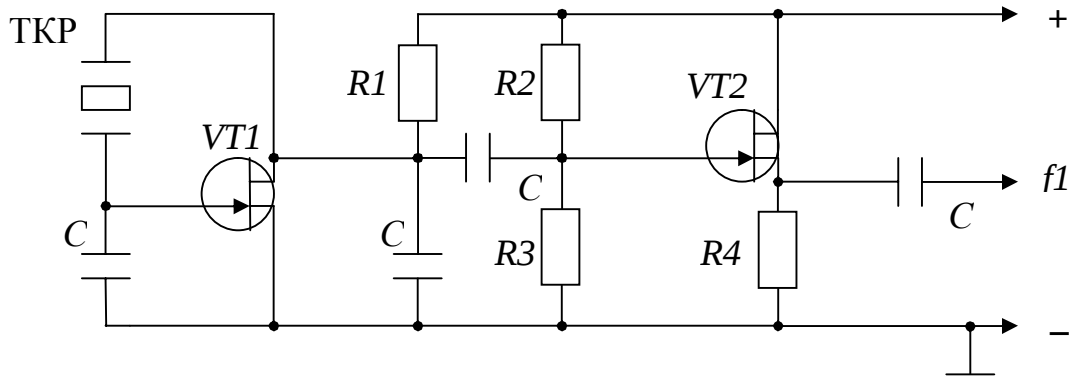


Рисунок 1.26 – Вимірювальний генератор перетворювача

Опорний генератор виконано за аналогічною схемою (рис. 1.26) з термостабільним кварцовим резонатором.

Змішувач частот (рис. 1.27) зібрано на транзисторах $VT3$, $VT4$ у сполученні з емітерним повторювачем на транзисторі $VT5$.

Фільтр низької частоти (рис. 1.27) побудовано за Γ -подібною схемою на елементах $L1$, $L2$, $C8$, $C9$.

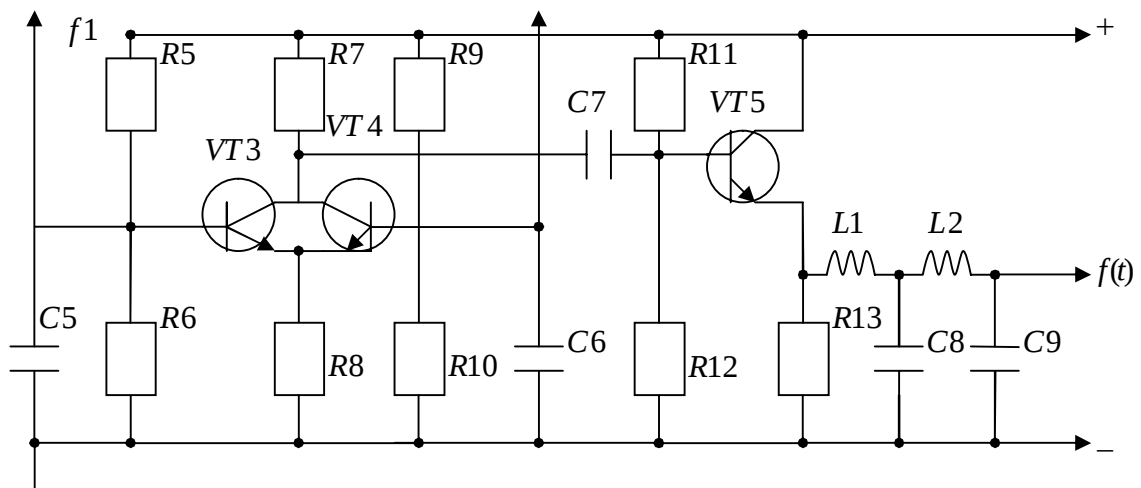


Рисунок 1.27 – Змішувач частот і ФНЧ

Підсилювач (рис. 1.28) виконано на двох транзисторах VT6, включеному за схемою із загальним емітером, і VT7, включеним за схемою із загальним колектором.

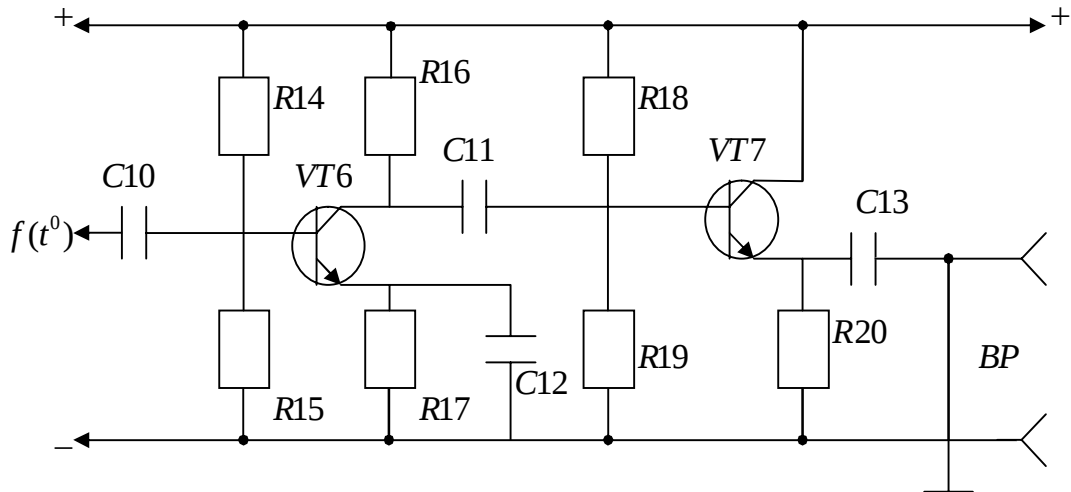


Рисунок 1.28 – Підсилювач

Опис лабораторного макета для дослідження перетворювачів « температура-частота »

