

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/152.00.1/Б/ОК16- 2022
	Екземпляр № 1	Арк 64/ 1

**ЗАТВЕРДЖЕНО**  
Науково-методичною  
радою  
Державного університету  
«Житомирська політехніка»  
протокол від 16 грудня  
2022 р.  
№ 13

**МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ**  
**для проведення лабораторних робіт**  
**з навчальної дисципліни**  
**«ВИМІРЮВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ»**

для здобувачів вищої освіти освітнього ступеня «бакалавр»  
спеціальності 152 «Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка»  
освітньо-професійна програма «Комп'ютеризовані інформаційно-  
вимірвальні системи»  
факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій, мехатроніки і  
робототехніки

кафедра метрології та інформаційно-вимірвальної техніки

Рекомендовано на засіданні  
кафедри метрології та  
інформаційно-вимірвальної  
техніки  
30 серпня 2022р., протокол № 8

Укладачі: к.т.н., доцент кафедри метрології та інформаційно-  
вимірвальної техніки ЧЕПЮК Ларіна, старший викладач кафедри  
метрології та інформаційно-вимірвальної техніки ОМЕЛЬЧУК Ігор

Житомир  
2022

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/152.00.1/Б/ОК16- 2022
	<i>Екземпляр № 1</i>	<i>Арк 64 / 2</i>

Методичні рекомендації до до лабораторних робіт з дисципліни «ВИМІРЮВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ» для студентів спеціальності 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»/ Укладачі Л.О. Чепюк, І.А. Омельчук. – Житомир: ДУ «Житомирська політехніка», 2022. – 48 с.

Укладачі: Л.О. Чепюк, І.А. Омельчук

Рецензенти:

к.т.н., доцент, зав. кафедри робототехніки, електроенергетики та автоматизації ім. проф. Б.Б. Самотокіна Ткачук А.Г.,

к.т.н., доцент кафедри робототехніки, електроенергетики та автоматизації ім. проф. Б.Б. Самотокіна Добржанський О.О.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/152.00.1/Б/ОК16- 2022
	Екземпляр № 1	Арк 64 / 3

## ЗМІСТ

№ з/п	Назва теми	Стор.
1	Дослідження діляника напруг і мосту Уїтстона	4
2	Дослідження реостатних і потенціометричних вимірювальних перетворювачів	9
3	Дослідження тензорезисторних перетворювачів	16
4	Дослідження п'єзоелектричного вимірювального перетворювача	25
5	Дослідження ємнісного вимірювального перетворювача	30
6	Дослідження електромагнітного вимірювального перетворювача	36
7	Дослідження терморезистивних перетворювачів	42
8	Дослідження термоелектричних перетворювачів	46
9	Дослідження індуктивних перетворювачів	53
10	Дослідження перетворювача переміщення	56
11	Дослідження оптичного перетворювача	56
12	Дослідження кондуктометричного перетворювача	64

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/152.00.1/Б/ОК16- 2022
	Екземпляр № 1	Арк 64 / 4

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

**Тема:** дослідження дільника напруг і мосту Уїтстона

**Технічне забезпечення:** ПЕОМ, програма EWB 4.0, або аналогічна.

### Короткі теоретичні відомості

Важливим класом пристроїв, призначених для вимірювання параметрів електричних ланцюгів (опору, ємності, індуктивності й ін.) методом порівняння, є мости. Порівняння вимірюваної величини зі зразковою мірою, що виробляється в процесі вимірювання за допомогою моста, може здійснюватися вручну або автоматично, на постійному, або на змінному струмі. У найпростішому випадку мостова схема містить чотири резистори, з'єднаних у кільцевий замкнутий контур. Таку схему має одинарний міст постійного струму (рисунк 1.1). Резистори  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  і  $R_4$  цього контура називаються плечами моста, а точки з'єднання сусідніх плечей вершинами моста. Ланцюги, що з'єднують протилежні вершини, називають діагоналями. Одна з діагоналей (3-4) містить джерело живлення  $GB$ , а інша (1-2) — показчик рівноваги  $PG$ .

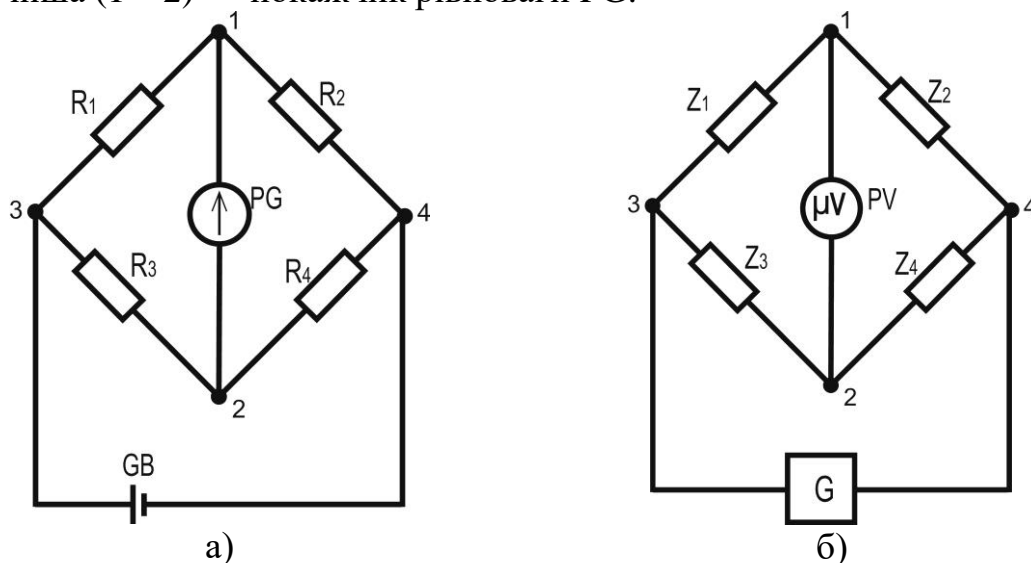


Рисунок 1.1 – Вимірювальний міст

а) вимірювальний міст постійного струму

б) узагальнений випадок вимірювального моста

У випадку моста змінного струму його плечі можуть містити в собі не тільки резистори, але також конденсатори і котушки індуктивності, тобто опори можуть мати комплексний характер.

Міст називається урівноваженим, якщо різниця потенціалів між точками 1 і 2 дорівнює нулю, тобто напруга на діагоналі, що містить індикатор нуля, відсутня і струм через індикатор дорівнює нулю.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/152.00.1/Б/ОК16- 2022
	Екземпляр № 1	Арк 64 / 5

Співвідношення між опорами пліч, при якому міст урівноважений, називається умовою рівноваги моста. Цю умову можна одержати, використовуючи закони Кірхгофа для розрахунку мостової схеми. Наприклад, для одинарного моста постійного струму залежність протікаючого через індикатор нуля (гальванометр) РG струму  $I_G$  від опорів пліч, опору гальванометра  $R_G$  і напруги живлення  $U$  має вигляд

$$I_G = \frac{U(R_1R_4 - R_2R_3)}{R_G(R_1 + R_2)(R_3 + R_4) + R_1R_2(R_3 + R_4) + R_3R_4(R_1 + R_2)} \quad (1.1)$$

Струм  $I_G = 0$  при

$$R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3 \quad (1.2)$$

Це і є умова рівноваги одинарного моста постійного струму, яку можна сформулювати в такий спосіб: для того щоб міст був урівноважений, добутки опорів протилежних пліч повинні бути рівні. Якщо опір одного з пліч невідомий (наприклад,  $R_1 = R_x$ ), то умова (1.2) буде мати вид

$$R_x = \frac{R_2R_3}{R_4}$$

Таким чином, вимірювання за допомогою одинарного моста можна розглядати як порівняння невідомого опору  $R_x$  зі зразковим опором  $R_2$  при збереженні незмінним відношенням  $\frac{R_3}{R_4}$ . З цієї причини плече  $R_2$  називають плечем порівняння, плечі  $R_3$  і  $R_4$  плечами відношення.

Одинарні мости можуть також працювати на змінному струмі. У цьому випадку опори пліч є комплексними. Узагальнена схема моста перемінного струму представлена на рис. 1.1(б). Індикатором нуля звичайно служить електронний мілівольтметр. Можливим є, також, використання електронного індикатора нуля на базі електронно-променевої трубки. Електронні індикатори мають дуже великий вхідний опір, що вигідно відрізняє їх від електромеханічних пристроїв, таких як вібраційний гальванометр або телефонні навушники, що теж іноді використовуються як індикатори нуля.

Аналогічно співвідношенню (1.2) умова рівноваги одинарного моста перемінного струму має вигляд

$$\underline{Z}_1 \underline{Z}_4 = \underline{Z}_2 \underline{Z}_3, \quad (1.3)$$

де  $\underline{Z}_1, \underline{Z}_2, \underline{Z}_3$  і  $\underline{Z}_4$  — комплексні опори пліч.

Як відомо, будь-яке комплексне число  $\underline{Z}$  можна представити в показовій формі:  $\underline{Z} = ze^{j\varphi}$ . Використовуючи це представлення, одержимо замість умови (1.3) рівність

$$z_1 e^{j\varphi_1} z_4 e^{j\varphi_4} = z_2 e^{j\varphi_2} z_3 e^{j\varphi_3}, \quad (1.4)$$

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/152.00.1/Б/ОК16- 2022
	Екземпляр № 1	Арк 64 / 6

яка справедлива тільки в тому випадку, якщо виконуються співвідношення, що впливають з неї:

$$z_1 z_4 = z_2 z_3 \quad (1.5)$$

$$\varphi_1 + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3 \quad (1.6)$$

Умова (1.5), що вимагає рівності добутків модулів комплексних опорів протилежних пліч, доповнюється умовою (1.6), що накладає вимогу рівності сум їхніх аргументів. Тільки одночасне виконання співвідношень (1.5) і (1.6) забезпечує рівність нулю напруги на діагоналі 1—2, у яку включений індикатор нуля  $PV$  (рис. 1.1).

Умови рівноваги можна записати інакше, якщо скористатися не показовою, а алгебраїчною формою представлення комплексних чисел  $\underline{Z} = R + jX$ , де  $R$  і  $X$  — дійсна і уявна частини відповідно. У нашому випадку символом  $\underline{Z}$  позначений комплексний опір, а  $R$  і  $X$  являють собою активну і реактивну складові. В алгебраїчній формі умова (1.3) перепишеться у вигляді

$$(R_1 + jX_1)(R_4 + jX_4) = (R_2 + jX_2)(R_3 + jX_3) \quad (1.7)$$

Ця рівність виконується, якщо справедливі рівності для активних і реактивних частин:

$$R_1 R_4 - X_1 X_4 = R_2 R_3 - X_2 X_3 \quad (1.8)$$

і

$$R_1 X_4 + R_4 X_1 = R_2 X_3 + R_3 X_2 \quad (1.9)$$

Знову потрібно одночасне виконання співвідношень (1.8) і (1.9).

Дві пари рівностей (1.5), (1.6) і (1.8), (1.9) цілком рівноправні, і вибір того чи іншого визначається розуміннями зручності при розрахунках конкретних мостових схем. Щоб забезпечити виконання двох умов одночасно, необхідно мати не менше двох регульованих елементів. Ними найчастіше є резистори і конденсатори, оскільки вони допускають більш точне регулювання, ніж котушки індуктивності. На практиці важливо, щоб міст можна було швидко, з найменшим числом елементарних операцій з регулювання, зрівноважити. Число таких операцій, необхідних для досягнення рівноваги, характеризує "збіжність" моста. Правильний вибір регульованих елементів і їхнього положення в плечах моста забезпечує найкращу збіжність, а отже, і найменший час вимірювання.

Відповідно до загального визначення чутливості електровимірювальних приладів, чутливість моста визначається як відношення зміни сигналу на його виході (струму, напруги, потужності) до вимірюваної величини, що викликала зміну, (опору, ємності й ін.), тобто

$$S = \frac{dY}{dX}, \quad (1.10)$$

де  $S$  — чутливість;  $Y$  — вихідна величина;  $X$  — вхідна величина.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/152.00.1/Б/ОК16- 2022
	Екземпляр № 1	Арк 64 / 7

Якщо використовувати кінцеві збільшення, то чутливість

$$S \approx \frac{\Delta Y}{\Delta X}, \quad (1.11)$$

причому приріст вхідної величини  $\Delta Y$  повинне бути узятє поблизу рівноваги.

Оскільки складається з мостової схеми та індикатора, то зручно розглядати чутливість моста у виді добутку чутливості мостової схеми та індикатора нуля:  $S = S_{\tilde{n}0} \cdot S_{\tilde{e}1}$ .

У випадку моста постійного струму, коли індикатором служить магнітоелектричний гальванометр, вихідною величиною є відхилення стрілки або світлового покажчика, а вхідний — вимірюваний опір  $R_x = R_1$ . Тоді вираз (1.10) набуває вигляду

$$S = \frac{\Delta \alpha}{\Delta R_1}. \quad (1.12)$$

Чутливість моста можна представити у виді добутку двох величин

$$S = \frac{\Delta \alpha}{\Delta I_G} \cdot \frac{\Delta I_G}{\Delta R_1} = S_G S_{cxI}, \quad (1.13)$$

де  $\Delta I_G$  — струм, що протікає через рамку гальванометра;  $S_G$  — чутливість гальванометра, а  $S_{cxI}$ , — чутливість мостової схеми до струму.

Аналогічно можна визначити чутливість мостової схеми до напруги  $S_{cxU} = \Delta U_G / \Delta R_1$  і до потужності  $S_{cxP} = \Delta P_G / \Delta R_1$ .  $\Delta U_G$  і  $\Delta P_G$ , що входять у ці визначення, є приростами напруги і потужності в ланцюзі гальванометра.

Необхідна чутливість досягається раціональним вибором мостової схеми, індикатора нуля і напруги живлення моста.

### Хід роботи

Скласти схему, аналогічну до наведеної на рисунку 1.3 відповідно до варіанту завдання (таблиця 1.1).

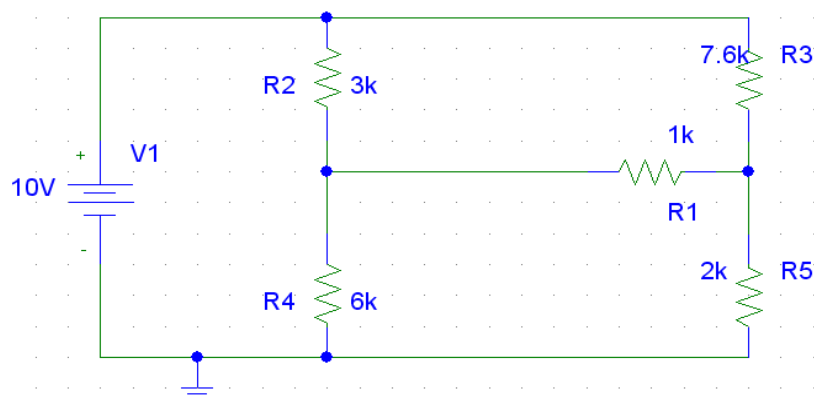


Рисунок 1.2 – Приклад схеми дослідження

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/152.00.1/Б/ОК16- 2022
	Екземпляр № 1	Арк 64 / 8

Знайти таке значення  $R_4$ , при якому схема збалансована. Переконайтесь, за допомогою моделюючої програми, що у збалансованій схемі струм, що проходить через  $R_1$ , рівний нулю.

Зробити звіт.

Таблиця 1.1 – Варіанти завдань

№ варіанту	$R_2$ , кОм	$R_3$ , кОм	$R_5$ , кОм
1	2	7,1	2
2	3	7,2	3
3	4	7,3	2
4	5	7,4	3
5	6	7,5	2
6	7	7,6	3
7	8	7,7	2
8	9	8,1	3
9	0,5	9,1	2

### Контрольні питання.

1 Принцип роботи мостових схем.

2 Умова рівноваги мостів.

3 Чутливість мостів.

4 Автоматичні мости.

5 Похибки мостових схем.

6 Навести приклади застосування мостових схем у вимірювальних перетворювачах.



Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/152.00.1/Б/ОК16- 2022
	Екземпляр № 1	Арк 64 / 9

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2

### Дослідження реостатних і потенціометричних вимірювальних перетворювачів

Мета роботи: вивчити принципи побудови та функціонування резисторних вимірювальних перетворювачів, дослідити електричні схеми потенціометричних датчиків у середовищі Electronics Workbench.

### 1 Короткі відомості з теорії

Потенціометричні датчики виконуються з використанням трьох видів первинних перетворювачів.

Реостатні перетворювачі виконуються у вигляді реостата, рухомий контакт якого переміщається під впливом вимірюваної величини (при включенні такого ПП у ланцюг за схемою потенціометра використовується термін "потенціометричні перетворювачі"). Вихідною величиною ПП є електричний опір, функціонально пов'язане з положенням рухомого контакту при обертальному або лінійному переміщенні. Так як в переміщення можуть бути перетворені багато неелектричних величин (тиск, витрата, рівень та ін), то реостатні перетворювачі дуже часто використовуються також як проміжні перетворювачі неелектричних величин в електричні. У пристроях телеметрії найбільшого поширення знаходять дротяні реостатні та реохордні (безвиткові) ПП, що відрізняються високою точністю та стабільністю функції перетворення, можливістю отримання необхідних функціональних залежностей щодо простими засобами, низькими значеннями перехідного опору, рівня власних шумів та температурного коефіцієнта опору (ТКС). До недоліків ПП відносяться: схильність електроерозії через електричні розряди при русі струмознімач, обмежена швидкість його переміщення і низька зносостійкість, порівняно невисокий опір (до десятків ком), обмежена можливість застосування на змінному струмі (до 1000 Гц) індуктивністю та ємністю обмотки; низька роздільна здатність через дискретний характер зміни опору (виключаючи реохордні).

За конструктивним виконанням реостатні ПП діляться на перетворювачі з поступальним (малюнок 1, а) і обертальним (малюнок 1, б) переміщенням рухомого контакту: останні, крім того, бувають одно- і багатооборотними. Реостатні ПП складаються з висновків 1, 2, 3, каркаса 4, струмознімального контакту 3, ковзного по витках обмотки з високоомного дроту 5 з підвищеною зносо-і корозійною стійкістю (різні сплави платини, іридію, а також манганін, константан, фе ін). Каркас з ізоляційного матеріалу (гетинакс, текстоліт, кераміка або метал, покритий оксидною плівкою) може мати форму стрижня, кільця, вигнутої пластини і повинен зберігати свої розміри в широкому температурному діапазоні (в

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/152.00.1/Б/ОК16- 2022
	Екземпляр № 1	Арк 64 / 10

умовах підвищеної вологості та хімічної забрудненості атмосфери), а також володіти високою теплопровідністю для збільшення розсіюваної ПП потужності. Діаметр обмотувального дроту залежить від точності та номінального опору ПП: 0,01...0,1 мм для датчиків високого класу та 0,1...0,4 мм - низького. Рухомий контакт (щітка, двигун) виготовляються у вигляді двох-трьох паралельних зволікань діаметром 0,1...0,2 мм.

