

Міністерство освіти і науки України  
Чорноморський національний університет імені Петра Могили

**Трунов О. М.**

# **ДАТЧИКИ ТА СЕНСОРИ РОБОТОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ**

**Навчальний посібник  
для підготовки бакалаврів за спеціальністю  
174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології  
та робототехніка»**



Миколаїв – 2023

УДК 004.896:681.5

**T77**

*Рекомендовано до друку вченою радою Чорноморського національного університету імені . Петра Могили (протокол № 10 від 22 грудня 2022 р.)*

**Рецензенти:**

**Дихта Л. М.** – д-р техн. наук, професор, професор кафедри автоматизації та комп’ютерно-інтегрованих технологій Чорноморського національного університету імені Петра Могили.

**Лисенков Е. А.** – д-р фіз.-мат. наук, доцент, доцент кафедри інтелектуальних інформаційних систем Чорноморського національного університету імені Петра Могили.

**Іванна Дронюк** – канд. фіз.-мат. наук, ад’юнкт-професор факультету природничих та технічних наук Університету ім. Яна Длугоша в Ченстохові.

**T77**

**Трунов О. М.** Датчики та сенсори робототехнічних систем : навч. посіб. для підготовки бакалаврів за спец. 174 «Автоматизація, комп’ютерно-інтегровані технології та робототехніка» / О. М. Трунов. – Миколаїв : Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили, 2023. – 56 с.

**ISBN 978-966-336-444-5**

Навчальний посібник присвячено проблемам використання датчиків та сенсорів в автоматизованих системах керування роботизованих виробництв.

У посібнику подано лабораторні роботи, що забезпечують курс «Датчики та сенсори робототехнічних систем» спеціальності «Автоматизація, комп’ютерно-інтегровані технології та робототехніка».

УДК 004.896:681.5

ISBN 978-966-336-444-5

© Трунов О. М., 2023.

© ЧНУ ім. Петра Могили, 2023.

# ЗМІСТ

<b>ВСТУП.....</b>	<b>4</b>
<i>Лабораторна робота № 1</i> Вивчення роботи та характеристики датчика сили.....	5
<i>Лабораторна робота № 2</i> Вивчення принципу роботи та характеристики струмовихрового датчика та визначення товщини лакофарбових покриттів.....	12
<i>Лабораторна робота № 3</i> Вивчення роботи та характеристики ємнісного датчика.....	18
Частина I. Опис лабораторної установки дослідження ємнісного чутливого елемента кутового датчика та порядок виконання роботи.....	24
Частина II. Опис лабораторної установки дослідження характеристики ємнісного датчика переміщення (датчика вимикача) та порядок виконання роботи.....	26
<i>Лабораторна робота № 4</i> Вивчення принципу роботи та характеристики датчиків температури та визначення температурних характеристик провідника, напівпровідника та терморезистора.....	29
<i>Лабораторна робота № 4/1</i> Вивчення температурної залежності питомого опору провідників.....	33
<i>Лабораторна робота № 4/2</i> Вивчення температурної залежності опору терморезисторів.....	37
<i>Лабораторна робота № 5</i> Визначення відстані та лінійних розмірів за допомогою лазерного далекоміра.....	47
<i>Лабораторна робота № 6</i> Дослідження характеристики датчика Холла.....	52

## ВСТУП

Розвиток суспільства, розвиток системи сімейних лікарів та подальше поширення комп'ютерно-інтегрованих технологій стимулює пошуки оновлення технологій та, у тому числі, розробку нових мобільних малогабаритних та стаціонарних бездротових приладів ранньої діагностики, профілактики, лікування та посттравматичних відновлень військово-цивільного застосування. За своєю початковою ідеєю прилади все більше повинні розглядатися як інтегровані у систему лікарського віддаленого моніторингу та спостереження, що дозволяють проводити ранню діагностику, профілактику, лікувальні процедури та відновлення в комфортних, безпечних індивідуальних умовах. Особливу актуальність задача створення приладів індивідуального користування набула із поширенням пандемії. Крім того, проведення профілактичних призначень, а також лікування здійснюється на сьогодні неконтрольовано сімейним лікарем у медичних приватних центрах, кабінетах, фітнес-центрах та вдома на приватних тренажерах. Така, з одного боку, неконтрольованість, а з іншого, і неможливість контролю, приводить до розбалансованості оздоровчого процесу і, безумовно, буде давати збої. Крім того, доставка до пацієнта та повернення малогабаритних індивідуальних приладів, що здатна забезпечуватись за допомогою «безлюдних» технологій, теж зменшує трудовитрати.