Лабораторний макет (рис. 1.29) складається із пристрою п'єзокварцового перетворювача «температура-частота» і стандартного електронно-лічильного частотоміра ЧМ із робочим діапазоном $10-10^6$ Гц (наприклад, ЧЗ-33, ЧЗ-34).

Пристрій містить перетворювач «температура-частота» і термостат Т, у якому перебувають термочутливі кварцові резонатори (ТКР). Підігрів і підтримка температури в термостаті здійснюються відповідно термоелектричним нагрівачем ТЕН і контактним термометром (КТ) із керуючим блоком КБ. Установка необхідних значень температури здійснюється регулятором Р за верхньою шкалою контактного термометра.

На передній панелі стенда розташовані такі елементи: В1 – мережний вимикач; МЗ – мережний запобіжник; Л1 – лампа, що сигналізує про включення пристрою; В2 – вимикач термостата; Л2 – лампа, що сигналізує про включення термостата Т; КТ – контактний термометр із регулятором Р; ВР – вихідний рознімання перетворювачів (рис. 1.30).

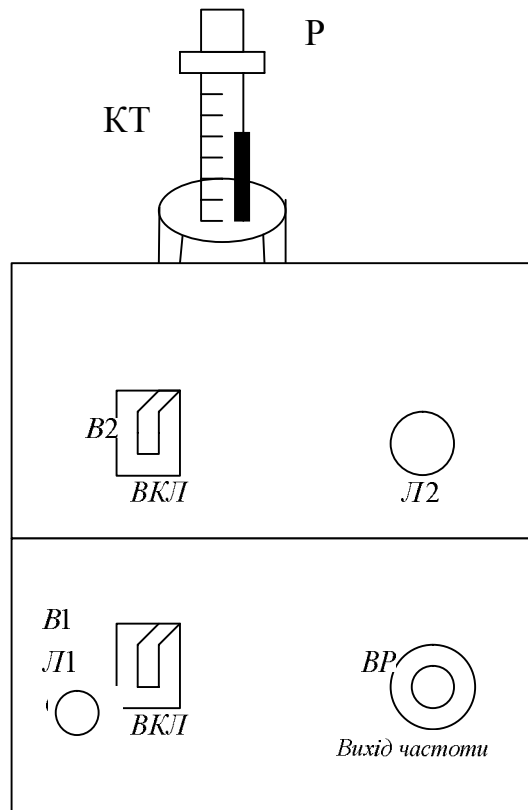


Рисунок 1.29 – Зовнішній вигляд лабораторного макета

Порядок виконання роботи

1. Установити вимикачі В1, В2 і мережний вимикач частотоміра в положення ОТКЛ.
2. Підключити стенд і частотомір до мережі.
3. З'єднати кабелем гніздо ВХІД частотоміра з вихідним розніманням ВР.
4. Вимикач В1 і мережний вимикач частотоміра перевести в положення ВКЛ. При цьому повинні засвітитися лампа Л1 й індикаторна лампа частотоміра.
5. Регулятором Р установити задатчик контактного термометра на поділку 30°C верхньої шкали.
6. Включити термостат, установивши вимикач В2 у положення ВКЛ. При цьому повинна засвітитися сигнальна лампа Л2 і ввімкнутися лампа підсвічування шкали контактного термометра. Коли температура в термостаті досягає значення, установленого на шкалі КТ, відбувається відключення термоелектричного нагрівача термостата й відключення

лампи підсвічування шкали КТ. Протягом 10 – 15 хв після цього в термостаті відбувається стабілізація температури в межах $(30 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$, про що свідчить періодичне миготіння підсвічування КТ приблизно один раз на секунду.

7. Після установки в термостаті температури $(30 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$ прогріти ТКР до одержання стабільної частоти перетворювача (зміна частоти не повинна перевищувати ± 5 Гц) і занести три довільно взятих показання частотоміра (дійсні значення частот перетворювача $f'_d(\theta)$, $f''_d(\theta)$, $f'''_d(\theta)$) у табл. 1.22.