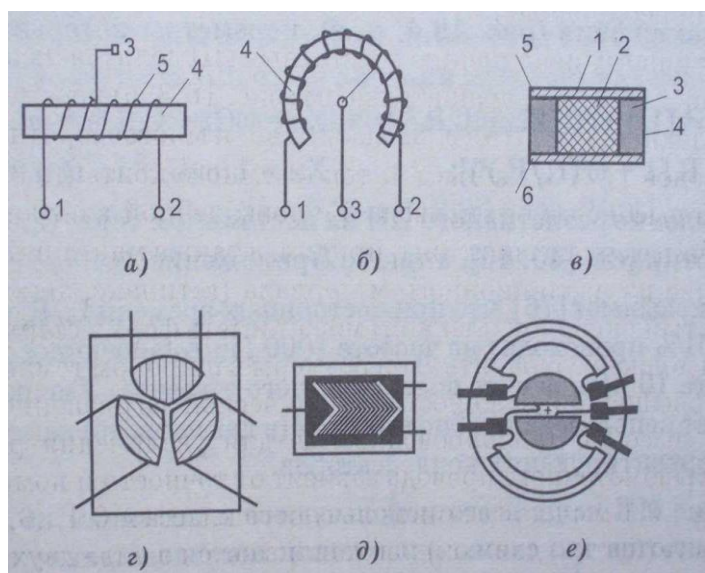


Рис. 1 - конструктивні схеми реостатних ПП (а, б), ПП контактної опору (в) та тензометричних ПП (г, д, е)

Реохордні ПП виконуються у вигляді прямолінійного провідника або одного великого витка з струмознімальним контактом.

Перетворювачі контактної опору засновані на зміні (під дією тиску) опору між провідними елементами, розділеними шарами резистивного матеріалу; ПП такого типу мають великі похибки гістерезису і лінійності (до 10%), але дуже прості за конструкцією і мають високу надійність. ПП виконується у вигляді стовпчика з ряду шарів електропровідного паперу, електропровідної гуми або металевих пластин, на які шляхом напилення наноситься високоомний резистивний шар (або наповнення з вугільного порошку, як у мікрофонах). Як приклад на малюнку 1, показана конструкція ПП для пневморезисторного датчика, що містить два електроди 1 з припаяними до них гнучкими висновками 5, 6 і приклеєним по периметру ізолятором 4 з гуми (3 - шар клею); внутрішній обсяг 2 заповнюється резистивним матеріалом. При зміні тиску від 0 до 106 Па опір ПП змінюється від 100 до 2 ком при деформації чутливого елемента до 50%. Допустима потужність розсіювання становить 0,5 Вт. Аналогічні ПП використовуються в контактних датчиках роботів, маніпуляторів, у

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідас ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/152.00.1/Б/ОК16- 2022
	Екземпляр № 1	Арк 64 / 11

медичних приладах (електростимулятори із зворотним зв'язком по глибині дихання пацієнта).

Різновидом контактних ПП є тензолітові перетворювачі, які виконуються у вигляді смужок, що наклеюються на випробувану деталь і складаються з суміші графіту, сажі, бакелітового лаку та інших компонентів.

Тензолітові ПП застосовуються при вимірі швидкозмінних ударних напруг в деталях, що рухаються, невеликого розміру, при цьому перетворювачі працюють як на розтягування, так і стиск; коефіцієнт чутливості вищий, ніж у тензорезисторів, і становить 15...20.

Тензорезистивні ПП характеризуються коефіцієнтом тензочутливості  $K_T = 1 + 2\mu + \delta\rho/\delta l$ , де  $\mu$  - коефіцієнт Пуассона;  $\delta\rho$  - відносне збільшення питомого опору  $\rho$  при деформації  $\delta l$ . Коефіцієнт тензочутливості для металів, що найчастіше застосовуються для тензорезисторів, близький до двох: для константану 2, для ніхрому 2,2, для хромелю 2,5. Для напівпровідникових матеріалів коефіцієнт тензочутливості набагато більше, ніж у металів (наприклад, для германію він дорівнює  $\sim 100$ ), проте напівпровідникові тензometri характеризуються малою механічною міцністю і істотною нестабільністю характеристик порівняно з металами.

Тензорезистори з металу поділяються на дротяні та виготовляються з фольги. Дротяні виконуються з дроту діаметром 0,002...0,05 мм, який укладають петлями на тонкий папір або лакову плівку з подальшим просоченням клеєм Бф-:2 для роботи в діапазоні температур від -40 до +70 ° С або бакелітовим лаком - при роботі до +200 ° С; для більш високих температур використовують спеціальні клеї та цементи. Тензорезистор наклеюється на поверхню досліджуваної деталі таким чином, щоб його поздовжня вісь (база) була розташована в напрямку вимірюваної деформації деталі, тобто, щоб можливі деформації деталі відбувалися вздовж дротяних петель резистора. Найчастіше використовують ПП з базою 5...20 мм: - вони мають опір 30...500 Ом, номінальний робочий струм, який визначається умовами тепловідведення, - в межах десятків міліампер та максимально допустимі відносні деформації - не більше 0,3 %.

Оскільки зміна опору тензорезисторів, викликане деформацією, незначно, і коливається від одиниць міліом до декількох десятків часток Ома, то для вимірювань застосовують високочутливі потенціо-метричні та мостові схеми. Для підвищення чутливості тензорезистори включають два і навіть чотири плечі мостової схеми. Нелінійність статичної характеристики дротяних тензорезисторів у межах пружної деформації не перевищує 0,1%.

Тензорезистори з фольги більш досконалі, ніж дротяні. Вони мають решітку з тонких смужок фольги прямокутного перерізу товщиною 4...12

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/152.00.1/Б/ОК16- 2022
	Екземпляр № 1	Арк 64 / 12

мкм, отриману травленням і нанесену на лакову підкладку (див. рисунок 1, г, д, е). Завдяки більшій площі контакту смужок тензорезистора з об'єктом вимірювання його тепловіддача значно вище ніж у дротяного, що дозволяє збільшити робочий струм до 0,5 А і тим самим підвищити чутливість ІІ. Інша перевага тензорезисторів з фольги полягає у можливості виготовлення решіток складного профілю, які найбільш повно задовольняють умов вимірювань.

При використанні резисторних ІІ у ланцюгах змінного струму доводиться враховувати реактивні складові опору. Для ІІ реохордного типу враховується індуктивність: для лінійного реохорду (провідник радіусом  $r_0$  та довжиною  $l$ ) вона дорівнює  $L = \mu_0 l [\ln(2l/r_0) - 1] / 2\pi$ ; для обертального (виток радіусом  $r$  з того ж провідника) - за формулою:

$$L = \mu_0 r [\ln(8r/r_0) - 2], \text{ де } \mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6} \text{ В/с/(А}\cdot\text{м)}.$$

У більш загальному випадку резисторний ІІ представляється послідовною або паралельною схемою заміщення (рисунок 2, а, б), параметри яких визначаються за формулами:

$$R_s = R_0 \cdot [1 + \omega^2 C_s (2L_s - C_s R_0^2)]; \quad X_s = \omega (L_s - C_s R_0^2) = \omega L_e;$$

$$R_n = R_0 \cdot [1 + \omega^2 (L_s / R_0)^2]; \quad X_n = 1/\omega (C_s - L_s R_0^2) = 1/\omega C_e,$$

де  $R_0$  - опір резисторного ІІ на постійному струмі;  $C_s, L_s$  - ємність та індуктивність намотування.

Розрахунки показують, що з постійних часу  $L_e/R_0$  чи  $R_0 C_e = 10^{-6}$  з, зміна  $R_0$  на 0,01% відбувається на частоті 1000 Гц. Аналогічна зміна  $R_0$  відбувається на частоті 10 кГц за рахунок поверхневого ефекту. Зменшення впливу  $L_e$  досягається за рахунок використання біфілярної (в два дроти) намотування, а  $C_e$  - за рахунок використання коригувальних конденсаторів.

Резисторні ІІ найчастіше використовуються з живленням на постійному струмі. При цьому використовуються три схеми включення: схема послідовного включення, схема дільника та бруківка схема. Для послідовного включення (рисунок 2, в) вихідна напруга ІІ:

$$U_0 = U_i R_n / (R_n + R_0 \pm R). \quad (1)$$

Для схем із дільником напруги (рисунок 2, г);

$$U_0 = U_i R_n / (R_0 \pm R) / [R_0 (R_n + R_0 \pm R) + R_n / (R_0 \pm R)]; \quad (2)$$

для схеми на малюнку 2, д:

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/152.00.1/Б/ОК16- 2022
	Екземпляр № 1	Арк 64 / 13

$$U_o = U_i R_n / (R_o \pm R) / (2 R_o R_n + R_o^2 - R^2). \quad (3)$$

Як впливає із (1 - 3), залежність  $U_o = f(U_i)$  для всіх трьох схем є нелінійною; для схем дільників вона стає лінійною при  $R_n \gg R_o$ , проте загальний недолік – наявність постійної складової – усувається лише застосуванням мостових схем (рисунок 2, е, ж, з), на яких резисторні ПІ зображені змінними опорами. Вихідний струм мостових схем при живленні джерела постійної напруги визначиться з виразу:

$$I_n = U_i (R_1 R_4 - R_2 R_3) / [R_n (R_1 + R_2) (R_3 + R_4) + R_1 R_2 (R_3 + R_4) + R_3 R_4 (R_1 + R_2)]. \quad (4)$$

При живленні джерела постійного струму ( $U_i$  у схемах малюнків 2, е, ж, з замінюється на  $I_i$ )

$$I_n = I_i (R_1 R_4 - R_2 R_3) / [R_n (R_1 + R_2 + R_3 + R_4) + (R_3 + R_4) (R_1 + R_2)]. \quad (5)$$

Найбільший інтерес представляє мостовий ланцюг з диференціальним перетворювачем, для якого можливі наступні варіанти: включення половин ПІ в плечі  $R_1$  і  $R_2$  або  $R_1$  і  $R_3$  при живленні моста від джерела заданої напруги або від джерела заданого струму і використання ПІ з функцією перетворення вання виду  $R = R_o + Kx$ . Для схеми малюнку 2, е з (4) отримуємо (тут і далі приймається  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_o$ ):

$$U_o = 0,5 U_i (R/R_o) / \{1 + (R_o/R_n)[1 - 0,5(R/R_o)^2]\}. \quad (6)$$

З (6) видно, що лінійність функції перетворення  $U_o = f(R_o)$  забезпечується за  $R_n \gg R_o$ . Для тієї ж схеми при живленні від джерела струму з (5) одержуємо:

$$U_o = 0,5 I_i \Delta R / (1 + R_o/R_n), \quad (7)$$

т. е. характеристика перетворення лінійна за будь-якого значення навантаження  $R_n$ .

Мостова схема на малюнку 2, ж при живленні від джерела напруги нелінійна при будь-яких значеннях  $R_n$ , а при живленні від джерела струму лінійна лише при  $R_n \gg R_o$ , в чому можна переконатися, аналізуючи наведені нижче вирази для їх функцій перетворення:

$$U_o = 0,5 U_i (R/R_o) / \{[1 - 0,25(R/R_o)^2] + (R_o/R_n)[1 - 0,5(R/R_o)^2]\}. \quad (8)$$

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/152.00.1/Б/ОК16- 2022
	Екземпляр № 1	Арк 64 / 14

$$U_o = 0,5I_i(R/R_o)/\{1 + (R_o/R_n)[1 - 0,25(R/R_o)^2]\}. \quad (9)$$

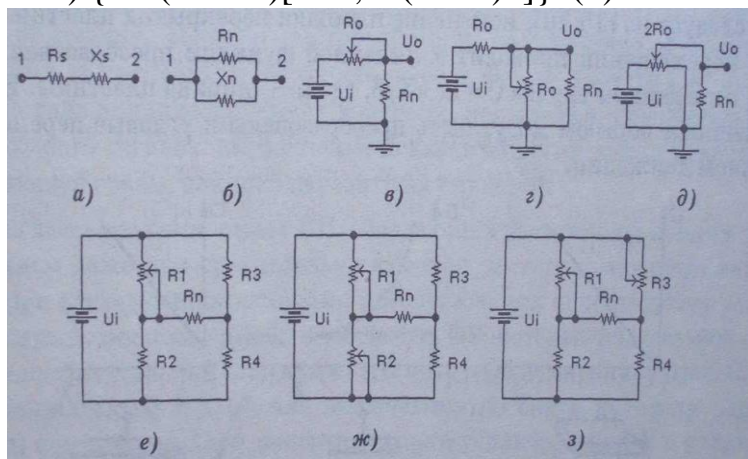


Рис. 2 - послідовна (а) та паралельна (б) схеми заміщення резисторного ПІ та схеми його включення (в, г, д, е, ж, з)

## 2 Порядок виконання роботи

1 Вивчити натурний зразок потенціометричного датчика з поворотним механізмом контролю переміщення та додатковими резисторами.

2 Ознайомитися з методикою роботи серед програми «Електронна лабораторія на ЕОМ» по [1].

2 За вказівкою викладача включити ЕОМ.

4 Підготувати схеми моделей для дослідження резисторного ПІ при включенні його за схемою дільника (рисунок 2, г, д) при  $U_i = 1$ ,  $R_o = 10$  кОм,  $DR = 1, 2, 3, 5$  і  $8$  кОм. Як навантаження використовувати мультиметр. Результати моделювання порівняйте з розрахунковими за формулами (2) та (3).

5 Скласти схеми моделей мостових схем включення ПІ малюнку 2, е, ж, з. При  $U_i = 1$ ,  $I_i = 0,1$  мА,  $R_o = 10$  ком,  $DR = 1, 3$  і  $5$  ком перевірити істинність формул (6-9) і отриманих з їх допомогою висновків. Як навантаження використовувати мультиметр.

## 3 Зміст звіту

Найменування та мета роботи, коротка характеристика резисторних перетворювачів та використовуваних приладів програми EWB, схеми моделюваних ПІ та результати їх дослідження, відповіді на контрольні питання, висновки щодо роботи.

## 4 Контрольні питання та завдання

1 Назвіть типи резисторних перетворювачів та області їх застосування?

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/152.00.1/Б/ОК16- 2022
	Екземпляр № 1	Арк 64 / 15

2 Який тип резисторного ПІ використовується для перетворення переміщень по-плавкового рівнеміра бензобака автомобіля? Чому при переповненні бака іноді можливі нульові показання індикатора рівня на дошці?

3 Принцип дії ПІ контактного опору заснований на тому, що при здавленні резистивного матеріалу збільшується кількість контактиків, що контактують один з одним. Чи можливий випадок, коли після зняття тиску деяка частина кристаликів не повернеться до вихідного "неконтактного" стану? Чи залежить такий процес "укрупнення" від робочого струму та часу роботи ПІ?

4 Яким чином необхідно розмістити тензорезистор, показаний на малюнку 1, д, на валу двигуна, щоб можна було отримати дані про його крутний момент? Які при цьому будуть потрібні додаткові пристрої для зв'язку тензорезистора з системою контролю або управління?

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/152.00.1/Б/ОК16- 2022
	Екземпляр № 1	Арк 64 / 16

### ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3

**Тема:** дослідження тензорезисторних перетворювачів

**Мета:** ознайомитись з принципами роботи тензорезистивних перетворюючих елементів

**Технічне забезпечення:** ПЕОМ

#### Короткі теоретичні відомості

Основні різновиди тензорезистивних перетворюючих елементів. В основі принципу роботи тензорезисторів лежить явище тензоефекту, що полягає в зміні електричного опору провідного матеріалу при його механічній деформації. Основною характеристикою чутливості матеріалу до механічної деформації є коефіцієнт відносної тензочутливості  $k$ , який визначається як відношення відносної зміни опору до відносної зміни довжини провідника:

$$k = \frac{\varepsilon_R}{\varepsilon_l} = \frac{\Delta R / R}{\Delta l / l} \quad .$$

Оскільки опір провідника пов'язаний з питомим електричним опором  $\rho$  матеріалу, довжиною  $l$  і площею поперечного переріза  $S_q$ , цього провідника залежністю

$$R = \rho \frac{l}{S_q} \quad ,$$

то відносна зміна опору, викликана деформацією провідника під дією рівномірної механічної напруги,

$$\frac{1}{R} \frac{dR}{d\sigma} = \frac{1}{l} \frac{dl}{d\sigma} - \frac{1}{S_q} \frac{dS_q}{d\sigma} + \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{d\sigma}$$

З останнього виразу випливає, що при кінцевій зміні напруги  $a$  відносна зміна опору

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta S_q}{S_q} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad .$$

При деформації твердих тіл зміна їхньої довжини зв'язана зі зміною об'єму. При цьому зміна об'єму в зоні пружних деформацій для кожного матеріалу є величиною постійної і характеризується коефіцієнтом Пуассона  $\mu = -\frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_l}$ , де  $\varepsilon_d = \frac{\Delta d}{d}$  (тут  $d$  — діаметр провідника круглого перетину або поперечний розмір провідника квадратного перетину).



Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/152.00.1/Б/ОК16- 2022
	Екземпляр № 1	Арк 64 / 17

З огляду на те, що  $\frac{\Delta d}{d} = \frac{1}{2} \frac{\Delta S_q}{S_q} = -\mu \frac{\Delta l}{l}$ , одержимо вираз для коефіцієнта відносної тензочутливості

$$k = 1 + 2\mu + \frac{\Delta\rho/\rho}{\Delta l/l}.$$

Для деяких металів питомий електричний опір практично не міняється під дією механічних деформацій, а коефіцієнт  $k$  може бути для них прийнятий рівним  $k = 1 + 2\mu$ . Так як коефіцієнт Пуассона для металів має значення 0,24...0,4, то значення коефіцієнта тензочутливості часто вважають приблизно рівним 1,48...1,8. У загальному ж випадку коефіцієнт тензочутливості провідника містить складову, котра визначається зміною його питомого електричного опору і може бути як позитивною, так і негативною. Для металів коефіцієнт тензочутливості складає 0,5...4.

Механічна напруга  $\sigma$  у досліджуваній деталі пов'язана з модулем пружності  $E$  матеріалу цієї деталі співвідношенням  $\sigma = E \frac{\Delta l}{l}$ .

Отже, рівняння перетворення тензорезистора можна представити у вигляді

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{k\sigma}{E}.$$

Як матеріал деталі, яка досліджується, так і матеріал проводу тензорезистора повинні піддаватися механічним напругам, що не перевищують межі пружних деформацій, у противному випадку в матеріалі відбудуться необоротні деформації. Тому припустимо значення напруг не перевищує 20...30 % межі пружності.

Оскільки значення відносної деформації  $\Delta l/l$  в межах пружних властивостей матеріалу не перевищує  $2,5 \cdot 10^{-3}$ , то при  $k = 0,5...4$  відносна зміна опору  $\frac{\Delta R}{R} = (1,25...10) \cdot 10^{-3}$ , тобто не перевищує 1 %. У зв'язку з цим опір тензорезистора повинен володіти високою часовою стабільністю, мати незначний ТКС. Основними вимогами, які представлені до матеріалів тензорезисторів, є також можливо більше значення коефіцієнта тензочутливості, високий питомий електричний опір. Крім того, температурний коефіцієнт лінійного розширення чутливого елемента перетворювача повинен бути за можливості рівним температурному коефіцієнту лінійного розширення матеріалу досліджуваного об'єкта.

Коефіцієнт тензочутливості напівпровідникових тензорезисторів визначається в основному зміною питомого електричного опору

$$k = \frac{\varepsilon_R}{\varepsilon_I} \approx m = \frac{\Delta\rho/\rho}{\Delta l/l}.$$

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/152.00.1/Б/ОК16- 2022
	Екземпляр № 1	Арк 64 / 18

Значення  $k$  напівпровідникових тензорезисторів, на відміну від провідникових, значною мірою залежать від ступеня деформації, температури, питомого електричного опору, типу провідності і досягають 150...200. При цьому в напівпровідниках  $n$ -типу коефіцієнт тензочутливості негативний, а в напівпровідниках  $p$ -типу — позитивний.