У зв'язку з означеним, у роботі таких систем визначальну роль відіграють успіхи, що накопичені при створенні робототехнічних систем. У даному посібнику зосереджується увага на комплексі проблем, що необхідно ставити заново або дорозв'язувати для підвищення ефективності та надійності за рахунок пошуку і впровадження інноваційних принципів створення датчиків та сенсорів. Розвиток теоретичних уявлень та знань разом з експериментальними навичками, яких набудуть студенти, розширить їх кругозір та забезпечить формування власного бачення проблеми створення АСК, у тому числі і відновлення та реабілітації.

У посібнику викладено лабораторні роботи, що забезпечують курс «Датчики та сенсори робототехнічних систем» спеціальності «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка».

## *Лабораторна робота № 1*

### Вивчення роботи та характеристики датчика сили

**Мета:** вивчити принцип дії датчика сили та дослідити параметри його характеристик, такі як: поріг чутливості, лінійність та робочий діапазон і гістерезис, та можливості застосування для реалізації в якості датчиків елементів РТС.

#### **Теоретичні відомості**

Сенсорні модулі для забезпечення функціонування АСК набувають різного призначення, у тому числі і відновлення хребта.

*Модуль контактного тиску.* Модуль містить елемент, що змінює свій опір під навантаженням і електричне коло приведення сигналу до стандартного виду. Первинний перетворювач контактної тиску має м'яку поверхню [1-2]. Він здатен покривати складні форми деталей роботів, допускає безпосередній контакт із робочою деталлю та іншими предметами середовища або задіяною устаткуванням (рис. 1). Він живиться від джерела постійного струму з ЕРС 1,5-5 В, при рівні вихідного сигналу від 1 до 20 мА.



Рисунок 1 – Модуль контактної тиску: а) – чутливий елемент з м'якою поверхнею, б) – чутливі елементи датчика у зборі

Після перетворення струму у спад напруги діапазон змін спаду напруги сягає від 5 мВ до 5 В для змін тиску від  $7,5 \cdot 10^3$  до  $1 \cdot 10^6$  Па. Максимальне значення похибки у цьому діапазоні складало 5%, а вихідний сигнал у діапазоні тиску  $1 \cdot 10^4$ - $1 \cdot 10^6$  Па практично лінійний, а застосування ланцюгів приведення до стандартного виду із зворотною нелінійною характеристикою розширює діапазон лінійності. Коло приведення до стандартного сигналу просте за своїм схематичним рішенням і складається з резисторного мосту, що включено у коло зворотного зв'язку операційного підсилювача при лінійній ха-

рактистичі перетворювача. Застосування простого урівноважуючого мосту з нелінійною характеристикою розширює діапазон лінійності датчика у цілому, якщо вона обрана зворотною до характеристики чутливого елемента. Такий сенсорний модуль може працювати з імпульсним однополярним джерелом вторинного живлення, як змінний активний опір у колі

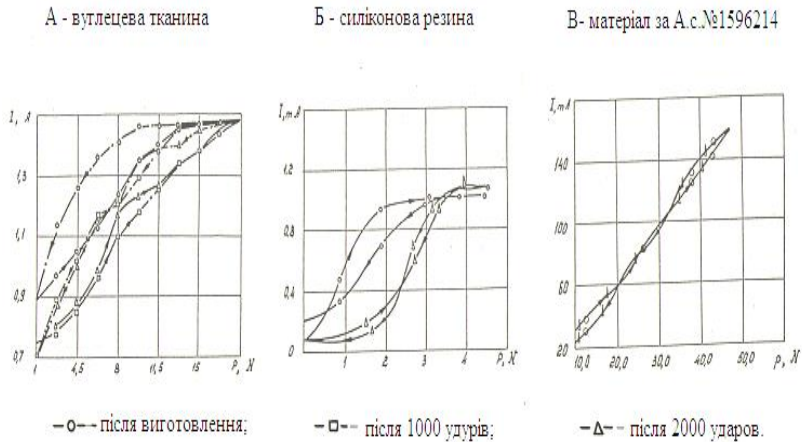


Рисунок 2 – Зміни характеристик датчиків контактного тиску за часом для різних матеріалів

пульсуючого струму живлення [2], що суттєво зменшує спожиту потужність і тепловиділення та стабілізує характеристики датчика. Слід зазначити, що у якості джерела може бути застосоване стабілізоване джерело електрорушійної сили або генератор зі стабілізованою амплітудою, що зібраний за принципом транзисторної три точки чи на логічних И-НЕ елементах, який узгоджується з однополярним джерелом живлення.