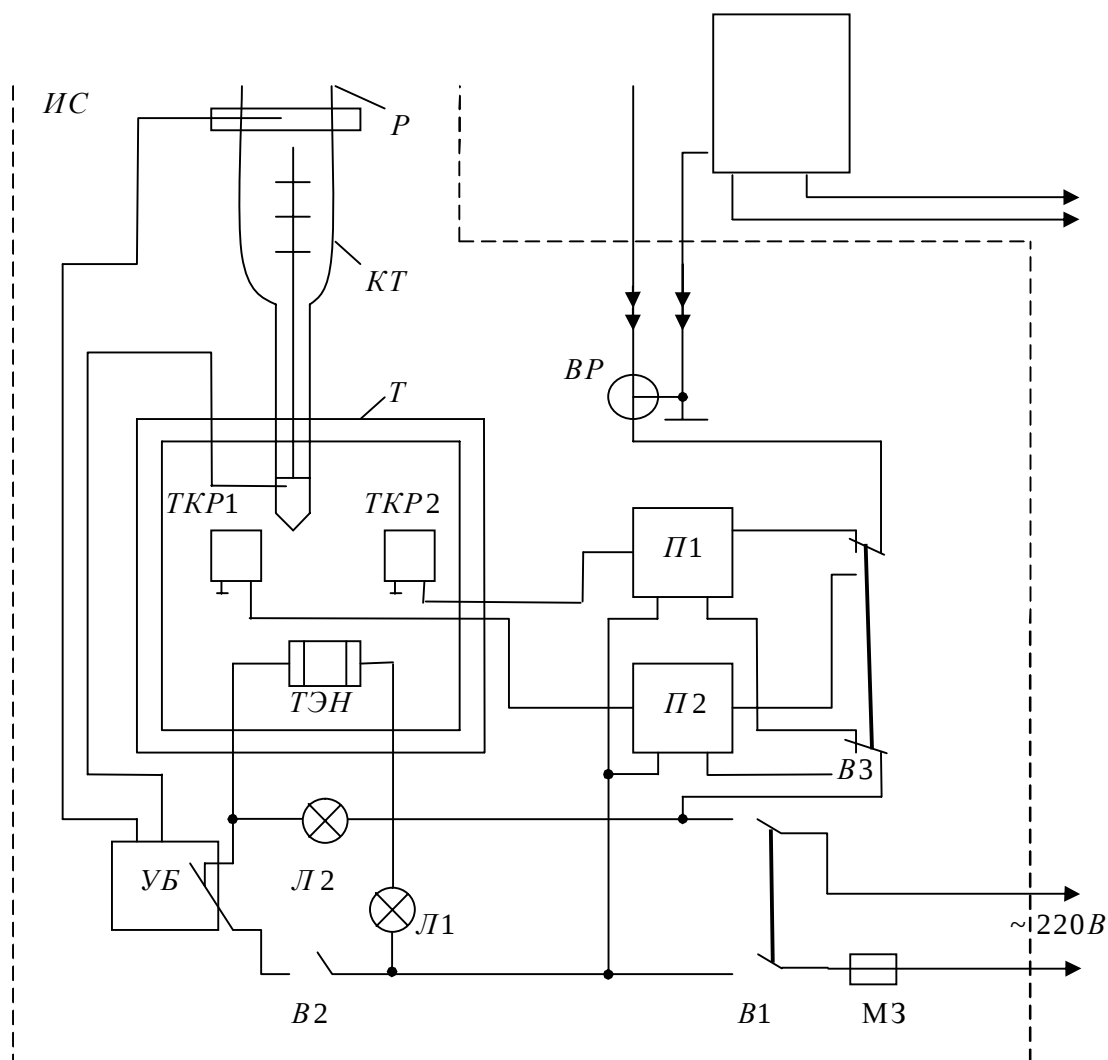


Рисунок 1.30 – Передня панель стенда

Таблиця 1.22 – Дані дослідів

$\theta, ^\circ\text{C}$	30	40	50	60	70	80	90	100
$f'_d(\theta), \text{Гц}$								
$f''_d(\theta), \text{Гц}$								
$f'''_d(\theta), \text{Гц}$								
$\bar{f}_d(\theta), \text{Гц}$								

8. Визначити й занести в табл.1.20 середнє значення частоти перетворювача при температурі 30 °С:

$$\bar{f}_d(30) = \frac{1}{3} [f'_d(30) + f''_d(30) + f'''_d(30)].$$

9. Регулятором Р послідовно встановити на шкалі контактного термометра інші значення температур, зазначені в табл.1.20. Для кожної із цих температур за методикою, наведеною в пунктах 6,7,8, визначити й занести в табл.1.22 значення частот $f'_d(\theta)$, $f''_d(\theta)$, $f'''_d(\theta)$ і $\bar{f}_d(\theta)$. Значення $\bar{f}_d(\theta)$ занести також у табл.1.23.