У практиці вимірювальних перетворень тензоефект використовується в двох напрямках. Це, по-перше, зміна опору провідника або напівпровідника в результаті об'ємного стиску. Вхідною величиною такого перетворювача є тиск навколишнього його газу або рідини. На цьому принципі будуються перетворювачі високих і надвисоких тисків, що виготовляються у виді бескаркасної обмотки, намотаної звичайно з манганінового дроту, а перетворювачами низьких тисків є германієвий або кремнієвий тензорезистор.

Сутність другого напрямку полягає у використанні тензоефекту розтягуючого або стискуючого тензочутливого матеріалу. Перетворювачі цієї групи можуть бути виконані у вигляді наклеюваних дротових, фольгових або плівкових, або так званих вільних (начіпних) тензоперетворювачів.

Як матеріали для виготовлення дротових тензорезисторів використовують найчастіше константан, ніхром, елінвар, платино-родій. Однак найбільше поширення у вітчизняній тензометрії одержали тензорезистори зі спеціального константанового мікродроту діаметром 0,025...0,035 мм.

Похибка дротових резисторів може бути зведена до 0,1...0...0,2 %. Фольгові тензоперетворювачі являють собою наклеєну на підложку 1 тензочутливу решітку 2, витравлену з фольги товщиною 0,01...0,02 мм. Вони мають визначені переваги перед дротовими. Зокрема, оскільки відношення поверхні тензочутливої доріжки до її поперечного переріза велике, то поліпшується тепловіддача, що дозволяє значно збільшити щільність струму, якщо тільки деталь, до якої приклеюється тензоперетворювач, не має дуже малу теплоємність. Недоліком звичайних фольгових перетворювачів, є порівняно низький опір, що не перевищує зазвичай 50 Ом.

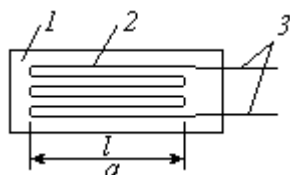


Рисунок 7.1 – Схема тензоперетворювача

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/152.00.1/Б/ОК16- 2022
	Екземпляр № 1	Арк 64 / 19

Останнім часом широкого поширення набули плівкові тензорезистори. Процес їхнього виготовлення полягає в вакуумній възгонці чутливого матеріалу з наступною конденсацією його на підложку. Для виготовлення плівкових тензорезисторів застосовують як металеві (наприклад, титаноалюмінієвий сплав), так і напівпровідникові (германій, кремній) матеріали.

При виготовленні як фольгових, так і плівкових тензоперетворювачів можна передбачити будь-який малюнок їхньої решітки, що є їх істотною перевагою, завдяки чому вони знаходять застосування для досліджень механічних напруг деталей найрізноманітнішої конфігурації.

У тих випадках, коли від тензоперетворювачів необхідно одержати велику потужність, їхні чутливі елементи роблять з великого числа (до 30 і навіть 50) паралельно з'єднаних дротинок

До основних техніко-метрологічних характеристик тензорезисторів відносяться тензочутливість, повзучість, механічний гістерезис, температурна нестабільність, динамічні характеристики.

Тензочутливість визначається головним чином тензорезистивними властивостями матеріалу чутливого елемента, однак у значній мірі залежить від конструкції перетворювача, матеріалу основи, виду й умов полімеризації клею й інших факторів. Тензочутливість тензорезистора, як і самого тензорезистивного матеріалу, визначається коефіцієнтом відносної тензочутливості.  $k = \varepsilon_R / \varepsilon_l$ .

Повзучість проявляється у вигляді зміни вихідного сигналу при заданому і незмінному значенні деформації і визначається звичайно як

$$\delta = \frac{\Delta \varepsilon_l}{\varepsilon_l},$$

де  $\Delta \varepsilon_l$  — приведена до входу зміна вихідного сигналу при заданій відносній деформації  $\varepsilon_l$ .

Причиною повзучості є пружна недосконалість основи і клею. У межах пружного діапазону деформацій повзучість більшості тензорезисторів не перевищує 0,5...1% за першу годину після приклеювання і відповідно 1...1,5% за 6 ч.

Механічний гістерезис, як і повзучість, обумовлений пружною недосконалістю основи і клею та чисельно визначається як приведена до входу різниця значень вихідного опору для того самого значення деформації за умови, що дане значення деформації досягається при плавному її зростанні і плавному зменшенні. Для різних типів тензорезисторів механічний гістерезис лежить у межах 0,5...5 %.

Температурна нестабільність, або вплив температури навколишнього середовища на основні параметри тензорезисторів, полягає, з одного боку,

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/152.00.1/Б/ОК16- 2022
	Екземпляр № 1	Арк 64 / 20

у зміні опору тензорезистора за рахунок його ТКС, а з іншого боку - у появі додаткових механічних напруг унаслідок розходження в температурних коефіцієнтах лінійного розширення матеріалу тензорезистора і досліджуваної деталі.

Якщо  $\beta_d$  і  $\beta_{\Pi}$  — температурні коефіцієнти лінійного розширення досліджуваної деталі і підложки тензорезистора, то відносна деформація тензорезистора, обумовлена зміною навколишньої температури на  $\Delta\theta$ ,

$$\varepsilon_{\theta} = \frac{\Delta l_{\theta}}{l} = (\beta_d - \beta_{\Pi})\Delta\theta,$$

а зміна його опору при цьому

$$\Delta R = kR \frac{\Delta l_{\theta}}{l} = kR(\beta_d - \beta_{\Pi})\Delta\theta,$$

Оскільки зміна опору тензорезистора, обумовлена наявністю ТКС матеріалу чутливого елемента, дорівнює  $\Delta R_{\alpha} = R\alpha_{\theta}$ , та загальна зміна опору тензорезистора, викликана зміною температури навколишнього середовища на  $\Delta\theta$ ,

$$\Delta R_{\theta} = R\alpha_{\theta} + kR(\beta_d - \beta_{\Pi})\Delta\theta = R[\alpha + k(\beta_d - \beta_{\Pi})]\Delta\theta.$$

Основною динамічною характеристикою тензорезисторів є їхня власна частота, значення якої для наклеєних тензорезисторів лежить у межах 100...300 кГц. Власна частота тензорезистора визначає граничну частоту досліджуваного процесу, при якій частотними похибками можна знехтувати. Для досліджень змінних деформацій звичайно вибирають тензорезистивний перетворювач, власна частота якого хоча б у 5...10 разів перевищувала частоту деформацій.

Важливим параметром тензорезисторів є припустима потужність  $P$ , що може розсіюватися в тензорезисторі за умови, що його перегрів не перевищить припустимого значення. Припустима потужність тензорезистора перебуває у визначеній залежності від його геометричних розмірів, що може використовуватися як при визначенні  $P$  для відомих тензорезисторів, так і при визначенні геометричних розмірів проєктованих перетворювачів, виходячи з заданої припустимої потужності або припустимого значення вимірювального струму:

$$\Delta\theta = PR_T = \frac{P}{S_0\alpha_T} = \frac{P_{уд}}{\alpha_T},$$

де  $R_T$  — тепловий опір;  $S_0$  — площа поверхні тепловіддачі матеріалу резистора;  $\alpha_T$  — коефіцієнт тепловіддачі;  $P_{уд} = P/S_0$  — питоме теплове навантаження.

Відвід теплоти від тензорезистора до досліджуваної деталі через шар клею і підложку значно перевищує тепловіддачу в навколишнє повітря.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідас ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/152.00.1/Б/ОК16- 2022
	Екземпляр № 1	Арк 64 / 21

Тому можна вважати, що практично все тепло відводиться в досліджувану деталь, а за площу  $S_0$  для плівкових і фольгових тензорезисторів приймають поверхню резистора, звернену до досліджуваної деталі, а для дротових — половину циліндричної поверхні дроту чутливого елемента.

Питома потужність використовуваних у даний час дротових, фольгових і напівпровідникових тензорезисторів незалежно від потужності, що розсіюється в них і повній поверхні, яку займає чутливий елемент, зазвичай коливається в незначних межах:

$$P_{уд} = 26 \dots 28 \text{ кВт/м}^2 \text{ (або мВт/мм}^2\text{)}.$$

Припустиме значення вимірювального струму через тензорезистор може бути визначене зі співвідношення  $P = I^2 R = P_{уд} S_0$ . Для дротових тензорезисторів з базою  $l$ , кількістю проводів у решіткач чутливого елемента  $n$  і діаметром проводу  $d$

$$S_0 = \frac{\pi d}{2} n l, R = \frac{4 \pi l \rho}{\pi d^2}.$$

Звідси

$$I_{доп} = \sqrt{\frac{P_{уд} S_0}{R}} = \sqrt{\frac{P_{уд} \pi^2 d^3}{8 \rho}}.$$

Особливістю приклеювання тензорезистивних перетворювачів є та обставина, що вони являють собою перетворювачі разової дії, тобто не можуть бути переклеєні з об'єкта на об'єкт. Тому функція перетворення робочого тензорезистора не може бути визначена, а для її оцінки визначають функцію перетворення аналогічного, так названого градуйованого, перетворювача з тієї ж партії. Природно, що такий спосіб оцінки характеристик роботи тензоперетворювачів застосуємо лише в тому випадку, коли властивості перетворювачів усієї партії зовсім ідентичні, а залишкові деформації, викликані затвердінням клею при приклеюванні робочих і градуйованих перетворювачів, також однакові. Досвід показує, що похибка від неідентичності при ретельному приклеюванні тензорезисторів і гарній якості клею звичайно яє перевищує 1,5 %.

Слід зазначити, що для приклеювання тензорезисторів до досліджуваної деталі застосовуються спеціальні клеї, для роботи в нормальних температурних умовах-ацетатно-целулоїдні і бакеліто-фенольні (ВФ) клеї, для роботи при високих температурах (до 600... ..800 °С) — кремнійорганічні цементи (наприклад, Б-56, ВН-12) і спеціальні цементи на основі рідкого скла або полісилоксанов.

Тензочутливість готових тензоперетворювачів практично не піддається точному розрахунку, тому що вона може істотно відрізнитися від тензочутливості вихідного матеріалу. Крім впливу технологічних

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідас ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/152.00.1/Б/ОК16- 2022
	Екземпляр № 1	Арк 64 / 22

факторів на відтворюваність тензорезистивних властивостей матеріалу істотний вплив на значення коефіцієнта тензочутливості перетворювача роблять зігнутих в місцях заокруглення дроту, особливо в петлевих перетворювачах. У цих місцях утворюються ділянки, що не сприймають деформацію в напрямку осі бази. Зменшення чутливості, викликане цим фактором, тим більше, чим менше вимірювальна база (у двошарових перетворювачах зі зменшеною базою чутливість може зменшитися на 20...30 %). Істотний вплив на результуючу чутливість робить поперечний тензоефект, обумовлений наявністю ділянок дроту, перпендикулярних до осі бази перетворювача і сприймаючих поперечну деформацію. Цього недоліку практично цілком позбавлені фольгові і плівкові перетворювачі, у яких перетин провідного шару в місці вигину може бути значно збільшено.

Вимірювальні схеми. У більшості випадків тензорезистивні перетворювачі використовуються в мостових схемах постійного струму. При цьому тензорезистор може бути включений в одне з пліч моста, у два плеча або мостовий ланцюг може бути складений цілком з тензорезистивних перетворювачів.

Так як відносні зміни опорів тензорезисторів дуже малі (звичайно не більш 1 %), то істотний вплив на результат виміру можуть робити їхні температурні зміни. Отже, необхідно передбачити температурну компенсацію. Зокрема, якщо використовується мостовий ланцюг з одним робочим тензорезистором, то для температурної компенсації необхідно застосувати інший неробочий тензорезистор  $R_{TO}$ , аналогічний робочому і який перебуває з ним в однакових температурних умовах. Якщо такий мостовий ланцюг при відсутності деформації буде перебувати в рівновазі, тобто  $\frac{R_T}{R_2} = \frac{R_4}{R_3} = k$ , то при впливі вимірюваної деформації опір  $R_T$  зміниться на  $\varepsilon_R R_T$ , рівновага мостового ланцюга порушиться і на виході з'явиться напруга

$$U_{вих} = U \frac{(1 + \varepsilon_R)R_T R_3 - R_2 R_4}{[(1 + \varepsilon_R)R_T + R_4](R_2 + R_3)}$$

Розділивши чисельник і знаменник на  $R_2 R_3$  за умови, що  $R_4 = R_{TO}$  (тут  $R_{TO}$  – значення опору ненавантаженого тензорезистора) і  $R_2 = R_3$ , одержимо  $U_{вих} = 0,25 U \varepsilon_R$

Дві пари диференціальних тензорезисторів, що утворюють повний міст із тензоопорів, забезпечують максимальну корекцію температурних похибок в чотири рази збільшують чутливість.

Слід зазначити, що повна компенсація температурної похибки можлива лише за умови повної ідентичності всіх характеристик тензорезисторів відповідних пар і, у першу чергу, рівності їх ТКС. Для

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідас ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/152.00.1/Б/ОК16- 2022
	Екземпляр № 1	Арк 64 / 23

забезпечення цієї умови в особливо відповідальних випадках приходиться підбирати тензорезистори для кожного окремого мостового ланцюга індивідуально.

Оскільки навіть незначна різниця в опорах тензорезисторів приводить до того, що міст виявиться неврівноваженим при відсутності деформації, у мостових ланцюгах повинні бути передбачені перемінні резистори, за допомогою яких можна робити зрівноважування моста при відсутності деформації.

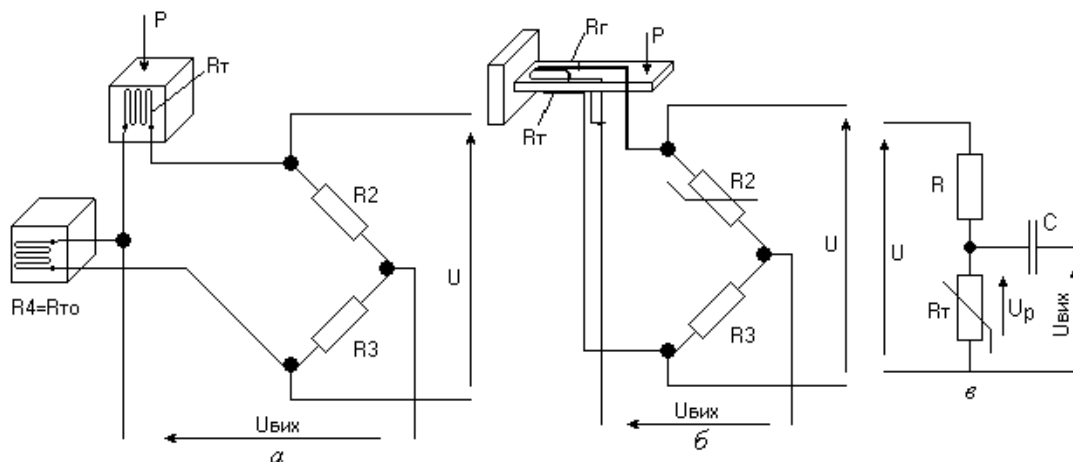


Рисунок 7.2 – Вимірювальні схеми тензорезистивних перетворювачів.

При вимірах динамічних деформацій при частоті більш 1000 Гц, наприклад деформацій, викликаних ударом, використовується потенціометрична схема включення тензорезисторів (рис. 7.2, в). Вихідна напруга знімається з тензорезистора  $R_T$ , включеного послідовно з резистором  $R$ . Замість резистора  $R$  може бути включений тензорезистор, встановлений на досліджуваному об'єкті так, щоб він сприймав деформацію, протилежну за знаком деформації тензорезистора  $R_T$ .

Для виключення постійної складової вихідної напруги встановлюють розділовий конденсатор  $C$ . Оскільки напруга на тензорезисторі

$$U_T = U \frac{R_T}{R + R_T},$$

то при деформаціях з частотою  $\omega$

$$U_T = U \frac{R_T (1 + \varepsilon_R \sin \omega \cdot t)}{R + R_T (1 + \varepsilon_R \sin \omega \cdot t)},$$

або при  $\varepsilon_R \ll 1$

$$U_T \approx U \left[ \frac{R_T}{R + R_T} + \frac{R_T \varepsilon_R \sin \omega \cdot t}{R + R_T} \right],$$

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/152.00.1/Б/ОК16- 2022
	Екземпляр № 1	Арк 64 / 24

а вихідна напруга, що містить лише перемінну складову,

$$U_{\text{вих}} \approx \frac{R_T}{R + R_T} \varepsilon_R \sin \omega \cdot t.$$

На завершення потрібно відмітити, що на сучасному етапі в промисловості тензочутливі давачі мало поширені. Проте їх широко використовують при проектних роботах, оскільки часто це майже єдиний спосіб підтвердити або спростувати розрахункові дані щодо надійності конструктивних елементів.

### Хід роботи

Запустити схему дослідження (рисунок 7.3), визначити залежність вихідного сигналу вимірювального кола перетворювача від прикладеної сили, побудувати одержану залежність у формі графіка.

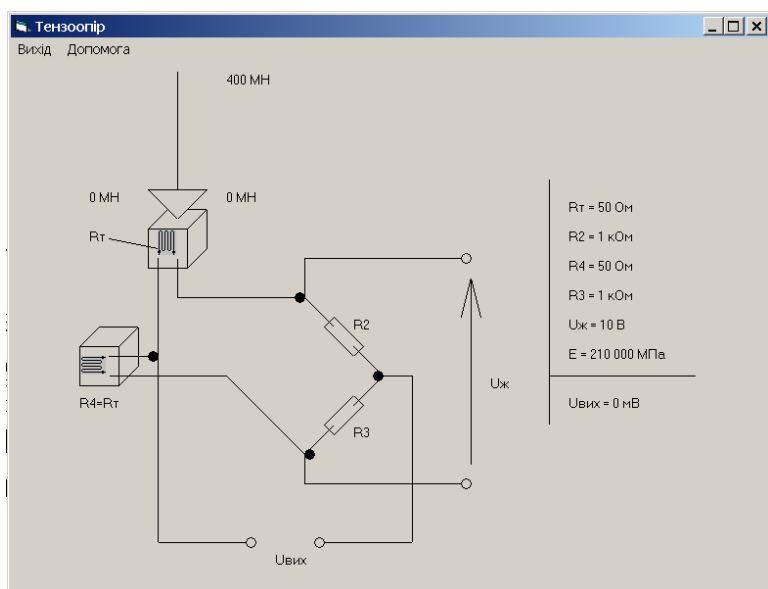


Рисунок 7.3 – Схема дослідження тензоперетворювача

### Контрольні питання

- 1 Суть явища тензоефекту.
- 2 Пружні, непружні деформації.
- 3 Похибки дрітятих, фольгових, напівпровідникових тензорезисторів.
- 4 Характеристики тензочутливих елементів.
- 5 Схеми включення тензочутливих елементів.
- 6 Застосування тензорезистивних перетворювачів.
- 7 Конструкція напівпровідникових тензорезисторів.



Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/152.00.1/Б/ОК16- 2022
	Екземпляр № 1	Арк 64 / 25

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4

**Тема:** Дослідження п'єзоелектричного вимірювального перетворювача

Мета роботи: вивчити принципи побудови та функціонування п'єзоелектричних вимірювальних перетворювачів, дослідити електричні схеми датчиків із прямим та зворотним п'єзоелектром у середовищі Electronics Workbench.

### 1 Короткі відомості з теорії

Принцип дії П п'єзоелектричних датчиків заснований на використанні прямого або зворотного п'єзоелектрів. Прямий п'єзоелектр полягає у здатності деяких матеріалів генерувати електричні заряди при додатку механічного навантаження, зворотний – у зміні механічної напруги або геометричних розмірів зразка матеріалу під впливом електричного поля. Як п'єзоелектричні матеріали використовуються кварц, турмалін і штучно поляризована кераміка на основі титанату барію ( $\text{BaTiO}_3$ ), титанату свинцю ( $\text{PbTiO}_3$ ), цирконату свинцю ( $\text{PbZrO}_3$ ) та ін.