### Вимірювання опорів за допомогою мосту Уїтсона

Принцип виміру опорів засновано на порівнянні потенціалів середніх виводів двох ланок (див. рис. 1). Завдяки застосуванню моста Уїтсона вдасться компенсувати вплив температури на похибку величини опору, що вимірюється.

В одну з ланок під'єднано резистор, опір якого потрібно виміряти. Друга ланка містить елемент, опір якого може змінюватись; наприклад, реостат).

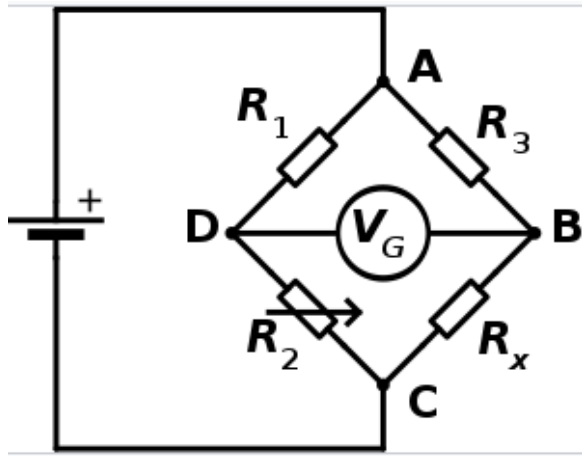


Рисунок 3 – Схема мосту Уїтсона

Позначення:  $V_G$  – позначено гальванометр, з опором  $R_G$ . Між ланками (точками В и D; див. рис. 3) знаходиться індикатор. У якості такого можуть застосовуватись:

- гальванометр;
- нуль-індикатор – прилад, відхилення стрілки якого відображає наявність струму в колі та його напрям, але не величину.

На шкалі такого приладу позначено тільки одно число – нуль;

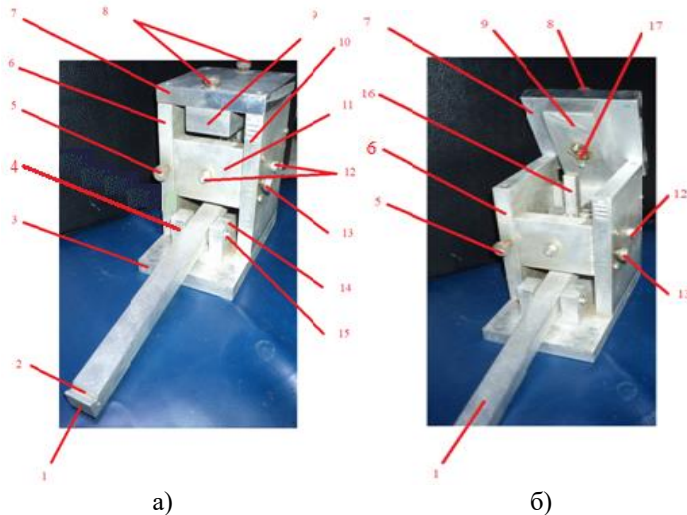
- Опір вольтметру приймають рівним нескінченності;
- Опір амперметру приймають рівним нулю.

Зазвичай у якості індикатора застосовується гальванометр.

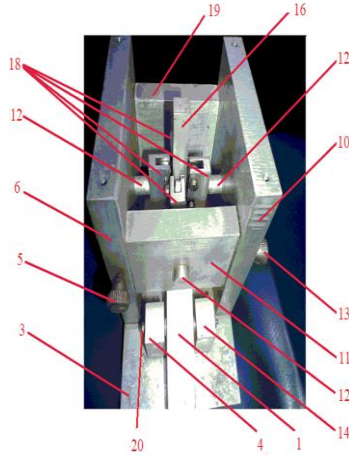
#### Опис експериментальної установки

Фото експериментальної установки для вимірювання характеристики датчика сили подано на рис. 4. Для формування більш повної уяви про особливості конструкції установка представлена у трьох видах. На рис. 4 а) представлено установку у зборі. Рис. 4 б) – установку, у якій кришку піднято для представлення конструкції чотирьох напрямних та способу фіксації датчика сили до проміжної планки кришки корпусу. На рис. 4 в) показано особливості конструкції чотирьох напрямних.