10. Визначити рівняння градууювальної характеристики перетворювача за отриманим значенням $f_d(\theta)$. Це рівняння являє собою лінійну функцію, визначену за вісьмома ($n=8$) значеннями $\bar{f}_d(\theta)$, і відповідно до методу найменших квадратів, має такий вигляд:

$$f_r(\theta) = f_r(\theta_0) + S \cdot \theta = \bar{f}_d - S(\bar{\theta} - \theta),$$

де $\bar{f}_d = \frac{1}{8} [\bar{f}_d(30) + \bar{f}_d(40) + \dots + \bar{f}_d(100)]$ – середнє значення частоти, Гц;

$\bar{\theta} = \frac{1}{2} [100 + 30] = 65 ^\circ\text{C}$ – середнє значення температури;

$$S = \left\{ \bar{f}_d(70) - \bar{f}_d(60) + 3[\bar{f}_d(80) - \bar{f}_d(50)] + 5[\bar{f}_d(90) - \bar{f}_d(40)] + 7[\bar{f}_d(100) - \bar{f}_d(30)] \right\}$$

$6[n(n^2 + 1)\Delta\theta]^{-1}$ – чутливість перетворювача, Гц/°С;

$\Delta\theta = 10^\circ\text{C}$ – крок за шкалою температур;

$f_r(\theta) = \overline{f_d} - S \cdot \overline{\theta}$ – значення вихідної частоти перетворювача при температурі 0°C .

Таблиця 1.23 – Результати розрахунків

$\theta, ^\circ\text{C}$	0	30	40	50	60	70	80	90	100
$\overline{f_d}(\theta), \text{Гц}$									
$f_r(\theta), \text{Гц}$									
$\gamma, \%$									
$\sigma, ^\circ\text{C}^{-1}$									

11. Підставляючи в рівняння градуювальної характеристики значення температур, наведені в табл. 1.23, визначити й занести в таблицю градуювальні значення частот $f_r(\theta)$, що відповідають цим температурам. За отриманими значеннями $f_r(\theta)$ і $\overline{f_d}(\theta)$ визначити й занести в табл. 23 значення відносних похибок перетворення для кожної температурної точки

$$\gamma_r = \frac{f_d(\theta) - f_r(\theta)}{f_r(100) - f_r(30)} \cdot 100\%.$$

12. За рівнянням (1.37) визначити й занести в табл.1.21 значення температурного коефіцієнта частоти σ для ТК досліджуваного перетворювача, знаючи, що частота опорного генератора $f_2 = 14 \cdot 10^6$ Гц.

13. За даними табл.1.23 побудувати градуювальну $f_r(\theta)$ й дійсну $f_d(\theta)$ характеристики досліджуваного перетворювача (рис. 1.31).

У звіті навести схему досліджуваного перетворювача (рис. 1.25), табл.1.22 і табл.1.23, рівняння градуювальної характеристики, значення чутливості S і найбільшої похибки $\gamma_{\text{пм}}$ перетворювача.

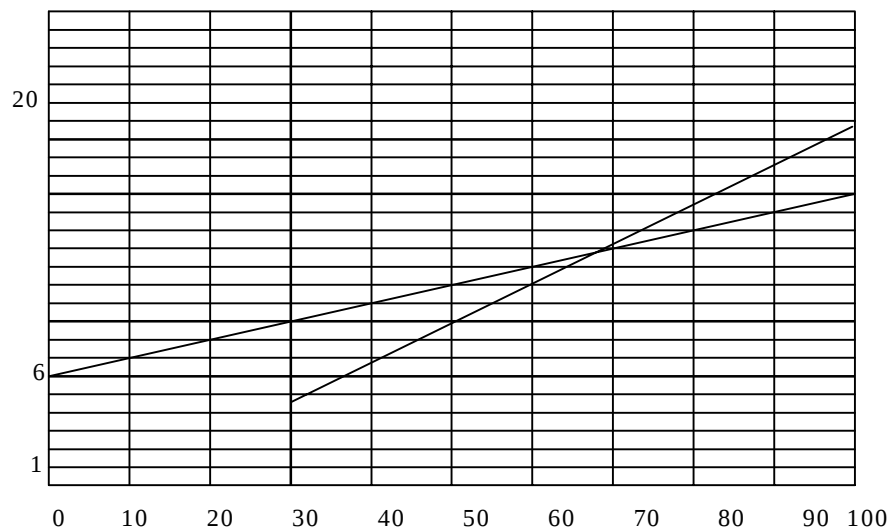


Рисунок 1.31 - Характеристика досліджуваного перетворювача

Контрольні запитання

1. Принцип дії, будова й основні характеристики п'єзокварцових перетворювачів "температура-частота".
2. Основні типи термочутливих кварцових резонаторів, їхні характеристики й будова.
3. Основні вимоги до вимірювального й опорного генераторів, їхньої схеми.
4. Призначення й будова змішувача частот, фільтра низьких частот і підсилювача.
5. Будова установки для дослідження перетворювачів "температура-частота". Рівняння градуювальної характеристики досліджуваного перетворювача. Послідовність визначення цієї характеристики на установці.
6. Визначення чутливості досліджуваного перетворювача. Причини відхилення дійсної характеристики від градуювальної. Визначення похибки перетворювача й температурного коефіцієнта частоти ТКР.

Лабораторна робота № 8

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕНЗОРЕЗИСТОРНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

Мета роботи: ознайомлення із принципом дії й будовою установки з балкою рівного опору для тарування тензорезисторів, дослідження серії тензорезисторів, набуття навичок тарування й визначення основних характеристик тензорезисторів.

Загальні відомості

Підготовка промислових тензорезисторів до експлуатації містить у собі їхню перевірку й сортування за опором і коефіцієнтом тензочутливості.