Кількісно п'єзоелектр характеризується п'єзо-модулем

$$K_d = Q/F, (1)$$

де  $Q$  - заряд, що генерується при впливі сили  $F$ .

Найбільш поширений кварц; він має незначний коефіцієнт лінійного розширення при модулі пружності  $E = \text{Па}$ , високий питомий електричний опір (порядку  $\text{Ом/м}$ ) та порівняно незначну залежність п'єзомодуля ( $\text{Кл/Н}$ ) від температури в діапазоні  $200\text{...}500^\circ\text{C}$ .

П'єзокераміка є продуктом відпалу спресованої суміші, що містить дрібно роздроблені сегнетоелектричні кристали; п'єзоелектричні властивості така кераміка набуває після поляризації в електричному полі. Механічна міцність п'єзокераміки залежить від технології та якості обробки дотичних площин; п'єзомодуль, діелектрична проникність та їх стабільність залежать від вибору напрямку поляризації, напрямку дії сили  $P$  та способу знімання заряду.

П'єзокераміка на основі ніобату свинцю (НБС) та цирконату-титанату свинцю (ЦТС) більш стабільна, ніж на основі титанату барію, проте поступається їм за чутливістю. Так, п'єзокераміка на основі титанату барію має точку Кюрі  $120^\circ\text{C}$  (температура, при якій губляться

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/152.00.1/Б/ОК16- 2022
	Екземпляр № 1	Арк 64 / 26

п'єзоелектричні властивості) при п'єзомодулі порядку Кл/Н, а п'єзокераміка ЦТС-19 - точку Кюрі 290°C і вдвічі більш високе значення п'єзомодуля.

Усі природні п'єзоматеріали мають кристалічну структуру. Так, кварц має шестигранну структуру кристала: п'єзочутливий елемент зазвичай вирізують із кристала кварцу у вигляді пластини (паралелепіпеда), сторони якої паралельні осям кристала (рисунок 1, а). У вільному (ненапруженому) стані в пластині всі заряди компенсовані і вона є електрично нейтральною.

Якщо до пластини кварцу прикладена сила  $F$  вздовж осі  $X$  (див. малюнок 1, а), то на її гранях, перпендикулярних до осі  $X$ , виникають різнополярні електричні заряди  $Q$ , значення яких у межах пружних деформацій прямо пропорційні силі  $F$  відповідно до виразу (1). Такий п'єзоефект називається поздовжнім. Значення зарядів у своїй залежить від геометричних розмірів пластини, а визначаються лише силою  $F$ .

Якщо пластину піддати стиску по осі  $Y$  (поперечний п'єзоефект), то тих самих гранях генерується заряд  $Q = -Kd(b/a)F$ , де  $a$  і  $b$  — розміри п'єзоелемента у бік осей  $X$  і  $Y$ . Залежно від напрямку дії сили  $F$  (стиснення або розтягування) знак заряду на гранях пластини змінюється.

Турмалін, на відміну від кварцу, має не дві, а одну п'єзочутливу площину перпендикулярну до оптичної осі  $Z$ . Завдяки такій особливості турмалін застосовується для вимірювання об'ємного тиску, що робить його незамінним при вимірюванні тиску в рідинах.

Конструктивно такий ІІ є пластиною з п'єзоматеріалу, на дві грані якого наносяться електроди для підключення до вимірювальної схеми. Для збільшення вихідного сигналу пластин набирають батарею з послідовно включених п'єзоелементів (рисунок 1, б).

Для вимірювання деформації зсуву конструкція ІІ є циліндром 1 з п'єзокераміки з електродами 2, 3 (рисунок 1, г). Під дією сили  $F$  відбувається деформація зсуву площин, паралельних до напрямку поляризації, що викликає генерацію заряду.

При вимірі параметрів вигину ІІ є дві однакові склеєні між собою пластини; при згинанні одна пластина подовжується, а інша коротшає. Залежно від схеми підключення можна отримати сигнал, пропорційний сумі зарядів (малюнок 1, в) або сумі напруги (малюнок 1, д).

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідас ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/152.00.1/Б/ОК16- 2022
	Екземпляр № 1	Арк 64 / 27

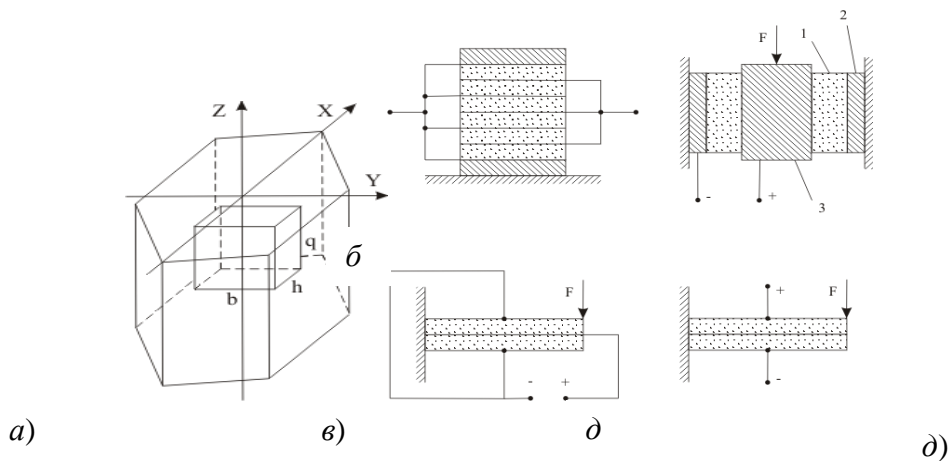


Рис. 1 Кристал кварцу (а) та конструкції п'єзоелектричних ВП (б, в, г, д)

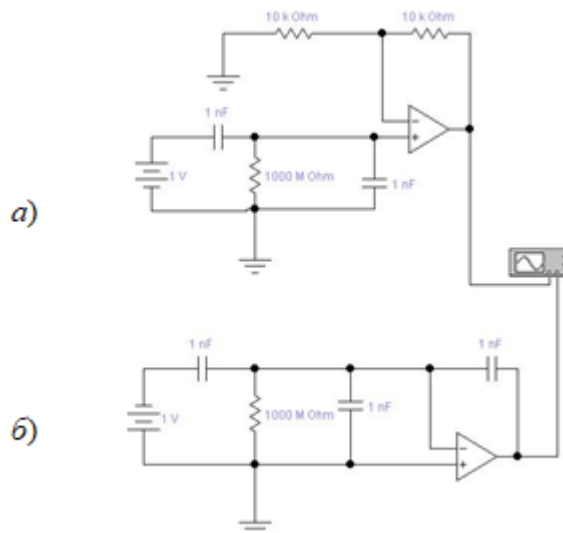


Рис. 2 – Еквівалентні схеми включення п'єзоелектричних ПП (а, б)

Перетворювачі зі зворотним п'єзо ефектом використовуються як джерела ультразвукових і звукових коливань (при гідродинамічних вимірах і в акустиці), у виконавчих пристроях автоматики (переміщення дзеркал оптичних приладів), як зворотні ПП та ін.

Похибки п'єзоелектричних ПП визначаються температурною нестабільністю п'єзомодуля, неправильною установкою пластин, недостатньою вибірковістю у напрямку вимірюваних деформацій (чутливість до бічних сил) та залежністю коефіцієнта перетворення від частоти (наприклад, верхня робоча частота таких ПП досягає 200 кГц при чутливості 0/00 ), проте при граничній чутливості 1000 пКл/(м/с<sup>2</sup>) вона знижується до 1 кГц).

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/152.00.1/Б/ОК16- 2022
	Екземпляр № 1	Арк 64 / 28

Переваги п'єзоелектричних ПП: простота конструкції, малі габарити та вартість, висока надійність, можливість вимірювання швидкозмінних величин; Недоліки: невисока чутливість, непридатність до вимірювання статичних величин, високий вхідний опір вимірювального ланцюга, відносно невисокий рівень вихідного сигналу, що потребує додаткового посилення.

Найбільш поширеними схемами включення п'єзоелектричних ПП є схеми з підсилювачем напруги (малюнок 2, а) та підсилювачем заряду (малюнок 2, б); ПП на цих схемах імітується джерелом заряду, утвореним джерелом постійної напруги  $U_i$  та конденсатором  $C_0$ ; крім того, на схемах позначено:  $R_n$ ,  $C_n$  - опір витоку та ємність ПП та сполучного кабелю (власна ємність ПП на п'єзокераміці досягає вказаних на схемах значень  $C_n$ );  $C$  - запам'ятовуюча ємність зарядочутливого підсилювача;  $R_1$ ,  $R_2$  - елементи ланцюга зворотного зв'язку підсилювача на малюнку 2, а, що забезпечують по неінвертуючому входу коефіцієнт посилення  $K = 1 + R_2/R_1 = 2$ . У момент  $t = 0$  (включення моделювання) вихідна напруга підсилювача дорівнює

$$K \cdot U_i \cdot C_0 / (C_0 + C_n) = 2 \cdot 1 \cdot 1 / (1 + 1) = 1 \text{ В,}$$

і потім експоненті спадає до нуля, що істотно ускладнює подальшу обробку сигналу, наприклад, за допомогою АЦП. Крім того, вихідна напруга і результат вимірювання залежать від ємності  $C_n$ , значення якої, у свою чергу, залежить як від характеристик ПП, так і характеристик сполучного кабелю. У схемі ж із зарядочутливим підсилювачем вплив цієї ємності зменшується в  $A$  раз (так позначається, нагадуємо, коефіцієнт посилення ОУ), тобто для схеми на малюнку 2 б вихідна напруга дорівнює

$$U_i \cdot C_0 / (C + C_n / A) = 1 \cdot 1 / (1 + 1/106) = 1 \text{ В.}$$

Осцилограма перехідного процесу для цього рівняння має характеристику, що спадає (осцилограму рекомендується отримати за допомогою осцилографа).

Недоліком такої схеми включення ПП є необхідність скидання заряду з конденсатора, що запам'ятовує, і застосування для цієї мети відповідного ключа (електромеханічного або електронного). Однак у разі поєднання датчика з АЦП цей недолік несуттєвий і навіть корисний, оскільки при цьому не потрібно пристрій вибірки та зберігання.

Прикладом прямого п'єзоефекту є вібровимірювальний перетворювач для формування діагностичного сигналу про дефекти коліс вагонів. При русі вагонів з повзунами взаємодія коліс з рейками має ударний характер. Внаслідок цього виникають вібропереміщення та віброприскорення рейок. Вібродатчик є вимірювальним перетворювачем інерційної дії, що працює в режимі акселерометра. Інерційний вантаж з пружною підвіскою, два п'єзоелементи у формі диска та основа датчика

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідас ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/152.00.1/Б/ОК16- 2022
	Екземпляр № 1	Арк 64 / 29

поміщені в корпус. Електричні заряди, що утворюються під дією сил інерції вантажу на електродах п'єзоелементів, подаються коаксіальним кабелем на вихід датчика. Амплітуда електричного сигналу на виході акселерометра прямо пропорційна амплітуді прискорення рейки, до якого кріпиться вібродатчик.

## 2 Порядок виконання роботи

1 Вивчити натурний зразок п'єзоелектричного акселеро-метричного датчика, який застосовується для вимірювання дефектів вагонного колеса.

2 Ознайомитися з методикою роботи серед програми «Електронна лабораторія на ЕОМ» по [1].

2 За вказівкою викладача включити ЕОМ.

4 Підготувати та дослідити схеми моделей для вивчення п'єзоелектричного ПП при включенні його за схемою, наведеною на малюнку 2.

## 3 Зміст звіту

Найменування та мета роботи, коротка характеристика п'єзоелектричних перетворювачів та приладів програми EWB, що використовуються, схеми моделюваних ПП та результати їх дослідження, відповіді на контрольні питання, висновки по роботі.

## 4 Контрольні питання та завдання

1 Назвіть типи п'єзоелектричних перетворювачів та області їх застосування?

2 Які фізичні явища використовуються в п'єзоелектричних ПП?

3 Що таке поздовжній та поперечний п'єзоєфекти? Чи можливий він у п'єзокераміці?

4 Чи можна використовувати кварцовий резонатор, який використовується для стабілізації частоти в генераторах, як п'єзоелектричний ПП?

5 Використовуючи формулу (1), складіть вираз функції перетворення  $U_0 = f(F)$  для схем на малюнку 2.

6 Якою стандартною ланкою можна уявити п'єзоелектричний датчик, якщо відомо, що його робоча частота дорівнює 10 кГц і він використовується для вимірювання лінійних прискорень у діапазоні 5...100 м/с<sup>2</sup>?

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/152.00.1/Б/ОК16- 2022
	Екземпляр № 1	Арк 64 / 30

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5

**Тема:** дослідження ємнісного вимірювального перетворювача

**Мета роботи:** вивчити принципи побудови і функціонування ємнісних вимірювальних перетворювачів, досліджувати електричні схеми ємнісних датчиків в середовищі Electronics Workbench.

### 1. Короткі теоретичні відомості

Принцип дії вимірювальних ємнісних перетворювачів (надалі ВП і датчиків) заснований на зміні ємності конденсатора при впливі входньої величини, яку перетворюють, на один з його конструктивних параметрів відповідно до формули:

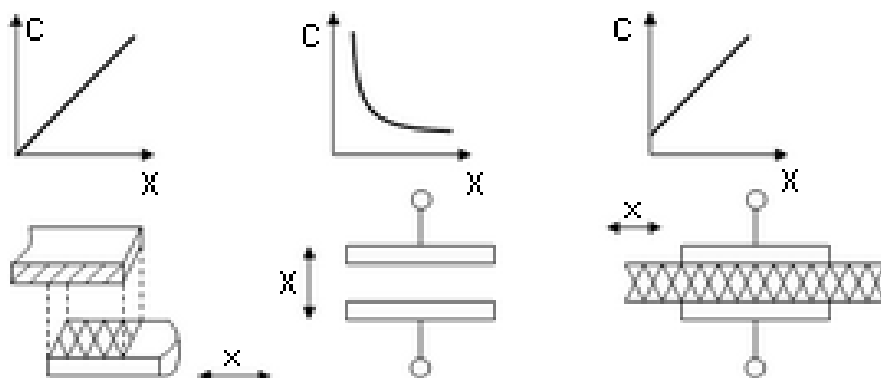
$$C = \varepsilon\varepsilon_0 S / \delta, \quad (1)$$

де  $\varepsilon$  - відносна діелектрична проникність діелектрика;  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м - електрична постійна;  $S$  - площа перекриття пластин, м<sup>2</sup>;  $\delta$  - товщина діелектрика або відстань між пластинами, м.

Як випливає з (1), зміна площі перекриття пластин  $S$  за рахунок їх взаємного переміщення призводить до лінійної функції перетворення  $C=f(X)$  (рисунок 1, а); в даному випадку  $C = \varepsilon\varepsilon_0 aX / \delta$ , де  $a$  - ширина пластини. Аналогічним чином можуть бути перетворені і кутові переміщення при оберտальному русі.

З (1) видно, що при зміні відстані  $\delta$  між пластинами конденсатора функція перетворення є нелінійною (рисунок 1, б), тому такі ВП використовуються переважно для перетворення малих переміщень.

Ємнісні ВП із змінною діелектричною проникністю володіють лінійною характеристикою, зміщеною відносно початку координат за рахунок початкової ємності (рисунок 1, в).



Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідє DSTU ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/152.00.1/Б/ОК16- 2022
	<i>Екземпляр № 1</i>	<i>Арк 64 / 31</i>

а)                                        б)                                        в)

### Рисунок 1 - Конструктивні схеми ВП ємнісних датчиків

Конструктивно ВП ємнісних датчиків можуть бути виконані з плоско паралельними, циліндричними, штирєвими електродами, з наявністю або відсутністю діелектрика між пластинами.

Перетворювачі зі зміною діелектричної проникності використовуються для вимірювання рівня рідких і сипучих матеріалів, аналізу складу і концентрації речовин в хімічній, нафтопереробній промисловості, температури, тиску, а також для підрахунку виробів, охоронної сигналізації тощо.

Для підвищення чутливості і лінійності характеристик використовують диференціальні перетворювачі, у яких зміна стану контрольованої величини призводить до зміни ємності одночасно в двох чутливих елементах, що включаються в різні плечі мостової вимірювальної схеми. У цьому випадку формується реверсивна (двотактна) статична характеристика: при зміні напрямку переміщення рухомого елемента ВП фаза вихідного сигналу змінюється на 180° щодо фази напруги живлення, що фіксується фазовим детектором. Важливе значення для підвищення чутливості ВП (чутливість визначається за формулою  $S = \Delta C/C_0$ ) має зменшення початкового значення ємності  $C_0$ , куди входить і ємність вимірювальної схеми. Якщо для ВП на малюнку 1, а, значення  $C_0$  може бути зведене до дуже незначних значень, то для інших двох схем наявність  $C_0$  неминуча.

Похибка ємнісних ВП, що визначається впливом температури і вологості, в значній мірі залежить від оптимального вибору конструкційних матеріалів і можливостей герметизації.

Переваги ємнісних ВП: простота конструкції, малі розміри і маса, висока чутливість і роздільна здатність, відсутність рухомих струмознімальних контактів, висока швидкодія, можливість функціонального перетворення за рахунок відповідного вибору форми електродів, практично повна відсутність впливу на об'єкт контролю. Недоліки ВП: порівняно низький рівень вихідного сигналу, нестабільність характеристик при зміні параметрів навколишнього середовища, вплив паразитних ємностей.

Для узгодження ємнісних ВП, що володіють досить високим вихідним опором навіть при порівняно високій частоті напруги живлення ( $10^5\text{...}10^7$  Гц), з подальшими схемами перетворення, використовуються операційні підсилювачі (ОП) з високим входним опором, які по можливості розташовуються в безпосередній близькості від ВП та ретельно екрануються. Поодинокі (не диференціальні) ВП зазвичай включаються за схемою подільника напруги (рисунок 2, а) з використанням інвертуючого

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/152.00.1/Б/ОК16- 2022
	Екземпляр № 1	Арк 64 / 32

підсилювача на ОП з конденсатором (елементом подільника в колі зворотного зв'язку). Наведені на рисунку 2, а конденсатори  $C1e$ ,  $C2e$ ,  $C3e$  імітують ємності елементів схеми щодо екранів або ліній зв'язку та практично не впливають на результат вимірювання, оскільки вони виявляються підключеними до низькоомних ланцюгів (ємності  $C1e$  і  $C3e$ ) або до точки з нульовим потенціалом (ємність  $C2e$ ); вихідна напруга схеми:

$$U_0 = U_i \cdot C1/C2. \quad (2)$$

При зазначених на схемі значеннях параметрів, що входять у формулу (2)

$$U_0 = 1 \cdot 9 \cdot 10^{-12} / 10 \cdot 10^{-12} = 0,9 \text{ В},$$

що збігається з показниками включеного на виході вольтметра.

Найбільш проста схема включення диференціального ВП ( $C1$  і  $C2$  на малюнку 2, б) реалізується на базі підсумовуючого підсилювача (ОП1 з конденсатором  $C3$  в колі зворотного зв'язку) з живленням ВП двохполярною напругою від трансформатора Т. Наведені на схемі паразитні ємності  $C1e \dots C4e$  із зазначених вище причин не впливають на роботу ВП. При одиничному коефіцієнті трансформації вихідна напруга схеми

$$U_0 = U_i \cdot (C2 - C1) / C3. \quad (3)$$

При зазначених на схемі значеннях параметрів

$$U_0 = 1(20 \cdot 0,5 - 20 \cdot 0,45) / 10 = 0,1 \text{ В},$$

що і реєструється включеним на виході вольтметром.