Експериментальне устаткування складається з важеля 1, до якого приєднана підвіска з горизонтальною площадкою для розташування гирьок (на фото не показано). На вихідному кінці важеля утворено спеціальну канавку для підвищення за допомогою кільця горизонтальної площадки, що призначена для розміщення гирьок. До основи корпусу установки 3 за допомогою гвинтів кріпляться вертикальні стійки 4 та 14. У стійках закріплено на кулькових підшипниках вісь важеля 1. До вертикальних стійок 6 та 10 кріпиться кришка 7 та корпусні планки: передня 11 та задня 19. Гвинтами 5 та 13 фіксується осьове положення циліндричних штирів, що утримують корпуси чотирьох напрямних 18 (два інші гвинти на фото не видно). Підшипники напрямних 18, по два на кожній, задають напрям і забезпечують плавне переміщення упорного штока 16 під дією сили, що прикладена до протилежного кінця важеля 1. Сила тиску передається від важеля через кульковий упор на датчик сили без утворення моменту сил. Важіль 1 зафіксовано у стойках 4 та 14 за допомогою підшипників та вісі 15 і стопорної гайки 20. Планка 9 призначена для кріплення датчика за рахунок клейового з'єднання у розміченій області 17. Кріплення планки 9 до кришки корпуса 7 забезпечується двома гвинтами 8.







в)

Рисунок 4 – Фото експериментальної установки для вимірювання характеристик датчика сили: а – установка у зборі, б – установка з піднятою кришкою для фіксації датчика, в – установка із знятою кришкою.



Рисунок 5 – Фото площадки і гирьок для навантаження датчика у експериментальній установці.



Рисунок 6 – Фото експериментальної установки дослідження характеристики датчика сили у зборі.

### **Порядок виконання роботи**

#### Спосіб перший

1. Датчик, що досліджується фіксується у корпусі установки.
2. Вихідні кінці датчика приєднуються до моста Уїтсона (рис. 3.опір) та стабілізованого джерела живлення
3. Корпус устаткування для навантаження фіксується до стола за допомогою струбцин.
4. До важеля підвішується площадка для навішування гирьок
5. Включається джерело живлення та розпочинається процес навантажування та вимірювання напруги на виході мосту.
6. Після досягнення максимальної сили, що задано викладачем, здійснюється розгрукка у зворотному порядку
7. Дані вимірів заносяться у таблицю для навантаження та розвантаження
8. Скласти звіт про виконану роботу і підготувати відповіді на контрольні запитання.

#### Спосіб другий

1. Датчик приєднати до мультиметра та визначити мінімальне значення опору при максимальному навантаженні та при нульовому.
2. Обрати робочий діапазон роботи мультиметра у режимі вимірювання опору.
3. Корпус устаткування для навантаження фіксується до стола за допомогою струбцин

4. До важеля підвішується площадка для навішування гирьок
5. Включається мультиметр та починається навантаження датчика шляхом нарощування величини ваги гирь.
6. Після досягнення максимальної сили, що задано викладачем здійснюється розгрузка у зворотному порядку
7. Данні вимірів заносяться у таблицю для навантаження та розвантаження
8. Наносяться точки та будується поле похибок. Будується графік.
9. За графіком встановлюється поріг чутливості, лінійність та робочий діапазон та гістерезис.
10. Скласти звіт про виконану роботу і підготувати відповіді на контрольні запитання.

### Питання для контролю та самоконтролю

1. Як визначити поріг чутливості?
2. Як знайти не лінійність характеристики датчика?
3. Що таке гістерезис характеристики датчика та чому він виникає?
4. Які принципи дії датчиків сили існують?
5. За якими ознаками класифікуються датчики сили?
6. За яких умов досліджуваний зразок можна використовувати для створення датчика, а за яких – тільки індикатора?
7. Чому для живлення датчика корисно використовувати джерела пульсуючого струму?
8. Чому використовуються мостові схеми включення резистивних датчиків сили?
9. Чи буде впливати на похибку вимірювання коливання температури середовища?
10. Якщо величина максимально можливої похибки складає більше 5 % від загальної зміни фізичної величини чи може такий елемент використовуватись як датчик на цьому діапазоні вимірювань?