Визначення цих параметрів виконується вибірково для 3-5 % від загальної кількості тензорезисторів однієї серії. Результати поширюються на всю серію тензорезисторів одного опору й ідентичної технології виготовлення. Це робиться тому, що навіть в одній серії тензорезисторів їхні характеристики, такі як значення опору й коефіцієнта тензочутливості, можуть мати істотні розходження.

У промислових установках для визначення цих характеристик використовуються тарувальні установки із пружними балками рівного перетину, на яких закріплюються досліджувані тензорезистори [1,2]. Недоліком таких установок є залежність деформації балки, а отже й тензорезистора, від вибору місця робочої точки на поверхні балки. Оскільки габарити (база) більшості тензорезисторів становлять 5-30 мм, їхня деформація при закріпленні на балці рівного перетину нерівномірна, що призводить до більших похибок вимірювання опору й коефіцієнта тензочутливості.

Електрична схема (рис. 1.32) дозволяє визначити й зіставити зміну опорів тензорезисторів за допомогою цифрового процентного омметра (ЦО) типу Щ 30-04.1 з похибкою вимірювання $\pm 0,2 \%$ і досліджувати найпоширеніші чверть-, полу- й повномостові схеми включення тензорезисторів за допомогою цифрового вольтметра (ЦВ) типу Щ1516 з похибкою вимірювання $\pm 0,1/0,5 \%$. До схеми входять: постійні

високоточні резистори $R1-R4$ типу 35-5 В с номінальним опором 200 Ом і похибкою $\pm 0,2 \%$; стабілізоване джерело живлення – ДЖ з постійною напругою ($5,0 \pm 0,5$) В; інструментальний підсилювач – ІП. Резистори $R1-R4$ і досліджувані тензорезистори $R5-R8$, залежно від режиму роботи, підключаються до схеми за допомогою перемикачів $S1-S4$.

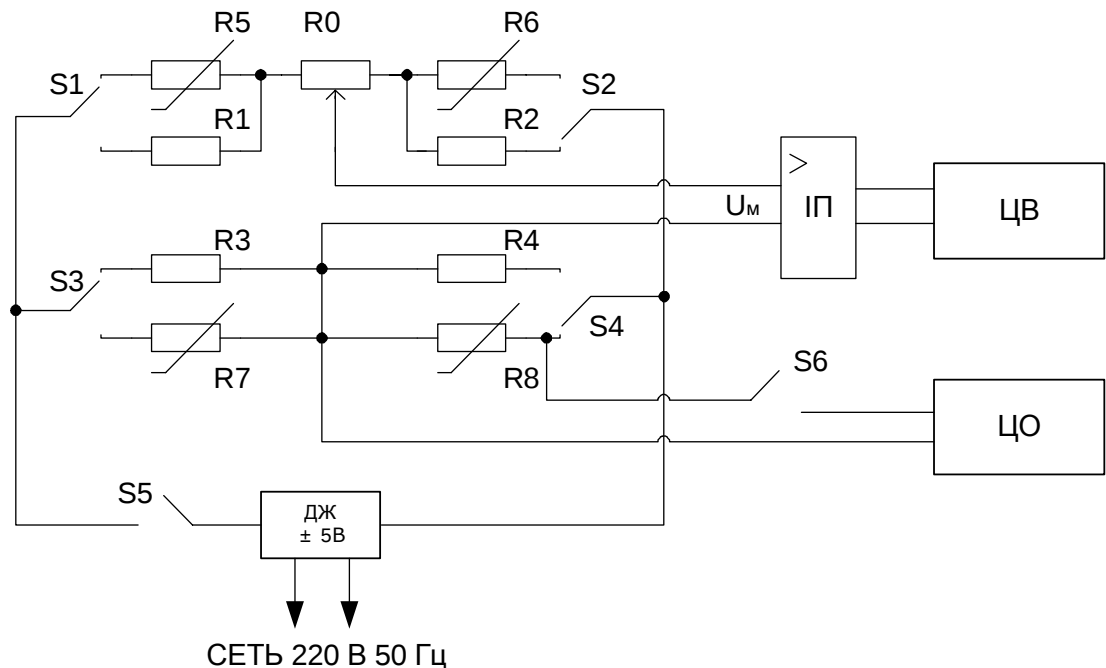


Рисунок 1.32 – Електрична схема тарувальної установки

Як об'єкт дослідження використовується тарувальна установка з балкою рівного опору, пружна деформація якої при прогині вільного кінця однакова в будь-якій точці її поверхні. Установка, схематичне зображення якої наведене на рис. 1.33, складається з таких елементів: консольної балки рівного опору – 1, на поверхні якої закріплені досліджувані тензорезистори – 2. Деформація балки, а отже й тензорезистора, здійснюється за допомогою мікрометричного гвинта – 3. Для вимірювання переміщення кінця балки в діапазоні ± 5 мм використовується індикатор – 4 годинникового типу із ціною поділки 0,1 мм.

Змінюючи положення перемикачів, можна одержати різні схеми включення, наприклад чвертьмостову. Балансування схеми здійснюється за допомогою реохорда $R0$.