Недоліком розглянутої схеми є неможливість заземлення ВП, що часто потрібно на практиці. Для виключення цього недоліку можна використовувати мостову схему включення ВП (елементи  $C1$ ,  $C2$  і  $C12$  на рисунку 2, в) з використанням диференціального підсилювача на двох ОП, в якому резистивні елементи ланцюга зворотного зв'язку замінені на ємнісні. Коефіцієнт передачі такого підсилювача дорівнює  $1 + C3/C4$ , а характеристика перетворення ВП на його базі.

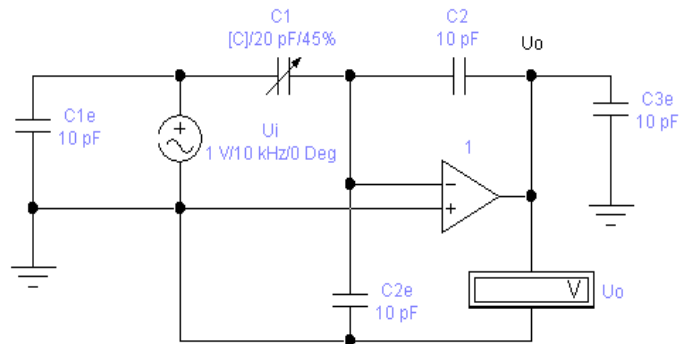
$$U_0 = U_i \cdot (C1 - C2)(1 + C3/C4) / (1 + C1/C12)(1 + C2/C12). \quad (4)$$

При зазначених на схемі значеннях параметрів отримуємо:

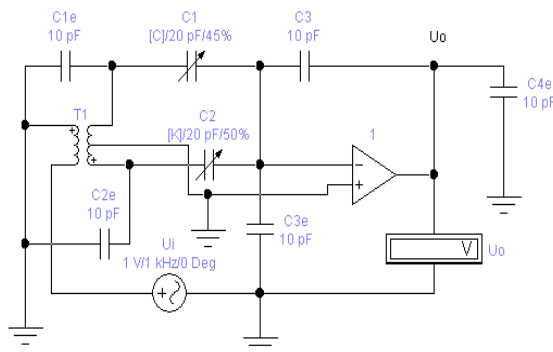
$$U_0 = 1(20 \cdot 0,55 - 20 \cdot 0,5)(1 + 1/1) / (1 + 20 \cdot 0,55/10)(1 + 20 \cdot 0,5/10) = 0,0476 \text{ В},$$



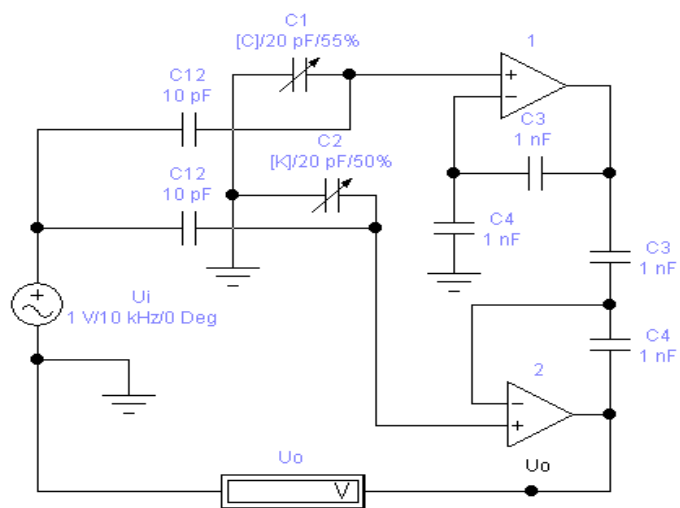
що практично збігається з показаними на схемі результатами вимірювання.



а)



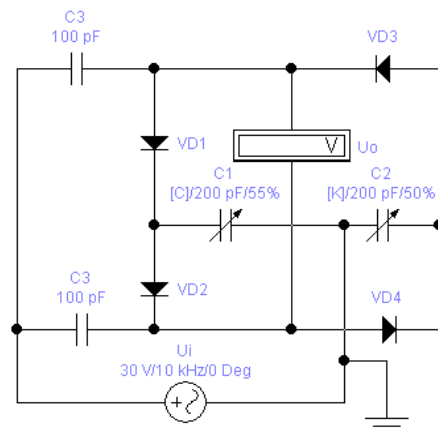
б)



в)

Рисунок 2 - Схеми включення ВП ємнісних датчиків (а, б, в)

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/152.00.1/Б/ОК16- 2022
	Екземпляр № 1	Арк 64 / 34



з)

Рисунок 2 - Схеми включення ВП ємнісних датчиків по мостовій схемі

Ще один варіант включення диференціального ВП з можливістю заземлення потрібної пари електродів (рисунок 3) являє собою по суті мостовий випрямляч на діодах VD1...VD4, в одну діагональ якого включений ємнісний ВП на C1, C2, а до другої діагоналі через конденсатори C3 підключено джерело вимірювальної напруги  $U_i$ , при кожному напівперіод якого відкривається відповідна пара діодів - VD1, VD4 або VD2, VD3. При цьому кожен з конденсаторів C3 з'єднується послідовно, то з ємністю C1, то з ємністю C2 перетворювача. При порушенні рівності ємностей C1 і C2 струми через конденсатори C3, що протікають в позитивному і негативному напрямках, будуть не рівні між собою, в результаті чого на цих конденсаторах формується постійна напруга, величина якої визначається наближеним співвідношенням:

$$U_0 = U_i \cdot (C_1 - C_2) / (C_1 + C_2 + 2 \cdot C_1 \cdot C_2 / C_3).$$

При зазначених на схемі значеннях параметрів отримуємо:

$$U_0 = 30(200 \cdot 0,55 - 200 \cdot 0,5) / (200 \cdot 0,55 + 200 \cdot 0,5 + 2 \cdot 200 \cdot 0,55 \cdot 200 \cdot 0,5 / 100) = 0,698 \text{ В},$$

що на 3,5% менше отриманого при моделюванні.

## 2. Порядок виконання роботи

1. Керуючись формулою (1), в схемі на малюнку 2, а включите ємнісний ВП (C1) таким чином, щоб отримати лінійну характеристику перетворення.

2. Використовуючи формулу (4), досліджуйте (з перевіркою на

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/152.00.1/Б/ОК16- 2022
	Екземпляр № 1	Арк 64 / 35

моделі) залежність функцій перетворення від ємності конденсатора СЗ.

### 3. Зміст звіту

Найменування і мета роботи, коротка характеристика ємнісних перетворювачів і використовуваних приладів програми EWB, схеми модельованих конденсаторних ВП та результати їх дослідження, відповіді на контрольні питання, висновки по роботі.

### 4. Контрольні питання

1. Ємнісні перетворювачі (ЄП). Класифікація.
2. Ємнісні перетворювачі. Схеми включення.
3. Ємнісні перетворювачі. Переваги і недоліки.
4. Приклади застосування ЄП.
5. Призначення ЄП.
6. Конструктивні різновиди ЄП.
7. Застосування ЄП.
8. Принцип дії, чутливість ємнісного перетворювача.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/152.00.1/Б/ОК16- 2022
	Екземпляр № 1	Арк 64 / 36

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6

**Тема:** дослідження електромагнітних вимірювальних перетворювача

**Мета роботи:** вивчити принципи побудови і функціонування електромагнітних вимірювальних перетворювачів, досліджувати електричні схеми магнітних датчиків в середовищі Electronics Workbench.

### 2. Короткі теоретичні відомості

Вимірювальні перетворювачі (ВП) електромагнітних датчиків складають велику групу перетворювальних пристроїв для вимірювання різних фізичних величин. В залежності від принципу дії, вони можуть бути як параметричними, так і генераторними. До параметричних відносяться ВП, що перетворюють зміну входного механічного впливу в зміну параметрів магнітного кола: магнітного опору, індуктивності і взаємоіндуктивності обмоток (рис. 1,а), магнітної проникності (рис. 1,б); до генераторних відносяться ВП індукційного типу, засновані на електромагнітній індукції і реалізовані на базі трансформаторів (рис. 1,в) і електричних машин.

Якщо знехтувати потоками розсіювання, то для ВП на рис. 1, а формули для розрахунку індуктивності  $L$  і взаємоіндуктивності  $M$  обмоток мають такий вигляд:

$$L = w_1^2 / (R_M + R_B); \quad M = w_1 w_2 / (R_M + R_B), \quad (1)$$

де  $L$  - середня довжина магнітного шляху;

$w_1, w_2$  - число витків первинної і вторинної обмоток;

$R_M = L / \mu_a S$  - опір феромагнітного ділянки магнітного кола 2 і верхньої рухомої частини 1 (якоря);

$R_B = \delta / \mu_0 S$  - опір повітряного зазору між якорем 1 і основним магнітопроводом 2;

$\mu_a = \mu \mu_0$  - магнітна проникність феромагнітного матеріалу;

$\mu$  - відносна магнітна проникність матеріалу, (для сталей  $\mu = 200 \dots 5000$ );

$\mu_0$  - магнітна постійна,  $\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6} \text{ В} \cdot \text{с} / (\text{А} \cdot \text{м})$ ;

$S$  - поперечний переріз магнітопровода.

Як впливає з формули (1) і рис. 1,а, значенням  $L$  і  $M$  можна управляти:

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/152.00.1/Б/ОК16- 2022
	Екземпляр № 1	Арк 64 / 37

- змінюючи зазор між якорем 1 і магнітопроводом 2, шляхом переміщення якоря 1 у вертикальній площині;
- змінюючи переріз магнітного потоку при обертанні якоря відносно нерухомої частини магнітного ланцюга 2;
- вводячи в повітряний зазор пластину 3 з феромагнітного або електропровідного немагнітного матеріалу і тим самим зменшуючи або збільшуючи магнітний опір повітряного зазору.

Перетворювачі переміщення в зміну індуктивності називаються індуктивними, а перетворювачі переміщення в зміну взаємоіндуктивності - трансформаторними.

У трансформаторних ВП зміну взаємоіндуктивності  $M$  можна отримати не тільки при зміні магнітного опору, а й при переміщенні однієї з обмоток уздовж або поперек магнітного ланцюга. Крім П-подібної конструкції магнітопроводу (див. рис. 1,а) в диференціальних трансформаторних ВП використовують і Ш-подібну; в цьому випадку обмотки з числом витків  $w_1 = w_2$  на двох крайніх осердях включаються зустрічно-послідовно і підключаються до джерела вимірювальної напруги, а третя обмотка, що розташовується на середньому осерді магнітопроводу, є вихідною.

Третій тип електромагнітного ВП - магнітопружний (рис. 1,б), заснований на зміні магнітної проникності замкнутого осердя під впливом зусилля, що стискає, розтягує або скручує, згідно з (1), призводить до зміни магнітного опору осердя і відповідно до зміни  $L$  або  $M$ .

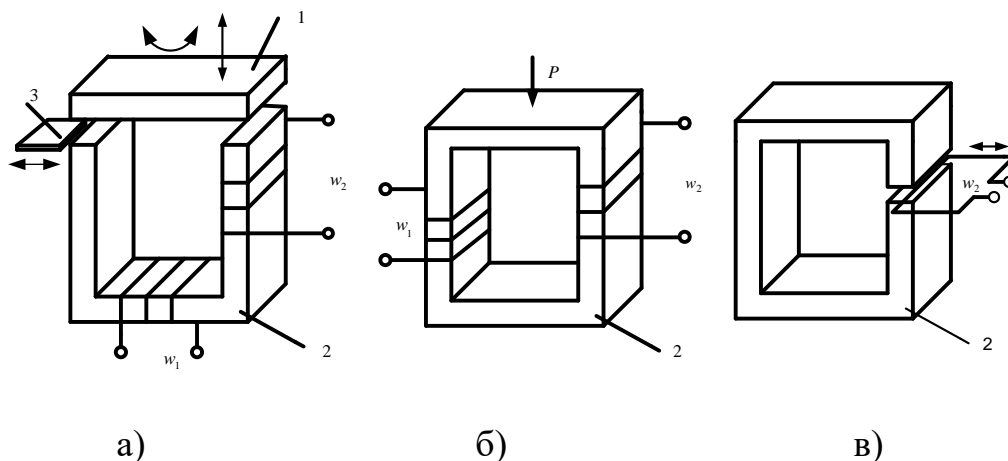


Рисунок 1 – Конструктивні схеми електромагнітних ВП:  
а - взаємоіндуктивності обмоток; б - магнітної проникності;  
в - на базі трансформаторів

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/152.00.1/Б/ОК16- 2022
	Екземпляр № 1	Арк 64 / 38

У загальному випадку магнітопружний ефект має нелінійний характер і залежить від напруженості магнітного поля. Відносна чутливість магнітопружних ВП характеризується (подібно тензорезисторами) коефіцієнтом чутливості

$$K_T = (\Delta\mu/\mu) / (\Delta L/L),$$

який може досягати декількох сотень; при використанні ВП для вимірювання зусилля його чутливість становить кілька мілівольт на ньютон (мВ/Н).

Живлення магнітопружних ВП здійснюється найчастіше від мережі промислової частоти, однак при динамічних вимірюваннях частота струму живлення повинна бути в 5–10 разів вище частоти контрольованого процесу. Похибка магнітопружних ВП визначається в основному температурною нестабільністю (близько 2% на 10 °С), гистерезисом (близько 4% при статичних і 1% при динамічних навантаженнях) і часовою нестабільністю (після декількох циклів термообробки і багаторазового навантаження (штучне старіння) - до 0,5% для ВП з суцільного матеріалу і до 2% - з листового).

Четвертий тип електромагнітного ВП - індукційний (див. рис. 1,в), заснований на явищі електромагнітної індукції: наведена ЕРС в котушці, що переміщається в магнітному полі, прямо пропорційна числу витків  $w_2$  і швидкості зміни магнітного потоку  $d\Phi/dt$  (або швидкості переміщення котушки при постійному потоці).

Схема включення моделі однотактного індуктивного ВП являє собою послідовний  $RL$ -ланцюг (рис. 2,а), на якій ВП представлений змінною індуктивністю  $L$ , керованою однойменною клавішею клавіатури. Опір навантаження  $R_n$  вибрано рівним індуктивному опору ВП на робочій частоті джерела вимірювальної напруги  $U_i$ ; опір  $R_a$  - активний опір обмотки ВП. Чинне значення струму в  $RL$ -ланцюзі, що вимірюється амперметром,

$$I = U_i / [(R_a + R_n)^2 + (2\pi fL)^2]^{1/2}. \quad (2)$$

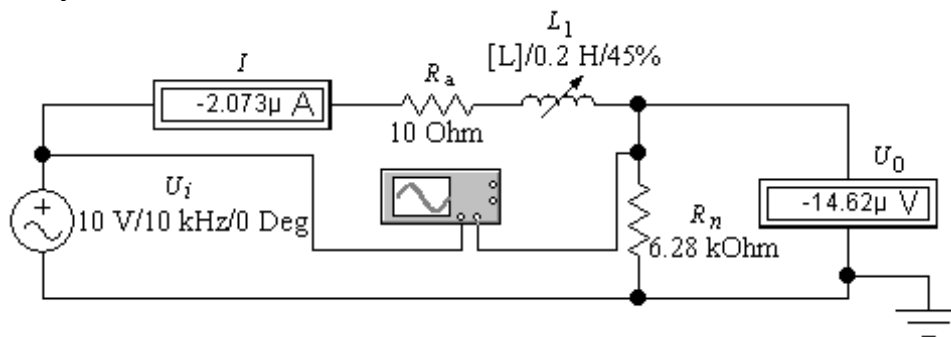
Для моделі  $I = 10 / [(10 + 6280)^2 + (2\pi \cdot 10^4 \cdot 0,2 \cdot 0,5)^2]^{1/2} = 1,125$  мА збігається з виміряним. Вихідна напруга схеми  $U_0 = IR_n = 1,125 \cdot 10^{-3} \cdot 6280 = 0,7065$  В також збігається з показаннями вольтметра  $U_0$ . Якщо ВП використовується для вимірювання лінійного переміщення, то після підстановки з (3) значення індуктивності  $L = f(\delta)$  в (2) знаходимо:  $U_0 = R_n U_i / [(R_a + R_n)^2 + (2\pi f w^2 \mu_0 S / \delta)^2]^{1/2}$ , де  $w$  - число витків обмотки ВП. Якщо параметри ВП вибрати з умови  $(R_a + R_n) \ll \ll (2\pi f w^2 \mu_0 S / \delta)$ , то

$$U_0 = \delta R_n U_i / 2\pi f w^2 \mu_0 S = K\delta, \quad (3)$$

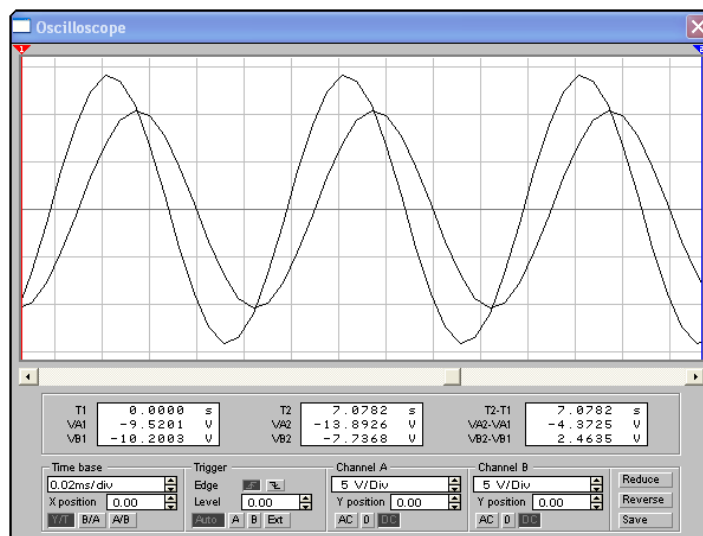
де  $K = R_n U_i / 2\pi f w^2 \mu_0 S$  - коефіцієнт перетворення, В/м.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідас ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/152.00.1/Б/ОК16- 2022
	Екземпляр № 1	Арк 64 / 39

Через низку недоліків однотактні ВП не знайшли широкого поширення і використовуються переважно в якості допоміжних пристроїв, наприклад, зворотних ВП у компенсаційних схемах. Більш поширеними в практиці вимірювань і контролю є диференціальні ВП, які містять додатковий магнітопровід, аналогічний магнітопроводу 2 на рис. 2,а і дзеркально розташований щодо нього. Схема включення такого ВП (див. рис. 3,а,б) містить трансформатор  $T$ , до вторинної обмотки якого підключені обмотки ВП; навантаження  $R_n$  підключається між середньою точкою вторинної обмотки трансформатора і середньою точкою обмоток ВП. Струм, що протікає по опору навантаження, дорівнює різниці струмів через обмотки ВП; якщо їх індуктивності рівні між собою, вихідна напруга дорівнює нулю.



a)



б)

Рисунок 2 - Схема включення однотактного індуктивного ВП (а) і результати осцилографічних вимірювань (б)

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідас ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/152.00.1/Б/ОК16- 2022
	Екземпляр № 1	Арк 64 / 40

Вважаючи, що на виході кожної половинки вторинної обмотки напруга дорівнює  $U_i$ , і застосовуючи до ланцюга на рис. 3, а метод накладання, знаходимо, що струм в навантаженні

$$I = U_i \Delta L / L [R_n^2 + (2\pi f L_1 L_2 / L)^2]^{1/2}, \quad (4)$$

де  $\Delta L = L_1 - L_2$ ;  $L = L_1 + L_2$ .