### Література

1. Вступ до мехатроніки / О. М. Яхно, А. В. Узунов, А. Ф. Луговской, та інші. –Київ : НТУУ «КПІ», 2008.
2. Trounov A. N. Application of sensory modules for adaptive robots : Proceedings of the 4th International Conference on Robot Vision and Sensory Control. Alan Pugh (ed.), London, 9-11 October, 1984. URL: <https://books.google.com.ua/books?isbn>.

## *Лабораторна робота № 2*

### **Вивчення принципу роботи та характеристики струмовихрового датчика та визначення товщини лакофарбових покриттів**

**Мета:** вивчити принцип дії струмовихрового датчика, дослідити параметри його характеристик, такі, як: поріг чутливості, лінійність та робочий діапазон, та можливості застосування для реалізації неруйнуючої технології виміру товщини лакофарбових покриттів металевих виробів.

#### **Теоретичні відомості**

Електромагнітне поле, розповсюджуючись, утворює у просторі хвилі, які взаємодіють з електронами речовини та випромінюють вторинні хвилі. Наслідком взаємодії первинних і вторинних хвиль є перерозподіл спадів напруг у колі джерела електромагнітного поля в залежності від фізичних властивостей середовища [1, 2, 3].

Ґрунтуючись на особливостях взаємодії високочастотного електромагнітного поля, що генерується датчиком, з речовиною, побудовані пристрої неруйнуючого контролю [4]. Одними із існуючих типів параметрів, що вимірюються, є питомий опір речовини, діелектрична та магнітна проникність, а також відстань до границі стрибка властивостей речовин. Характерним представником датчиків, що містять чутливі елементи, які випромінюють високочастотне електромагнітне поле, є струмовихрові датчики.

Практичним застосуванням струмовихрових датчиків є товщиноміри діелектричних покриттів на металах, у тому числі лакофарбових. Одним з ефективних на теперішній час датчиків є пристрій, що виготовлений за авторським свідоцтвом [4].

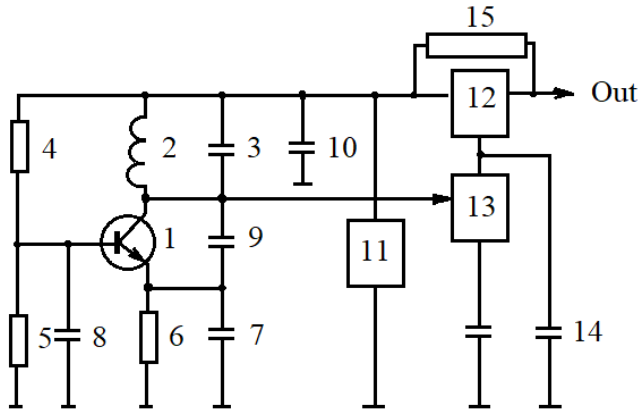


Рисунок 7 – Функціональна блок-схема струмовихрового датчика [4]

На рис. 7 представлена електрична принципова схема пристрою для визначення наявності металу або відстані до нього при відомій характеристиці. На рис. 8 – схема його підключення до джерела живлення. Пристрій складається з автогенератора, що містить транзистор 1, коливальний контур, утворений струмовихровим перетворювачем 2 і конденсатором 3 та резисторів 4 і 5, що утворюють дільник, резистор 4 якого включено до колекторного кола транзистора 1. Загальна точка резисторів дільника підключена до бази транзистора 1. Зсув робочої точки транзистора задає резистор 6, що включено до емітерного кола транзистора 1, а також цей резистор виконує роль негативного зворотного зв'язку по постійному струму. Конденсатор 7 шунтує резистор 6 по змінному струму. Конденсатор 8 шунтує по змінному струму базу транзистора 1. Конденсатор 9, що включено між колектором і емітером транзистора 1, створює позитивний зворотний зв'язок для виникнення генерації коливачів. Конденсатор 10 шунтує точку з'єднання коливального контуру, що складається з індуктивності 2 і конденсатора 3 по змінному струму та напівпровідникового елемента 11, який призначено для стабілізації амплітуди напруги автогенератора на транзисторі 1. Аналогічно конденсатору 10, струмовий ключ 12 підключено одним виводом до загальної точки елементів 4, 2, 3, 10, а іншим виводом – до реєструючої апаратури і є вихідним виведенням пристрою. До керуючого входу струмового ключа підключено вихід детектора 13 і конденсатор 14, що згладжує пульсації детектованої напруги, причому вхід детектора 13 підключений до колектору транзистора 1. Паралельно струмовому ключу 12

підключений резистор 15, що забезпечує початковий струм схеми при повністю закритому ключі.