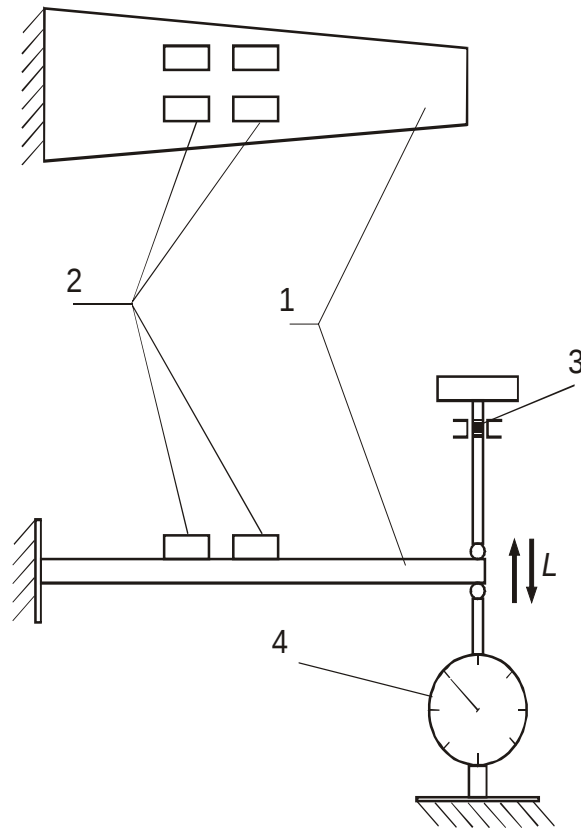


Рисунок 1.33 – Механічна схема тарувальної установки

Відомо [3, 4], що деформація поверхні балки рівного опору ε_b , а отже й тензорезистора ε_R , пов'язана з переміщенням вільного кінця балки в такий спосіб

$$\varepsilon_b = h \cdot a^2 \cdot l,$$

де товщина балки $h = 3$ мм; довжина балки $a = 200$ мм; переміщення вільного кінця балки $l = (0 - 5)$ мм. Напруга U_m у вимірювальній діагоналі моста вимірюється вольтметром і може бути визначена за формулою:

$$U_m \approx U_p \cdot 4^{-1} \cdot k \cdot \varepsilon_b = U_p \cdot 4^{-1} \cdot \varepsilon_R, \quad (1.38)$$

де $U_p = 5\text{В}$ – напруга живлення моста,

ε_R – відносна зміна опору тензорезистора.

Із цього виразу можуть бути визначені ε_R й k . Для визначення дійсних значень цих величин необхідно зробити 5-10 аналогічних вимірювань і знайти середні арифметичні значення (наприклад $\bar{\varepsilon}_R$).

Обчислення похибки результатів вимірювань значень ε_R і k , викликані розкидом тензочутливості тензорезисторів усередині серії, здійснюється шляхом математичної обробки отриманих значень із використанням залежності:

$$S = 0,6745 \cdot \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n \sigma_i^2\right) (n \cdot (n-1))^{-1} \cdot \varepsilon_R^{-1}} \cdot 100 \%, \quad (1.39)$$

де S – похибка результату вимірювання для тензорезисторів даної серії;
 $\sigma = \bar{\varepsilon}_R - \varepsilon_i$ – залишкова похибка.

Похибка S є критерієм придатності тензорезисторів для вимірювань, у кращих зразків фольгових датчиків вона не перевищує 0,2 %. Серія тензорезисторів, у яких S перевищує 0,5 – 1 %, розглядається як непридатна для практичних цілей.

Підбір пар тензорезисторів для мостових вимірювальних схем можна здійснити також, включивши два закріплені на поверхні балки тензорезистори, наприклад R_5, R_7 . Після попереднього балансування моста й деформації тензорезисторів шляхом переміщення кінця вимірювальної балки в діапазоні 0-5 мм, через кожні 0,5 мм, визначити, за показниками цифрового вольтметра, максимальне значення напруги $U_{\text{мм}}$ розбалансу моста. За значенням $U_{\text{мм}}$ визначають відповідно до формул (1.38), (1.39) різницю коефіцієнтів тензочутливості й різницю зміни опорів досліджуваних тензорезисторів. У випадку повної ідентичності цих характеристик тензорезисторів напруга розбалансу моста повинна дорівнювати нулю.

Усі ці операції здійснюються в тому випадку, якщо тензорезистори використовуються безпосередньо для вимірювання лінійної деформації. Якщо вони виконують роль чутливих елементів у складі датчиків для вимірювання, наприклад, тиску, вібрації, прискорення, то перед

використанням необхідно зробити тільки їхню перевірку за номінальним опором і його зміною при деформації за допомогою цифрового омметра.

Розкид значень коефіцієнтів тензочутливості усередині серії тензорезисторів не позначиться на точності вимірювань, тому що в цьому випадку є пряма залежність між імітованою фізичною величиною (тиском, переміщенням і т.д.) і збільшенням опору тензочутливого елемента. Розходження в коефіцієнті тензочутливості враховується й входить у тарувальний коефіцієнт.