Для моделі на малюнку 3, б  $\Delta L = 0,2 \cdot 0,51 - 0,2 \cdot 0,49 = 0,004$  Гн;  $L = 0,2 \cdot 0,51 + 0,2 \cdot 0,49 = 0,2$  Гн; на підставі (4) струм в навантаженні  $I = 28,48$  мкА і вихідна напруга  $U_0 = IR_n = 178,9$  мВ, що практично збігається з показаннями приладів. Зауважимо, що  $L_1 L_2 = L_2 - \Delta L = L_2$  і це дозволяє спростити формулу (4), тоді вираз для вихідної напруги схеми можна записати в наступному вигляді:

$$U_0 = R_n U_i \Delta L / L [R_n^2 + (2\pi f L)^2]^{1/2}. \quad (5)$$

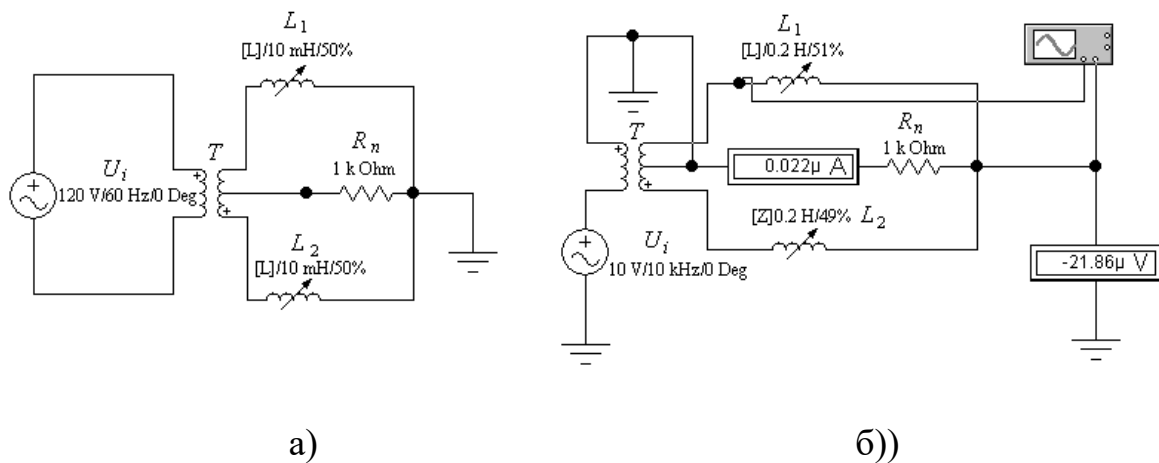


Рисунок 3 – Схема включення диференціального індуктивного ВП:  
а - для проведення розрахунків; б - для проведення вимірювань

### 3. Порядок виконання роботи

Підготувати і досліджувати схеми моделей для вивчення електромагнітних ВП при включенні їх за схемами, наведеними на рис. 2 і 3. При дослідженнях використовувати прилади електронної лабораторії

### 4. Зміст звіту

Найменування і мета роботи, коротка характеристика електромагнітних перетворювачів і використовуваних приладів програми



Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/152.00.1/Б/ОК16- 2022
	Екземпляр № 1	Арк 64 / 41

EWB, схеми модельованих ВП та результати їх дослідження, відповіді на контрольні питання, висновки по роботі.

## 5. Контрольні питання

1. Назвіть типи електромагнітних ВП і дайте їх коротку характеристику?
2. Використовуючи формули (2) і (5), визначте оптимальне значення частоти, при якій вихідний сигнал схем на рис. 2 і 3 максимальний.
3. У якому випадку вихідний сигнал схеми на рис. 2 не буде залежати від частоти вимірювальної напруги?
4. Формула (3) отримана в припущенні, що  $R_M \ll R_B$ . Однак при малих значеннях повітряного зазору  $\delta$  ця умова може бути порушена внаслідок істотного зменшення  $R_B$ . Яким чином це позначиться на функції перетворення однотактного ВП? Складіть аналітичний вираз  $U_o = f(\delta)$  для цього випадку.
5. Використовуючи формули (1) і (5), складіть вираз  $U_o = f(\delta)$  для диференціального ВП.
6. Оцініть силу впливу однотактного ВП на об'єкт контролю при  $\delta = 0,1$  мм і струмі обмотки 2 мА (діюче значення). При цьому необхідно врахувати, що на змінному струмі зусилля, що розвивається  $P_e = 0,5w^2\mu_0S[I_m^2 \times \sin^2\omega t / \delta^2]$ , где  $I_m$  – амплітуда струму.
7. Яким чином позначиться на характеристиці однотактного ВП насичення магнітного кола?
8. Використовуючи результати осцилографічних вимірювань (див. рис. 2, б), проведіть дослідження фазових співвідношень в схемі однотактного ВП і зробіть висновок про можливість отримання реверсивної характеристики перетворення.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/152.00.1/Б/ОК16- 2022
	Екземпляр № 1	Арк 64 / 42

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 7

**Тема:** дослідження терморезистивних перетворювачів

**Технічне забезпечення:** ПЕОМ, віртуальний стенд

### Короткі теоретичні відомості

Вимірювання температури термометрами опору (ТО) ґрунтується на властивості провідників і напівпровідників змінювати свій електричний опір при зміні їх температури. Таким чином, омичний опір провідника чи напівпровідника являє собою деяку функцію його температури  $R = f(t)$ . Вигляд цієї функції залежить від природи матеріалу.

Термометри опору в порівнянні з манометричними термометрами володіють наступними перевагами: більш високою точністю вимірювання, можливістю передачі показів на великі відстані, можливість централізації контролю температури шляхом приєднання (через перемикач) декількох термометрів до одного вимірювального прибору, меншою затримкою показів. Недолік термометрів опору – необхідність у сторонньому джерелі струму.

Для виготовлення чутливих елементів серійних термометрів опору використовуються чисті метали. До металів висувають такі основні вимоги:

1. Метал не повинен окислюватися і вступати в хімічну взаємодію з вимірювальним середовищем.
2. Температурний коефіцієнт електричного опору металу повинен бути достатньо великим і незмінним. Цей коефіцієнт визначається відношенням

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100 R_0},$$

де  $R_0$  і  $R_{100}$  – опори термометра відповідно при 0 і 100 °С.

Для більшої кількості металів  $\alpha \approx 4 \cdot 10^{-3} / \text{град}$ .

3. Опір повинен змінюватися зі зміною температури по прямій чи плавній кривій без різких відхилень і явищ гістерезису.

4. Питомий електричний опір металу повинен бути достатньо великим: чим більший питомий опір, тим менше потрібно металу для отримання необхідної першопочаткової величини опору термометра.

Вказаним вимогам у певних температурних межах найбільш повно відповідають платина, мідь, нікель, залізо.

Промисловість випускає два види термометрів опору, які відрізняються матеріалом робочого провідника, – платинові (ТОП) і мідні

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/152.00.1/Б/ОК16- 2022
	Екземпляр № 1	Арк 64 / 43

(ТОМ). Кожен з видів термометрів має своє градуювання, якому відповідають відповідні значення опорів при 0 °С ( $R_0$ ):

Таблиця 4.1 – Градуювання і опір термометрів опору.

Вид термометра опору	Градуювання	$R_0$ , Ом
ТОП	20	10
ТОП	21	46
ТОП	22	100
ТОМ	23	53
ТОМ	24	100

Залежність опору ТОП і ТОМ від температури близька до лінійної.

Термоперетворювачі ділять на такі групи:

за призначенням – занурні, поверхневі, кімнатні;

за умовами експлуатації – стаціонарні і переносні;

за захищеністю від впливу зовнішнього середовища з боку виводів – з звичайною і вибухобезпечною головками, а також без головки (з спеціальною зарубкою вивідних кінців);

за захищеністю від впливу вимірювального середовища – на захищені та незахищені від впливу агресивних і неагресивних середовищ;

за герметичністю по щодо вимірювального середовища – звичайні і герметичні, розраховані на умовний тиск і температуру;

за стійкістю до механічних впливів – звичайні, вібростійкі, ударостійкі;

за інерційністю – великої інерційності (ВІ), середньої інерційності (СІ), малоінерційні (МІ);

за кількістю зон, в яких вимірюється температура – однозонові і багатозонові;

за кількістю вихідних провідників, які з'єднують чутливі елементи термометрів опору з його затискачами – з двома, трьома, чотирма провідниками;

за використанням – призначені для роботи у звичайних або тропічних умовах (вологозахищене виконання);

за точністю – термометри опору класів I, II, III.

Визначальними властивостями ТО являються інерційність і клас точності.

Інерційність характеризується показниками теплової інерції. Показник теплової інерції ТО являє собою час, необхідний для того, щоб при внесенні ТО в середовище з постійною температурою різниця температури середовища і будь-якої точки ТО склала б 0,37 значення

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідас ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/152.00.1/Б/ОК16- 2022
	Екземпляр № 1	Арк 64 / 44

температури, яку мало середовище в момент настання регулярного теплового режиму.

Показник теплової інерції ТО, визначений при коефіцієнті тепловіддачі, який рівний нескінченості, не повинен перевищувати такі значення:

- для ТО з великою інерційністю – 4 хв;
- для ТО з середньою інерційністю – 1 хв 20 с;
- для ТО малоінерційних – 9 с.

Клас точності ТО визначається межами допустимих основних і додаткових похибок, а також іншими властивостями, які впливають на точність вимірювання, значення яких встановлюється стандартом.

У ТОП класу I допустимі відхилення значень опору при 0 °C  $R_0$  від номінального становлять  $\pm 0.05\%$ , а в ТОП класу II  $\pm 0.1\%$ . В ТОМ класів II і III допустимі відхилення значень  $R_0$  від номінальних становлять  $\pm 0,1\%$ . Аналогічно відношення опору чутливого елемента ТО при 100 °C до опору при 0 °C ( $R_{100}/R_0$ ) повинно бути: для ТОП класу I –  $1,391 \pm 0.0007$ ; для ТОП класу II –  $1,391 \pm 0.001$ ; для ТОМ класу II –  $1,426 \pm 0.001$ ; для ТОМ класу III –  $1,426 \pm 0.002$ .

Термоперетворювачі опору платинові випускають двох модифікацій: одинарні і подвійні. В одинарний ТОП вмонтований один чутливий елемент. У подвійному ТОП в загальну арматуру вмонтовані два чутливі елемента, електрично не пов'язаних між собою. Кожен чутливий елемент має свою пару затискачів в головці ТОП. Подвійний ТОП призначений для роботи з двома вторинними пристроями, одинарний – з одним. Термоперетворювачі опору мідні бувають тільки одинарні.

у результаті використання напівпровідникової техніки для вимірювання температур, особливо в середньому діапазоні, широко поширенні напівпровідникові термоперетворювачі опору. Їх робочий діапазон визначають таким чином: нижня межа повинна відповідати температурі, при якій напівпровідник стає ізолятором, а верхня – так званій допустимій температурі, вище від якої в напівпровіднику відбуваються незворотні зміни.

Істотний недолік напівпровідникових матеріалів – відсутність потрібного відтворення градууювальної характеристики. Тому напівпровідникові ТО навіть одного і того ж типу не взаємозамінні і мають індивідуальні градууювальні таблиці.

## Хід роботи

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідас ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/152.00.1/Б/ОК16- 2022
	Екземпляр № 1	Арк 64 / 45

Запустити схему дослідження (рисунок 4.1). Вибрати платиновий термометр опору. Записати значення вихідного сигналу для різних значеннях температури. Побудувати графік.

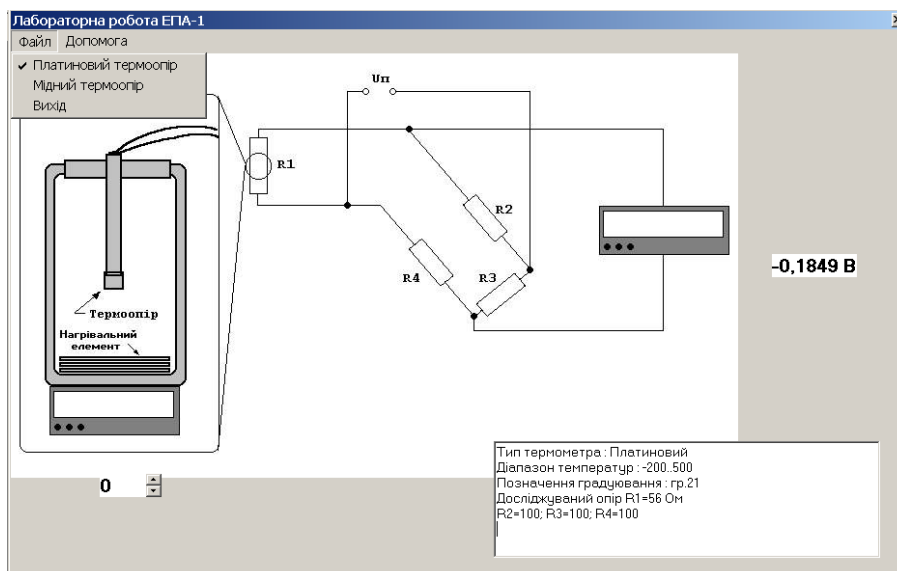


Рисунок 4.1 – Схема проведення лабораторної роботи

Повторити дослідження для мідного термометра опору.

### Контрольні питання

- 1 Принцип роботи термоперетворювачів опору.
- 2 Вимоги до матеріалів чутливих елементів серійних термометрів опору.
- 3 Класифікація термометрів опору.
- 4 Клас точності термометрів опору.
- 5 Переваги і недоліки різних типів терморезисторів.
- 6 Застосування терморезисторів для вимірювання неелектричних величин.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/152.00.1/Б/ОК16- 2022
	Екземпляр № 1	Арк 64 / 46

## Лабораторна робота № 8

**Тема:** дослідження термоелектричних перетворювачів

**Мета:** Ознайомлення з роботою термоелектричних термо-метрів  
**Мета роботи:** вивчити принципи побудови і функціонування термометричних вимірювальних перетворювачів, досліджувати електричні схеми термодатчиків в середовищі Electronics Workbench.

### 3. Короткі теоретичні відомості

Вимірювальні перетворювачі (ВП) термометричних датчиків застосовують не тільки для вимірювання температури, але і таких пов'язаних з нею величин, як тепловий потік, швидкість потоку газу або рідини, витрата, хімічний склад і тиск газів, вологість, НВЧ-потужність, рівень рідини і т. п. При практичній реалізації термометричні ВП найбільш часто використовується явище термоелектрики і залежність опору матеріалів від температури.

**Термоелектричні ВП** (термопари) представляють собою конструкцію з двох різнорідних провідників або напівпровідників (АВ і ВГ на рис. 1, а-в), місця з'єднання (спаї) яких (точки  $T_0$  і  $T_B$ ) мають різну температуру. При невеликому перепаді температур між спаями термоЕРС можна вважати пропорційною різниці температур:

$$\Delta T = T_B - T_0, \text{ т. ч. } E_{AB} = E_{BG} = K\Delta T, \quad (1)$$

де  $K$  - коефіцієнт перетворення.

Якщо до точок  $A, B$  підключити мілівольтметр (див.рис. 1, б), то за умови, що температура в цих точках дорівнює  $T_0$ , він буде вимірювати ЕРС, яка визначається формулою (1). Такі ж результати отримаємо і в разі включення мілівольтметра за схемою на рис. 1,в. Щоб отримати достовірні результати, необхідно спай термопари  $B-T_0$ -Г, що називається робочим, помістити в об'єкт з контрольованою температурою  $T_0$ , а температуру  $T_0$  неробочого (холодного, вільного) спаяю  $A-T_0$ -В підтримувати постійною (при особливо відповідальних вимірах для цього використовують спеціальні засоби термостатування). Зазвичай термоЕРС не розраховують аналітично, а визначають по градуювальним таблицям або графікам, одержуваних експериментально, для різних матеріалів при температурі холодних спаїв  $T_0 = 0$ .

В якості матеріалів для термопар використовують як дорогоцінні метали (платина, золото, іридій, родій і їх сплави), так і звичайні метали

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/152.00.1/Б/ОК16- 2022
	Екземпляр № 1	Арк 64 / 47

(сталі, нікель, хром, сплави ніхром, копель, алюмель і ін.). Порівняно рідко (через низьку механічну міцність) застосовують термопари з напівпровідникових матеріалів (кремнію, селену і ін.), які забезпечують більшу термоЕРС в порівнянні з металами, хоча і мають більший внутрішній опір.

ТермоЕРС виникає тільки в спаях різнорідних матеріалів. При цьому в якості базової використовується термоЕРС платини, по відношенню до якої визначаються термоЕРС інших матеріалів.

Наприклад, якщо термопара складена з хромелю з термоЕРС  $+31,3$  мкВ/°С і алюмелю з термоЕРС  $-10,2$  мкВ/°С, то термоЕРС термопари хромель-алюмель складе  $31,3 + 10,2 = +41,5$  мкВ/°С. Для підвищення вихідної ЕРС використовується послідовне включення термопар, що утворює термобатарею, вільні спаї якої повинні знаходитися при постійній температурі (в ідеальному випадку - при  $0$  °С). У деяких випадках застосовують спеціальні термопари: іридій-іридій-родієві - для вимірювання температури до  $2000$  °С; вольфрам-вольфрам-молибденові - для вимірювання температур понад  $2000$  °С; вольфрам-молибденові - для вимірювання в діапазоні до  $2600$  °С; тантал-молибденові - до  $2600$  °С; вольфрам-танталові - до  $3000$  °С.

Для підключення термопар до вимірювальних приладів або інших перетворювачів використовують так звані подовжувальні термоелектроди (на рис. 1,а-в - провідники *АВ* і *ВГ*), до яких для забезпечення мінімальної похибки висувають такі вимоги: термоЕРС подовжувача електрода повинна бути рівною термоЕРС основного електрода; місце приєднання подовжувальних термоелектродів до основних термоелектродів термопари повинно мати однакову температуру.

Для термопар платина-родій-платина, що випускаються промислово, застосовують подовжувальні електроди з міді і сплаву ТП, для термопар хромель-алюмель - з міді і константану, для термопар хромель-копель - матеріал основних термоелектродів у вигляді гнучких виводів.

Залежно від призначення термопари діляться на такі, що занурюються (заглиблені) – призначені для вимірювання температури рідких і газоподібних середовищ, і поверхневі – призначені для вимірювання температури поверхні. Зазвичай термопари поміщають в захисний чохол з металу або кераміки; для ізоляції використовують скло, азбест, фарфор, шамот, а при низьких температурах - шовкову або емалеву ізоляцію. Використання таких захисних засобів приводить до суттєвого підвищення інерційності термопар.

Тому в найбільш гіршому випадку динаміка термопар описується передавальним коефіцієнтом

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/152.00.1/Б/ОК16- 2022
	Екземпляр № 1	Арк 64 / 48

$$K(p) = K / [p^2 T_1 T_2 + p \cdot (T_1 + T_2 + T_3) + 1], \quad (2)$$

де  $T_1, T_2, T_3$  – постійні часу відповідно захисної оболонки, самої термопари і теплообміну між оболонкою і термопарою.