Пристрій працює таким чином.

За відсутності металу в зоні перетворювача 2, добротність коливального контуру максимальна, транзисторний автогенератор має максимальну амплітуду коливань, обмежену напругою, що живить автогенератор, на стабілізаторі 11. При цьому вихідна напруга детектора 13 максимальна, струмовий ключ 12 відкритий і струм, що споживається пристроєм, набуває максимуму. При наближенні металу до котушки 2 добротність коливального контуру знижується, зменшується амплітуда коливань у струмовихревому перетворювачі 2, зменшується напруга на виході детектору 13, закривається струмовий ключ 12, зменшується струм, споживаний пристроєм. При повному наближенні металу амплітуда коливань перетворювача 12 мінімальна, струмовий ключ 12 зачинений, а струм, що споживається пристроєм, визначається величиною резистора 15. При віддаленні від котушки 2 амплітуда коливань зростає і зростає струм, що споживається пристроєм.

Чутливість автогенератору до наближення металу до котушки 2 залежить від величини резистора зворотного зв'язку 6. Зіставлення функціональної залежності вихідного струму від відстані котушки до металу здійснюється взаємозв'язком вольтамперних характеристик транзистора 1, стабілізатора 11, детектора 13, струмового ключа 12.

На рис. 8 та 9 представлено схеми підключення струмовихревого датчика до джерела живлення та вимірюючого вольтметра. Датчик в цілому позначено пристроєм 16. Пристрій 16 підключають в коло живлення за схемою (рис. 8). На виході встановлюють резистор 17, одним виводом підключений до джерела живлення  $+U_n$ , іншим – до виходу пристрою 16 та до вимірника напруги. За відсутності металу в зоні перетворювача напруга на резисторі мінімальна. З наближенням металу до перетворювача 2 струм, що споживається пристроєм, зменшується, напруга на резисторі 17 збільшується.

Пристрій може бути використаний як датчик кінцевих переміщень, вимірник відстані до металу. Швидкодія пристрою визначається ємністю конденсатора 14.

У зв'язку з тим, що в пристрої використовується струмовихровий перетворювач, що складається з котушки з однією обмоткою, пристрій може бути виконаний в мікроелектронному виконанні.

На прикладі конкретного виконання по схемі рис. 7, стабілізатор амплітуди генератора виконано за допомогою послідовного включення кремнієвих епітаксціальних планарних діодів в прямому включенні, генератор зібраний по схемі емнісної три точки, причому генератор і струмовий ключ зібрані на кремнієвих транзисторах, а амплітудний детектор зібраний на кремнієвому мікросплавному діоді. Осереддя струмовихрового перетворювача виконано з простого фериту, або залитого як магніторідинна композиція.

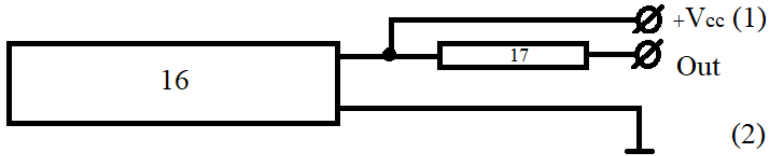


Рисунок 8 – Схема підключення струмовихрового датчика до однополярного джерела живлення: (1) – червоний; (2) – синій.

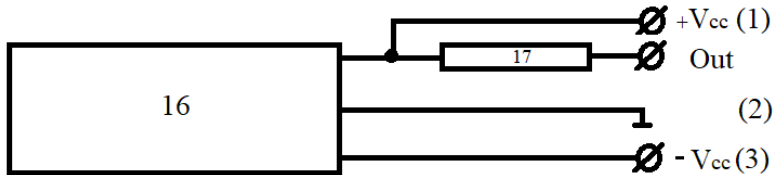


Рисунок 9 – Схема підключення струмовихрового датчика до двополярного джерела живлення: (1) – червоний; (2) – синій; (3) – жовтий.