За допомогою розглянутої установки можуть бути визначені також параметри інших типів тензорезисторів (дротових, напівпровідникових) і досліджені характеристики їхніх вимірювальних схем.

Дослід 1. Порядок виконання дослідів

1. Включити іспитовий стенд і цифровий вольтметр (ЦВ) у мережу.
2. Зібрати схему повного моста (рис. 1.33)
3. Реостат встановити в нульове положення.
4. Встановити нульове значення на ЦВ.
5. Включити міст у схему, натиснувши кнопку «Мережа», утримуючи її натиснутою, збалансувати міст, для чого необхідно обернути реостат.
6. Обертаючи ручку, механічно з'єднану зі штоком, що переміщає вільний кінець балки, перемістити вільний кінець балки на 0,5 мм, що буде відзначено на мікрометрі.
7. Нажати кнопку «Мережа», утримуючи її зняти три показання зі шкали ЦВ. Для цього на панелі ЦВ перемикач перевести в стан ручного вимірювання і, нажавши і відпустивши кнопку КЗ зробити зняття показань; потім перемикач повернути в положення автоматичного виміру.
8. Аналогічно пунктам 6 і 7 виконати вимірювання для діапазону 0–3,5 мм через кожні 0,5 мм, отримані дані занести в табл. 1.24.

Таблиця 1.24 – Результати дослідів

	0	1	2	3	4	5	6	7
$l, \text{ мм}$	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
$U_1, \text{ В}$								
$U_2, \text{ В}$								
$U_3, \text{ В}$								
$\bar{U}, \text{ В}$								

Визначити й занести в табл. 1.24 середні значення напруги за формулою

$$\bar{U} = \frac{1}{3}[U_1 + U_2 + U_3] \quad (1.40)$$

Визначити рівняння градувальної характеристики перетворювача $U = f(l)$ за отриманими значеннями. Це рівняння являє собою лінійну функцію, визначену за вісьмома ($n = 8$) значеннями $\bar{U}$. Відповідно до методу найменших квадратів воно має вигляд:

$$U_r(l) = U_r(l_0) + S \cdot l = \bar{\bar{U}}_d - S \cdot (\bar{l} - 1), \quad (1.41),$$

де $\bar{\bar{U}}_d = \frac{1}{8}[\bar{U}_d(5) + \bar{U}_d(1) + \dots + \bar{U}_d(7)]$ – середні значення U ;

$\bar{l} = \frac{1}{2}[3,5 + 0] = 1,75$ – середні значення деформації;

Δl – крок за шкалою мікрометра;

$U_r(l) = \bar{\bar{U}}_d - S \cdot \bar{l}$ – значення вихідної напруги перетворювача при $l = 0$ мм;

$S = [\bar{U}_d(4) - \bar{U}_d(3) + 3 \cdot [\bar{U}_d(5) - \bar{U}_d(2)] + 5 \cdot [\bar{U}_d(6) - \bar{U}_d(1)] + 7 \cdot [\bar{U}_d(7) - \bar{U}_d(0)]] \cdot 6 \cdot [n(n^2 + 1) \cdot \Delta l]$
– чутливість перетворювача, В/мм.

Таблиця 1.25 – Результати дослідів

$l, \text{ мм}$	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
$\bar{U}_d(l), \text{ В}$								
$U_r(l), \text{ В}$								
$\gamma_r, \%$			0					

Підставляючи в рівняння градуовальної характеристики значення деформації, наведені в табл. 1.25, визначити й занести в цю таблицю градуовальні значення напруг $U_{\Gamma}(l)$, що відповідають цим деформаціям. За отриманими значеннями $U_{\Gamma}(l)$ і $\bar{U}_d(l)$ визначити й занести в табл. 1.25 значення відносних похибок перетворювача для кожної точки деформації.

$$\gamma_{\Gamma} = \frac{U_{\Gamma}(l) - \bar{U}_d(l)}{U_{\Gamma}(3,5) - U_{\Gamma}(0)} \cdot 100 \%,$$

де $U_{\Gamma}(l)$ – значення вихідної частоти перетворювача, отримане з рівняння (1.41).

$\bar{U}_d(l)$ – дійсне значення вихідної напруги перетворювача, отримане з експериментальних даних.

$U_{\Gamma}(l_n)$, $U_{\Gamma}(l_k)$ – вихідна напруга перетворювача, що відповідає початковому l_n й кінцевому l_k значенням вимірюваної деформації.

Зміст звіту

Механічна схема тарувальної установки (с. 1.32); електрична схема установки (рис. 1.33); таблиці експериментальних даних (табл. 1.24, 1.25).