Оскільки в більшості випадків  $T_1 \ll T_2$ , то приймається:

$$K(p) = K / [p(T_2 + T_3) + 1].$$

Залежно від інерційності розрізняють термопари мало інерційні, теплова постійна часу яких не перевищує 5 с для заглибних і 10 с для поверхневих; середньої інерційності - відповідно не більше 60 і 120 с і великий інерційності - з тепловою постійною 180 і 300 с.

Переваги термоелектричних ВП: великий діапазон вимірюваних температур, простота пристрою, надійність в експлуатації.

Недоліки термоелектричних ВП: невисока чутливість, велика інерційність, необхідність підтримки постійної температури вільних спайів.

Вимірювання термоЕРС проводиться з використанням звичайних методів вимірювання напруги з використанням мілівольтметрів (як на рис. 1,б) або потенціометричних схем з ручним (див. рис. 1,г) або автоматичним врівноваженням. При використанні мілівольтметрів опір термопари (разом з сполучними проводами) приймається рівним 5 Ом і коригується при налагоджувальних роботах з використанням додаткових резисторів з манганіну.

При потенціометричних вимірюваннях ця операція не обов'язкова, оскільки (див. рис. 1, г) після врівноваження схеми на виході керованого (в даному випадку - вручну) дільника  $R_0$  формується напруга, рівна і протилежна за знаком термо-ЕРС  $E_x$ , в результаті чого струм через внутрішній опір термопари  $R_x$  дорівнює нулю (див. показання гальванометра  $G$ ) і, отже, значення цього опору в даному випадку несуттєво. В якості зразкової напруги  $U_0$  в потенціометрії використовують високоточні гальванічні (нормальні) елементи технічного застосування (ненасиченого типу); в даному випадку це елемент типу Е-303 класу 0,02%, (гарантована точність 0,02%); для відповідальних вимірювань, наприклад, при перевірці приладів використовують насичені нормальні елементи класу 0,005 і 0,001.



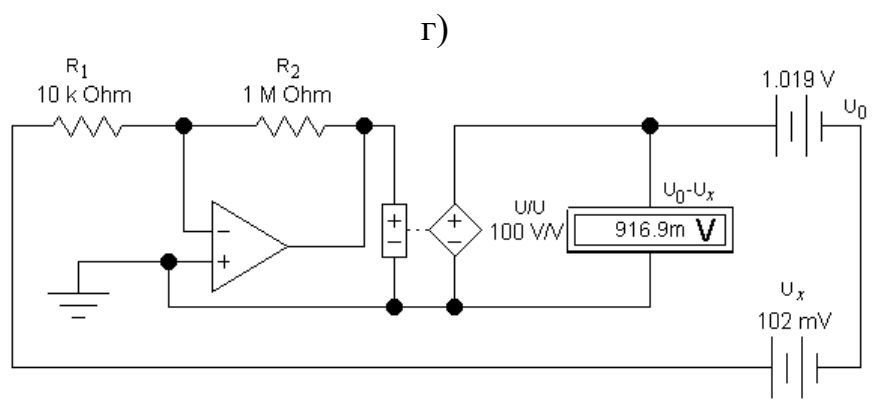
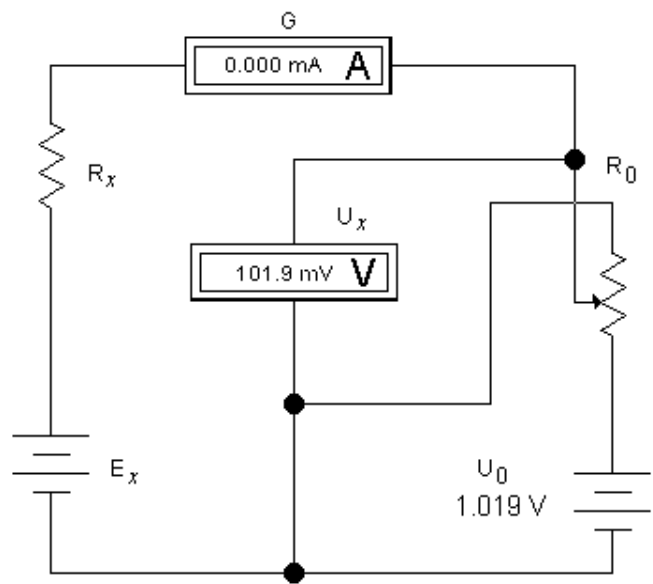
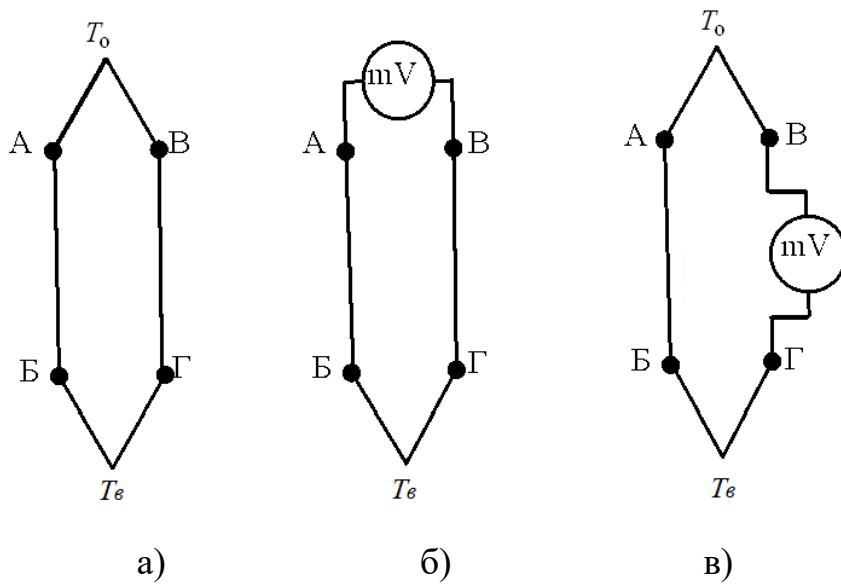


Рисунок 1 – Конструктивні схеми термоелектричних ВП (а-в) і потенціометричні схеми вимірювання термо-ЕРС (г,д)

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/152.00.1/Б/ОК16- 2022
	Екземпляр № 1	Арк 64 / 50

В автоматичних потенціометрів як нуль-орган ("гальванометр") використовується високочутливий підсилювач, побудований за схемою МДМ (модулятор-демодулятор); сформований на його виході сигнал неузгодженості подається на реверсивний двигун, який переміщує повзунок реохорда в ту чи іншу сторону до повного урівноваження схеми.

Схема моделі автоматичного потенціометра містить (див. рис. 1,д) інвертуючий підсилювач на ОП з коефіцієнтом передачі  $R_2/R_1 = 100$  (нуль-орган) і кероване джерело напруги  $U/U$  з коефіцієнтом передачі 100, що виконує роль виконавчого органу і формує напругу компенсації  $U_0 - U_x$ , що вимірюється однойменним вольтметром. Як впливає із показань вольтметра, вони відповідають розрахунковим значенням

$$U_0 - U_x = 1019 - 102 = 917 \text{ мВ.}$$

**Терморезисторні ВП** засновані на властивості провідників і напівпровідників змінювати свій електричний опір при зміні температури. Для таких ВП використовують матеріали, що володіють високим температурним коефіцієнтом опору (ТКО) і його стабільністю, високою відтворюваністю електричного опору при даній температурі, значним питомим електричним опором, стабільністю хімічних і фізичних властивостей при нагріванні, інертністю до впливу контрольованого середовища. До таких матеріалів відносяться платина, мідь, нікель, вольфрам і ін.; найбільшого поширення набули платинові і мідні терморезистори.

Недоліки платинових ВП: висока забрудненість платини парами металів (особливо заліза) при високих температурах, порівняно невисока хімічна стійкість в відновлювальному середовищі, внаслідок чого матеріал стає крихким і втрачає стабільність характеристик. Мідні ВП відрізняються низькою вартістю; їх застосування обмежується діапазоном температур 50-180 °С в середовищах з низькою вологістю і відсутністю агресивних газів. Нікель, хімічно стійкий матеріал навіть при високих температурах, має складну залежність опору від температури і невисоку її відтворюваність (повторюваність результатів). Тугоплавкі метали - вольфрам, молібден, тантал, ніобій - застосовують рідко через вплив температури на структуру металу, що робить його крихким. Сплави, що володіють більш високим питомим опором, ніж чисті метали, як матеріали для перетворювачів не використовують через порівняно низький ТКО, значення якого в значній мірі залежить від кількісного і якісного складу домішок.

Термометри опорів з платиновими (ТСП) і мідними (ТСМ) чутливими елементами, що випускаються промисловістю, володіють найбільшою надійністю і забезпечують точність вимірювання 0,001 °С в діапазоні температур - від мінус 200 до плюс 1100 °С. Основним недоліком

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідас ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/152.00.1/Б/ОК16- 2022
	Екземпляр № 1	Арк 64 / 51

цих термометрів є великі габарити, що обмежує їх застосування при вимірах температур в малих об'ємах.

**Напівпровідникові ВП** опору в основному представлені напівпровідниковими термооперами (термісторами), опір яких, на відміну від металевих термометрів, збільшується з пониженням температури, що пов'язано зі зменшенням рухливості носіїв і їх кількості. Недоліком термісторів є нелінійність характеристик: їх опір змінюється за експоненціальним законом.

На основі мідно-марганцевих і кобальто-марганцевих з'єднань промисловістю випускаються термістори КМТ-1, КМТ-4, ММТ-4, ММТ-6 і ін.; вони виготовляються у вигляді стрижнів (ММТ-1, КМТ-1 і ін.), а також у вигляді дисків (ТОС-М) або кульок (бусинок). Термістори кулькової форми монтується на тонких проводах в вакуумованій або наповненій газом ампулі. Невеликі габарити і низька теплоємність термісторів забезпечують менші значення постійної часу в порівнянні з іншими термометрами опору; вони дозволяють вимірювати температуру з точністю до 0,0005 °; діапазон вимірюваних температур - від мінус 60 до плюс 180 °С.

**Вугільні термометри опору** виготовляють з графіту і вугілля. При низьких температурах графіт має негативний ТКО, що залежить від вмісту домішок і від розміру кристалічних зерен; для чистого графіту питомий опір при низьких температурах обернено пропорційний температурі. Графіт не втрачає своїх властивостей і при високих температурах і тому може застосовуватися для вимірювання температур до 2300 °С.

## 5. Порядок виконання роботи

1. Підготувати і досліджувати схеми моделей для вивчення термометричних ВП при включенні їх за схемами, наведеними на рис. 1, г і рис. 1.д. При дослідженнях використовувати прилади електронної лабораторії ЕВВ.

2. Надати опис, схеми включення, навести характеристики і градууювальні таблиці (з шагом 50 °С) термопари, що задана в таблиці у відповідності з номером варіанта.

№	Тип термопари
1	ТЖК
2	ТВР
3	ТХК
4	ТХА
5	ВМ
6	ТПП
7	ТІР

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/152.00.1/Б/ОК16- 2022
	Екземпляр № 1	Арк 64 / 52

## 6. Зміст звіту

Найменування і мета роботи, коротка характеристика термометричних перетворювачів і використовуваних приладів програми EWB, схеми модельованих ВП та результати їх дослідження, відповіді на контрольні питання, висновки по роботі.

### 6. Контрольні питання

1. Які фізичні явища використовують в термометричні датчиках?
2. Яким чином на точність вимірювання температури може вплинути струм, що пропускається через термопару, якщо не враховувати ефект Пельтьє (виділення або поглинання теплоти) і ЕРС Томсона?
3. Назвіть основні характеристики металевих терморезисторних ВП та області їх застосування.
- 4 Якими властивостями володіють напівпровідникові термометри опору?

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/152.00.1/Б/ОК16- 2022
	Екземпляр № 1	Арк 64 / 53

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 9

**Тема:** дослідження індуктивних перетворювачів

**Мета:** ознайомлення із принципом роботи індуктивних перетворювачів

**Технічне забезпечення:** ПЕОМ

### Короткі теоретичні відомості

Індуктивність (від латинського слова *inductio* – наведення, збудження) – це фізична величина, що характеризує магнітні властивості електричного кола. Струм, що протікає в провідному контурі, створює в оточуючому середовищі магнітне поле, причому магнітний потік  $\Phi$ , котрий пронизує контур, прямо пропорційний силі струму, тобто  $\Phi = LI$ . Коефіцієнт пропорційності  $L$  називають індуктивністю, або коефіцієнтом самоіндукції контура. Індуктивність залежить від розмірів і форми контура, від магнітної проникності провідників, що утворюють коло, і від оточуючого середовища. Для створення великої індуктивності ізольований провідник скручують у спіраль (котушка індуктивності), найчастіше в кілька шарів, і всередині встановлюють осердя – магнітопровід з ферромагнітних матеріалів (електротехнічної сталі, карбонільного заліза, пермоля, феритів). Величина індуктивності пропорційна лінійним розмірам котушки, квадрату числа витків обмотки і магнітної проникності поперечника (магнітопровода).

Існує значна кількість різних конструктивних вирішень індуктивних перетворювачів, залежно від призначення.

Електрична схема даного виду приладів складається з давача, в котрому механічні переміщення викликають зміну індуктивності, і елементів кола, що являють собою електричне коло вимірювання індуктивності.

Індуктивним здавачем (рис. 8.1) називають пристрій для перетворення механічних переміщень в електричний сигнал, що представляє собою котушку індуктивності 1 з магнітопроводом 2 і рухомим елементом (якорем) 3, котрий при вимірюванні лінійного чи кутового розміру пересувається і змінює індуктивність котушки.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/152.00.1/Б/ОК16- 2022
	Екземпляр № 1	Арк 64 / 54

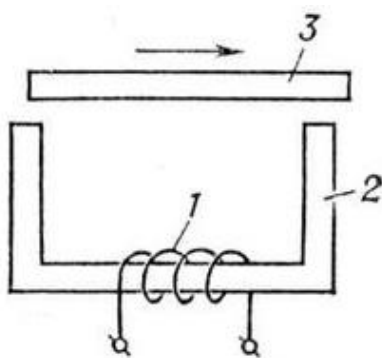


Рисунок 8.1 – Принцип роботи індуктивного давача

Індуктивний давач складається з котушки індуктивності, тобто провідника, скрученого в спіраль, магнітопровода, що складається з сердечника (постійної частини) і якоря, котрий при вимірюванні розміру зміщується відносно котушки і цим самим змінює магнітну проникність (опір) сердечника, а отже, змінює індуктивність котушки.

Зміна індуктивності відбувається або в результаті зміни зазору між рухомою частиною магнітопроводу-якоря і сердечником, або в результаті зміни площі.

Давачі, що працюють за принципом зміни зазору, використовуються для малих переміщень (від долей мікрометра до 3—5 мм), а ті, що працюють за принципом зміни площі – для переміщень від 0,5 до 15 мм. Частота живлення сучасних приладів з індуктивними давачами використовується в межах 3—15 кГц і при цьому найчастіше використовуються магнітопроводи із фериту, що володіє хорошою магнітною проникністю, малими втратами і хорошою температурною стабільністю (ферит – від латинського слова ferrum – залізо, структурна складова сплавів заліза, що представляє собою твердий розчин вуглецю (до 0,02 %) і легованих елементів в к-залізі).

### Хід роботи

Запустити схему дослідження, визначити залежність вихідного сигналу вимірювального підсилювача від переміщення ярма індуктивного перетворювача. Побудувати графік.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідас ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/152.00.1/Б/ОК16- 2022
	Екземпляр № 1	Арк 64 / 55

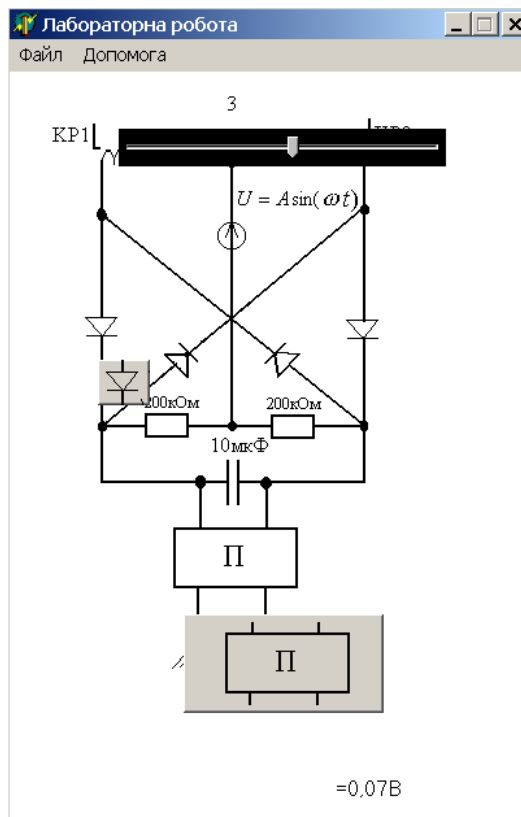


Рисунок 10.2 – Схема дослідження

### Контрольні питання

- 1 Поняття контролю.
- 2 Поняття автоматичний і автоматизований.
- 3 Типи приладів контролю розмірів.
- 4 Схема командного пристрою активного контролю.
- 5 Схема відліково-командного пристрою з індуктивним перетворювачем.
- 6 Способи розміщення обмоток залежно від типу магнітопровода індуктивного перетворювача.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/152.00.1/Б/ОК16- 2022
	Екземпляр № 1	Арк 64 / 56

## Лабораторна робота № 10-11

### Дослідження перетворювача переміщення. Дослідження оптичного перетворювача

#### Вивчення оптичних перетворювачів та можливостей використання їх для вимірювання параметрів обертального руху

##### Мета роботи:

1. Вивчити будову та принцип дії оптичних перетворювачів – фоторезистора та фотодіода.
2. Вивчити будову приладу для вимірювання параметрів обертального руху та пояснити роботу його електричної схеми.
3. Виробити навички вибору та практичного використання оптичних перетворювачів у схемах визначення параметрів обертального руху.

##### Обладнання:

Фотодіод, фоторезистор, установка для вимірювання параметрів обертального руху, осцилограф, коаксіальний кабель.

##### Теоретичні відомості:

Для контролю технологічних процесів на виробництві та при наукових дослідженнях користуються вимірюваннями електричних і неелектричних величин. При цьому різновидів електричних приладів для вимірювання неелектричних величин значно більше, ніж для вимірювання електричних.

Швидкість обертання та кутове прискорення машин, пристроїв та агрегатів є важливими характеристиками досліджуваного об'єкта. Нерідко вони визначають динамічні та теплові напруження в машинах. Технічні тахометри, наприклад, забезпечують похибку вимірювання в 1,5...2 %, а при вимірюванні швидкості обертання в енергетичних установках ця похибка не повинна перевищувати 0,3...0,5 %.

Швидкість обертання визначається кількістю обертів за хвилину  $n$  (об/хв.), що зв'язана з частотою обертання  $f$  (Гц), як:

$$f = \frac{n}{60}, \quad n = 60f. \quad \dots\dots\dots (1.1)$$

Найпоширенішими є такі методи вимірювання частоти обертання: **відцентрові механічні**, в яких чутливий елемент реагує на відцентрову силу, що розвивається неврівноваженими масами рухомого вала, **електричні** – постійного, змінного та імпульсного струму, основані на залежності генерованої напруги від частоти обертання, а для змінного та імпульсного струму – залежності частоти струму від частоти обертання; **магнітоіндукційні**, основані на залежності наведених в металевому тілі



Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідас ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/152.00.1/Б/ОК16- 2022
	Екземпляр № 1	Арк 64 / 57

вихрових струмів від частоти обертання; *індукційні* основані на законі електромагнітної індукції; *фотоелектричні* – на модуляції світлового потоку елементами, що обертаються; *стробоскопічні* та інші.