Рисунок 10 – Фото експериментальної установки.

### **Порядок виконання роботи**

1. Під'єднати датчик до двополярного джерела живлення за схемою (рис. 9) або до однополярного д्रोном (рис. 8) відповідно до завдання викладача. Червоний дріт «+», синій «0».

2. Обрати зразок металу за завданням викладача.

3. Змінюючи товщину пластини, що визначає відстань між поверхнею та датчиком, від 0 до 1 мм, виміряти вихідний сигнал.

4. Заповнити таблицю для різних зразків металу.

5. Заміряти вихідний сигнал для зразка, що покрито речовиною невідомої товщини.

6. Знайти за даними п. 4 товщину покриття.

7. Побудувати характеристики датчика для різних матеріалів та відобразити на них поле похибок.

8. Скласти звіт про виконану роботу і підготувати відповіді на контрольні запитання.

### **Питання для контролю та самоконтролю**

1. Високочастотне електромагнітне поле, його характеристики та відмінності від електростатичного та магнітного поля постійного струму?

2. Яка природа сил взаємодії високочастотного електромагнітного поля з електронами речовини?

3. Яка відмінність характеру взаємодії високочастотного електромагнітного поля з електронами для різних типів речовини (провідники, електроліти, напівпровідники, діелектрики)?



4. Як визначити поріг чутливості?
5. Як знайти нелінійність характеристики датчика?
6. Що таке гістерезис характеристики датчика та чому він виникає?
7. Що забезпечує пружина між рухомою частиною корпусу датчика та корпусом із закріпленою котушкою датчика?
8. Чи впливає матеріал корпусу датчика на його характеристику?
9. Яким чином можна змінити характер змін вихідної напруги датчика із зростаючого на спадний?
10. Як змінити схему підключення датчика, що забезпечувати коригування нуля?

### **Література**

1. ДСТУ 3349-96 Вимикачі (перемикачі) шляхові безконтактні. Загальні технічні умови (ГОСТ 26430-96)
2. EL-PRO-CUS Electronics Products Focus.  
<https://www.elprocus.com/inductive-transducer-working-its-applications/>  
Date of eplayd 28.11.22
3. Г. Ф. Бушок, Є. Ф. Венгер. Курс Фізики. Електрика та магнетизм. – Київ. «Вища школа». 2003. – 278с.
4. Трунов О. М., Кулаков О. Г. Авторське свідоцтво №1837152. Пристрій для визначення наявності металу. 1992.

## *Лабораторна робота № 3*

### **Вивчення роботи та характеристики ємнісного датчика**

**Мета:** вивчити принцип дії ємнісного датчика кута повороту та дослідити параметри його характеристик, такі, як: поріг чутливості, лінійність та робочий діапазон, та можливості застосування для реалізації в якості датчиків елементів РТС.

#### **Теоретичні відомості**

Сенсорні модулі для забезпечення функціонування АСК, що містять датчики які побудовано за ємнісним принципом. Як і деякі інші типи датчиків (наприклад, індуктивні датчики), ємнісні датчики працюють без фізичного контакту з досліджуванним об'єктом. Іншими словами, ці типи датчиків є безконтактними пристроями. З їх допомогою можуть бути виявлені як електропровідні, так і непровідні матеріали. Завдяки цій властивості ємнісні датчики можуть застосовуватися в тих місцях, де, наприклад, індуктивні датчики неможливо застосувати.

#### **ЄМНІСНИЙ ДАТЧИК. БУДОВА, ПРИНЦИП І РЕЖИМ РОБОТИ**

Цей тип датчика не дуже складний як пристрій і зазвичай складається з:

##### **Корпус**

Корпус об'єднує всі елементи у єдине ціле та забезпечує надійний захист елементів від зовнішніх факторів, які можуть вплинути на його точність та ефективність. Корпус ємнісного датчика зазвичай виконаний з латуні або поліаміду.

##### **З'єднувач**

Це спеціальна смола, яка захищає сенсорні елементи від вологи або інших шкідливих речовин, що можуть спричинити корозію електродів .

##### **Тригер**

Тригер створює необхідну потужність сигналу перемикачання і величину гістерезису (це різниця в відстані до включення).