Контрольні запитання

1. Призначення й принцип дії установки для тарування тензорезисторів.
2. Конструкція й електрична схема тарувальної установки.
3. Пояснити принцип дії тензорезисторів.
4. Пояснити причини виникнення похибок тензорезисторів.
5. Електрична схема установки.
6. Порядок перевірки тензорезисторів.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аналоговые и цифровые микросхемы. Справочное пособие / под ред. С. В. Якубовского. Изд. 2-е. – М : Радио и связь, 1984.
2. Ацюковский В. А. Емкостные преобразователи перемещения / В. А. Ацюковский. – М. : Энергия, 1966.
3. Белевцев А. Т. Потенциометры / А. Т. Белевцев. – М. : Машиностроение, 1968. – 328 с.
4. Бухгольц В. П. Емкостные преобразователи системах автоматического контроля и управления / В. П. Бухгольц, Э. Г. Тисевич. – М. : Энергия, 1972. – 80 с.
5. Виглеб Г. Датчики / Г. Виглеб. – М. : Мир, 1989. – 234 с.
6. Гутников В. С. Интегральная электроника в измерительных устройствах. Изд. 2-е. / В. С. Гутников. – Л. : Энергоатомиздат, 1988. – 307 с.
7. Измерение в промышленности. Справочник / под ред. П. Профоса. – М. : Металлургия, 1990.
8. Источники электропитания на полупроводниковых приборах. Проектирование и расчет / под ред. С. Д. Додика и Е. И. Гальперина. – М. : Сов. радио, 1969. – 448 с.
9. Левшина Е. С. Электрические измерения физических величин (измерительные преобразователи) / Е. С. Левшина, П. В. Новицкий. – Л. : Энергоатомиздат, 1983. – 320 с.
10. Методы практического конструирования при нормировании сигналов с датчиков. – ЗАО АВТЭКС. – М. : –<http://www.autex.ru>.
11. Методы практического конструирования при нормировании сигналов с датчиков. – АВТЭКС. – Санкт-Петербург. – <http://www.autexspb.da.ru>.
12. Охрименко В. Электронные компоненты и системы / В. Охрименко // Интерфейс, 2000. – № 1. – С. 5–8.
13. Охрименко В. Электронные компоненты и системы / В. Охрименко // Микропроцессоры – интеллектуальные АЦП и ЦАП. – 2000. – № 1. – С. 9–11.
14. Полищук Е. С. Измерительные преобразователи / Е. С. Полищук. –

К. : Вища школа, 1981. – 296 с.

15. Преображенский В. П. Технологические измерения и приборы / В. П. Преображенский. – М. : Энергия, 1978. – 704 с.

16. Проектирование датчиков для измерения механических величин / под ред. Е. П. Осадчего. – М. : Машиностроение, 1979. – 480 с.

17. Резисторы. Справочник / Ю. Н. Андреев, А. И. Антонян, Д. М. Иванов и др. / под ред. И. И. Четверкова. – М. : Энергоиздат, 1981.

18. Справочник по электрическим конденсаторам / М. Н. Дьяконов, В. И. Карабанов, В. И. Присняков и др. / под ред. И. И. Четверкова и В. Ф. Смирнова. – М. : Радио и связь, 1983.

19. Температурные измерения. Справочник / О. А. Теращенко, А. Н. Гордов, А. К. Ерёмина и др. – К. : Наукова думка, 1987. – 704 с.

20. Форейт П. Емкостные датчики неэлектрических величин / П. Форейт. – М. : Энергия, 1966.

21. Функциональные устройства на микросхемах / под ред. В. З. Найдерова. – М. : Радио и связь, 1985. – 200 с.

22. Храмов А. В. Первинні вимірювальні перетворювачі приладів і автоматичних систем / А. В. Храмов. – К. : Вища школа, 1998. – 220 с.

23. Четверков И. И. Потенциометры / И. И. Четверков. – М. : Сов. радио, 1978. – 64 с.

24. Шило В. Л. Популярные цифровые микросхемы. Справочник / В. Л. Шило. – М. : Радио и связь, 1987. – 352 с.

25. Шило В. Л. Функциональные аналоговые интегральные микросхемы / В. Л. Шило – М.: Радио и связь, 1982. – 128 с.

26. Электрические измерения неэлектрических величин. Изд. 5-е, перераб. и доп. / под ред. П. В. Новицкого. – Л. : Энергия, 1975. – 576 с.

27. Электрическое измерение электрических и неэлектрических величин / под ред. Е. С. Полищука. – К. : Вища школа, 1984. – 359 с.

Навчальне видання

ЗАСОБИ ВИМІРЮВАННЯ НЕЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН

ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

з курсу

«ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ТЕХНІЧНІ ВИМІРЮВАННЯ»

для студентів спеціальності 6.051001
«Метрологія та інформаційно-вимірювальні технології»
денної та заочної форм навчання

Укладачі: ГУСЕЛЬНІКОВ Віктор Кузьмич
ГРИГОРЕНКО Ігор Володимирович
ТВЕРИТНИКОВА Олена Євгенівна
МЕДВЕДЄВА Людмила Олександрівна
ГУСЕЛЬНІКОВ Олексій Вікторович

Відповідальний за випуск С. І. Кондрашов
Роботу до видання рекомендував О. І. Рогачов

В авторській редакції

План 2011 р., поз. 10/

Підп. до друку . .11 Формат 60x84 1/16. Папір офсет.
Riso-друк. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 5,3. Обл.-вид. арк. 5,6.
Наклад 100 прим. Зам. № . Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ «ХПІ». 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК №3657 від 24.12.2009 р.

Друкарня НТУ «ХПІ», 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21