Особливої уваги заслуговують *імпульсні перетворювачі*, які перетворюють кутову швидкість (деякі – кутове прискорення, кут повороту та лінійне переміщення) в імпульсний електричний сигнал. Таким перетворювачам властиві мізерно мале споживання енергії від об'єкта вимірювання, незначні статичні та динамічні похибки, висока чутливість, сумісність з цифровими приладами та системами.

Широкого застосування набули фотоелектричні імпульсні перетворювачі, робота яких ґрунтується на явищі внутрішнього (фоторезистор, фотодіод) та зовнішнього (фотоелемент, фотоелектронний помножувач) фотоефекту.

Розглянемо найпростіші оптичні перетворювачі, які набули широкого застосування в конструкціях імпульсних оптичних перетворювачів.

**Фоторезистор.** Чутливим елементом фоторезистора є тонкий прошарок напівпровідникового матеріалу, розміщений на діелектричній підкладці (див. рис. 1 а). При вмиканні фоторезистора в електричне коло (див. рис. 1 б) при відсутності світла в колі протікає темновий струм,

$$I_T = b \cdot U \cdot j_T, \quad (1.2)$$

де:  $b$  – постійний коефіцієнт;

$j_T$  – темнова провідність напівпровідника;

$U$  – напруга.

Під впливом оптичного випромінювання провідність світлочутливого прошарку зростає і струм в колі збільшується до значення:

$$I_\phi = b \cdot U \cdot (j_T + j_\phi), \dots \dots \dots (1.3)$$

де  $j_\phi$  – фотопровідність напівпровідника.

У видимій ділянці спектра широко використовуються фоторезистори, виготовлені з сірчистого кадмію ( $CdS$ ), в якого фотопровідність в  $10^5 - 10^6$  разів перевищує темнову провідність.

В інфрачервоній ділянці спектра широко використовуються фоторезистори з сірчистого свинцю ( $PbS$ ), Використовуються також інші напівпровідникові матеріали.

**Фотодіод** має будову звичайного напівпровідникового діоду, в якому забезпечується можливість впливу оптичного випромінювання на  $p-n$  – перехід (див. рис. 2).

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідас ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/152.00.1/Б/ОК16- 2022
	Екземпляр № 1	Арк 64 / 58

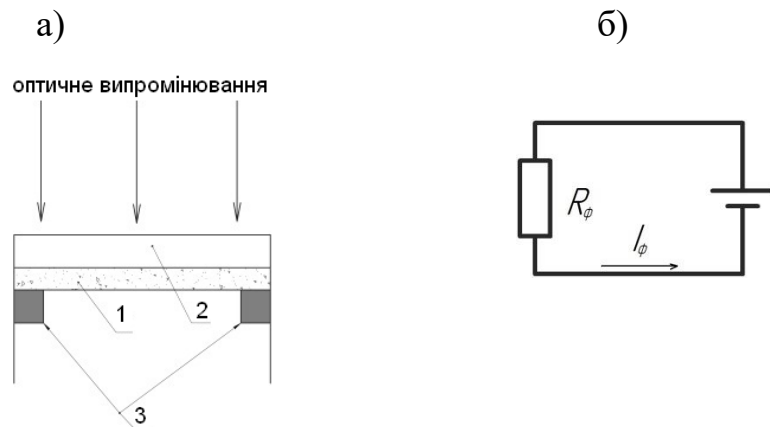


Рисунок 1. Будова (а) та схема вмикання (б) фоторезистора:

- 1 – напівпровідниковий прошарок;  
2 – прозора діелектрична підкладка; 3 – електроди.

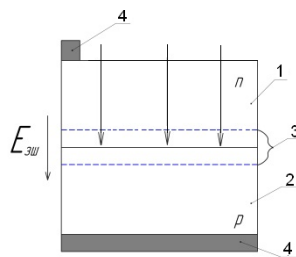


Рисунок 2. Будова фотодіода:

- 1 – напівпровідник  $n$ -типу, прозорий для оптичного випромінювання;  
2 – напівпровідник  $p$ -типу; 3 – запірний шар; 4 – електроди.

Контакт напівпровідника  $n$ -типу 1 з напівпровідником  $p$ -типу 2 утворює  $p$ - $n$  – перехід 3, який характеризується електричним полем запірного шару  $E_{зш}$ .

При освітлені фотодіоду в  $p$ - $n$ -переході генеруються електронно – діркові пари внаслідок поглинання світла в ньому. Електричне поле запірного шару 3, розділяючи генеровані світлом електронно – діркові пари, утворює різницю потенціалів між електродами 4 фотодіода.

Працюючи в фотогальванічному режимі (див. рис. 3), фотодіод є генератором фото-ЕРС При цьому джерело зовнішньої напруги відсутнє.

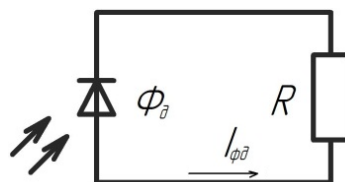


Рисунок 3. Схема вмикання фотодіода в фотогальванічному режимі.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/152.00.1/Б/ОК16- 2022
	Екземпляр № 1	Арк 64 / 59

У фотодіодному режимі роботи (див. рис. 4) послідовно з фотодіодом під'єднується джерело зворотної напруги.

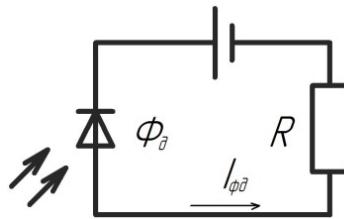


Рисунок 4. Вмикання фотодіода в фотодіодному режимі.

Основними фотодіодними конструкціями, перспективними для використання в оптоелектронних приладах є кремнієві  $p-i-n$  – структури, контакт метал-напівпровідник (бар'єр Шоткі) і гетеропереходи.

Основний недолік діодних структур – низька чутливість – усувається у фотоприймачах із внутрішнім підсиленням: фототранзисторах, фототиристорах, інтегральних фотоприймачах.

Схема фотоелектричного імпульсного перетворювача, первинним перетворювачем якого є фотодіод, зображена на рисунку 5.

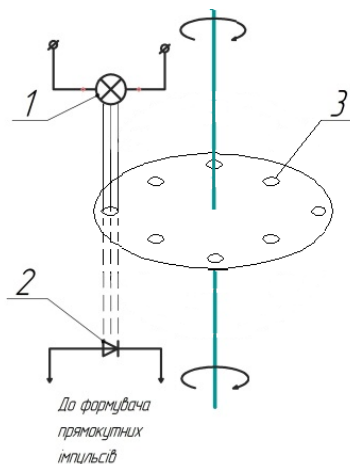


Рисунок 5. Схема імпульсного фотоелектричного перетворювача.

Основними елементами перетворювача є: джерело світла (лампа розжарювання, світлодіод) 1 та фотоелектричний пристрій (фоторезистор, фотодіод і т.ін.) 2, розміщені на прямій по різні боки модулятора 3. Модулятор у вигляді диска з  $N$  – отворами закріплюється на валу. Обертання валу разом з модулятором призводить до модуляції світлового потоку, який падаючи на фотодіод утворює модульований електричний сигнал складної амплітудно-часової форми. В подальшому він подається на блок формувача прямокутних імпульсів.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідас ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/152.00.1/Б/ОК16- 2022
	Екземпляр № 1	Арк 64 / 60

При обертанні диска з швидкістю  $n$  – об/хв. на виході формувача імпульсів матимемо  $N \cdot n$  імпульсів за 1 хвилину. Відповідно частота імпульсів  $f_0$ , Гц, тобто кількість імпульсів за 1 с, буде рівною:

$$f_0 = \frac{N \cdot n}{60}. \quad (1.4)$$

Оскільки даний модулятор має  $N = 36$  отворів, розташованих через кожні  $10^0$  по довжині кола, то:

$$f_0 = \frac{36}{60} \cdot n. \quad (1.5)$$

Вихідний сигнал перетворювача можна спостерігати на екрані осцилографа. Частота його визначається осцилографічним методом або за допомогою частотоміра.

В лабораторній роботі електричний сигнал досліджується за допомогою електронного осцилографа. Осцилографічний метод дає можливість визначити період  $T$  електричного сигналу.

Знаючи період  $T_0$  електричного сигналу, одержаного за допомогою оптичного перетворювача легко визначити:

- частоту електричних сигналів  $f_0$ , Гц:

$$f_0 = \frac{1}{T_0}; \quad \dots\dots\dots \quad \dots\dots\dots \quad (1.6)$$

- період обертання валу  $T_{BO}$ , с:

$$T_{BO} = 36 \cdot T_0; \quad (1.7)$$

- частоту обертання валу  $f_{BO}$ , Гц:

$$f_{BO} = \frac{1}{T_{BO}} = \frac{1}{36 \cdot T_0}; \quad (1.8)$$

- кутову швидкість валу  $\omega_{BO}$ , рад/с:

$$\omega_{BO} = 2\pi f_{BO}; \quad (1.9)$$

- швидкість обертання валу  $n_{BO}$ , виражену в несистемних одиницях — обертах за хвилину, об/хв:

$$n_{BO} = \frac{60}{36} \cdot f_{BO}. \quad (1.10)$$

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/152.00.1/Б/ОК16- 2022
	Екземпляр № 1	Арк 64 / 61

### Опис установки для визначення параметрів обертального руху

Лабораторна установка дозволяє вимірювати кутову і лінійну швидкості, кутове прискорення та уповільнення, які необхідні для обрахунків обертального та гальмівного моментів, кінетичної енергії тіл, що обертаються.

Установка конструктивно виконана із трьох основних вузлів (див. рис. 6) – привідний двигун 1 з карданною муфтою 4, блок перетворювачів (давачів) 2, електронний блок 3.

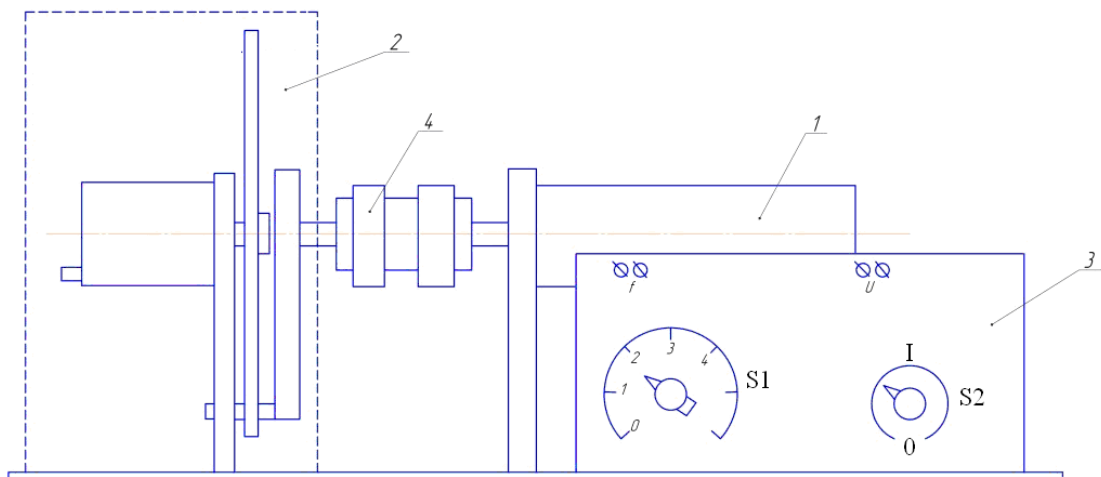


Рисунок 6. Схема лабораторної установки

Привідний двигун забезпечує чотири фіксованих значення швидкості, що встановлюється за допомогою перемикача *S1* електронного блоку (див. рис. 7). Обертання від двигуна до блоку перетворювачів забезпечується муфтою 4.

Блок перетворювачів має індукційний та оптоелектронний перетворювачів, а також обертальну частину — вал з закріпленими на ньому диском з 36 отворами – складовою оптоелектронної системи та феромагнітним диском з виступом – складовою індукційної системи.

Принципова схема лабораторної установки наведена на рисунку 7. В схемі можна виділити блок живлення – 1, блок керування електродвигуном – 2, блок перетворювачів – 3, підсилювач імпульсів – 4, генератор імпульсів – 5, інтегратор – 6

Розглянемо роботу електричної схеми установки.

При встановленні перемикача *S2*, розміщеного на передній панелі приладу в положення “0” (див. рисунок 6.) імпульсний електричний сигнал знімається з оптичного перетворювача (фотодіод *VD11*) блоку перетворювачів 3 і підсилюється підсилювачем 4 (див. рисунок 7.). Фотодіод в даній схемі працює в фотодіодному режимі. Підсилений

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/152.00.1/Б/ОК16- 2022
	Екземпляр № 1	Арк 64 / 62

електричний сигнал оптичного перетворювача і узгоджений з ним сигнал генератора імпульсів 5 подаються на вхід інтегратора 6.

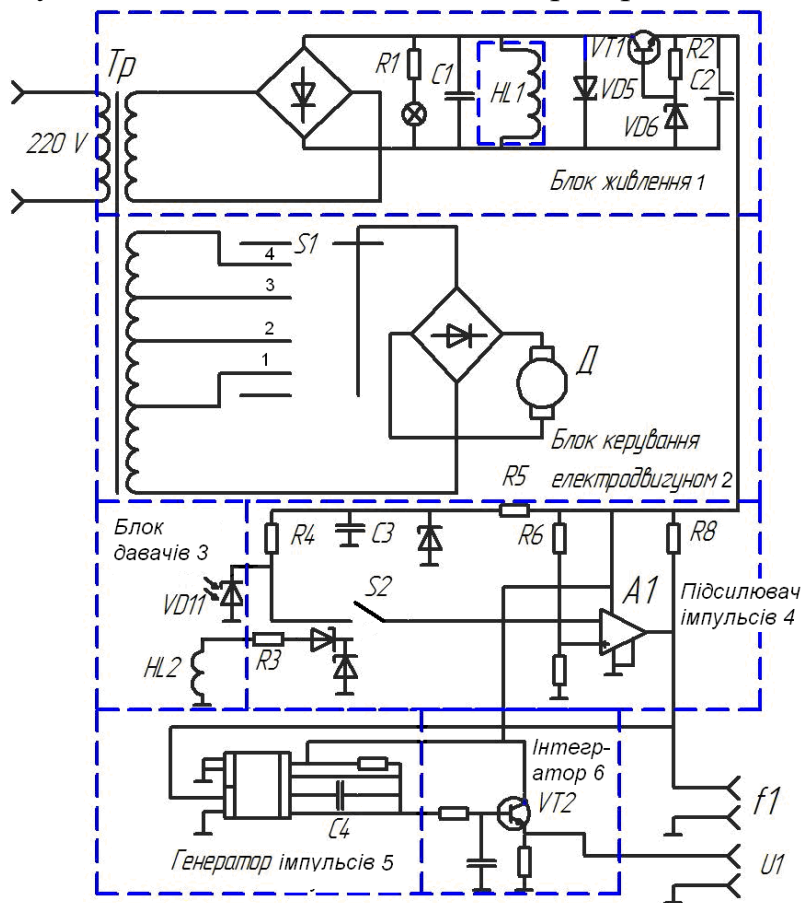


Рисунок 7. Принципова електрична схема лабораторної установки.

На виході інтегратора маємо сигнал прямокутної форми, частота якого рівна частоті світлових імпульсів і пропорційна кутовій швидкості обертання валу двигуна.

Для визначення частоти спеціально сформованих прямокутних електричних імпульсів осцилографічним методом передбачений вихід  $U1$ , а при використанні частотомира - вихід  $f1$ .

Визначивши період  $T_0$  прямокутних електричних імпульсів, за допомогою співвідношень 1.6, 1.7, 1.8, 1.9 та 1.10 легко обрахувати характеристики обертального руху якоря електричного двигуна.

### Хід роботи:

1. Вивчити будову та електричну схему лабораторної установки.
2. Вияснити суть процесу одержання електричних сигналів на виході  $U1$  установки.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/152.00.1/Б/ОК16- 2022
	Екземпляр № 1	Арк 64 / 63

3. Встановити на панелі приладу перемикач  $S2$  в положення 0 (оптичний датчик).

4. Включити осцилограф.

5. Подати на вхід осцилографа за допомогою коаксіального кабеля електричний сигнал із виходу  $U1$  установки. За допомогою перемикачів на передній панелі осцилографа «розгортка», «режим» та «чутливість» досягти стабільного зображення сигналу на екрані. При необхідності чіткість та яскравість зображення відкоригувати відповідними пристроями. Замалювати або сфотографувати зображення сигналу.

6. За вказівкою викладача встановити частоту розгортки. По шкалі екрану та встановленій частоті розгортки визначити період електричного імпульсу  $T_0$ . Дослід провести тричі на різних частотах розгортки. Визначити середнє значення  $T_{0c}$ . Результати вимірів і обрахунків занести до таблиці 1.

7. Встановити перемикач  $S1$  послідовно в положення 2, 3 та 4 і виконати вимірювання для відповідних значень кутової швидкості вала електродвигуна.

8. За обрахованими середніми значеннями  $T_{0c}$ , визначити величини :

- періоду обертання вала двигуна  $T_{\omega_0}$ , с;
- частоти обертання вала двигуна  $f_0$ , Гц;
- циклічної частоти обертання вала двигуна  $\omega_{\omega_0}$ , рад/с;
- швидкості обертання вала двигуна  $n$ , об/хв.;

9. Обрахувати середню та відносну похибку вимірювання вказаних величин.

10. Результати обрахунків занести в таблицю 1.

11. Остаточні результати обрахунків для кожної величини записати у вигляді:

$$X = X_c \pm |\Delta X_c|; \quad (1.11)$$

де:  $X_c$  – середнє значення досліджуваної величини;

$|\Delta X_c|$  – її абсолютна середня похибка.

12. Сформулювати висновки за результатами виконаної лабораторної роботи.

Особливу увагу звернути на можливості підвищення точності вимірів та зменшення габаритів приладу.

Таблиця 1. Кінетичні характеристики обертального руху, одержані за допомогою оптичного перетворювача.

Параметри обертального руху о → Положення ↓ перемікача	Вимірювання	$T_o$	$\Delta T_o$	$\varepsilon_o$	$f_o$	$\Delta f_o$	$\varepsilon_f$	$T_{oo}$	$\Delta T_{oo}$	$\varepsilon_{T_{VO}}$	$f_{o0}$	$\Delta f_{o0}$	$\varepsilon_{f_{AI}}$	$\omega_{oo}$	$\Delta \omega_{oo}$	$\varepsilon_{\omega_{AI}}$	$n_{oo}$	$\Delta n_{oo}$	$\varepsilon_{n_{AI}}$	
		с	с	%	Гц	Гц	%	с	с	%	Гц	Гц	%	$\frac{рад}{с}$	$\frac{рад}{с}$	%	$\frac{дл}{дл}$	$\frac{дл}{дл}$	%	
1	1																			
...	2																			
4	3																			
	с																			
	р																			

### Контрольні запитання та завдання:

1. Поясніть будову та принцип дії фоторезистора.
2. Поясніть будову та принцип дії фотодіода.
3. Яке явище лежить в основі роботи оптичних перетворювачів.
4. В яких режимах працює фотодіод.
5. Накресліть схеми включення фоторезистора та фотодіода.
6. Вкажіть переваги та недоліки напівпровідникових оптичних перетворювачів, способи усунення недоліків.
7. Накресліть схему, поясніть будову та принцип дії імпульсного оптичного перетворювача.
8. Поясніть будову лабораторної установки, користуючись її принциповою електричною схемою.
9. Дайте оцінку похибкам вимірювання.