##### **Світлодіоди**

Світлодіоди забезпечують швидке налаштування і показують положення перемикача.

##### **Підсилювач**

Підсилює вихідний сигнал до бажаного значення.

### Демодулятор

Демодулятор змінює високочастотні коливання, поки не зміниться напруга.

### Генератор

Він створює електричне поле, яке впливає на об'єкт.

### Електроди

Робоча поверхня ємнісного датчика зазвичай являє собою два електроди, які діють як конденсаторні пластини, які підключені до ланцюга зворотного зв'язку генератора. Він, в свою чергу, налаштований на зміну своєї потужності в міру наближення до контрольованого об'єкту. В результаті цих коливань, коли датчик наближається до об'єкту, генератор генерує зростаючу амплітуду, яка обробляється і створює вихідний сигнал. Ємнісні датчики наводяться в дію електропровідними об'єктами та діелектриками. У міру наближення провідного об'єкту відстань спрацьовування стає набагато більше, ніж коли випробовувані об'єкти представляють собою діелектрики (відстань реакції залежить від діелектричної проникності).



а)



б)

Рисунок 11 – Фото ємнісних циліндричних датчиків переміщення з різним типом кріплення: а) – під стяжний циліндричний затискач; б) – під затискання на плоскому виступі двома різьбовими двосторонніми затискачами.

### Застосування

Застосування датчиків ємнісного типу надзвичайно широке і різноманітне. Вони використовуються в системах регулювання виробничих процесів практично у всіх галузях промисловості. Вони використовуються в автомобільних парктроніках і для контролю напо-

внення цистерн рідкими, сипучими і газоподібними речовинами, для вимикачів на автоматичних лініях, для машинних центрів, машин, конвеєрів, систем сигналізації та інших.

## **ТИПИ ЄМНІСНИХ ДАТЧИКІВ І ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ**

### **Датчики наближення**

В теперішній час одними з найбільш часто використовуваних ємнісних датчиків є датчики наближення, які, крім того, що вони надзвичайно надійні, мають дуже широкий спектр переваг.

Датчики цього типу використовуються практично у всіх областях, адже вони мають дуже прийнятну вартість. Вони використовуються для контролю рівня заповнення різних ємностей, управління напругою, для сигналізації в разі проблем на виробничих лініях і інших.

### **Ємнісні датчики для кутових і лінійних переміщень**

Датчики цього типу використовуються в таких галузях, як машинобудування, енергетика, транспорт, будівництво та інші.

### **Інклінометри**

Ємнісні інклінометри використовуються на нафтових платформах в системах нівелювання, для визначення деформації опор, для моніторингу і контролю ухилу автомобільних доріг і залізниць при їх будівництві, для визначення якості автомобілів, суден, кабін ліфтів, піднімального устаткування, сільськогосподарської техніки для визначення кутового зміщення обертових об'єктів, таких як вали, шестерні та механізми, як стаціонарних, так і рухомих.

### **Ємнісні датчики рівня**

Датчики цього типу використовуються в системах моніторингу, регулювання та контролю процесів в харчовій, фармацевтичній, хімічній і нафтовій промисловості.

Вони надзвичайно ефективні при роботі з рідинами, сипучими матеріалами, які проводять і не проводять, грузлими речовинами, а також у важких робочих умовах в приміщеннях або місцях, де накопичується пил або конденсат.

Ємнісні датчики широко використовуються в галузях, де потрібне точне вимірювання загального тиску, товщини діелектричних матеріалів, вологості, лінійних і кутових деформацій і інших.

### КЛАСИФІКАЦІЯ ЄМНІСНИХ ДАТЧИКІВ ЗА СПОСОБОМ ЇХ РЕАЛІЗАЦІЇ

Всі типи ємнісних датчиків можна розділити на дві групи: датчики з однією і двома ємностями. Останні далі діляться на диференціальні і напівдиференціальні.

Датчики з одною ємністю мають просту конструкцію і являють собою конденсатори зі змінною ємністю. Цей тип датчиків має ряд недоліків, які включають значний вплив зовнішнього середовища, такий як вологість і температура

Недолік датчиків з диференціальною конструкцією полягає в тому, що вони відрізняються від датчиків з однією ємністю, а диференціальні мають, як мінімум, три сполучних дроти між датчиком і вимірювальним пристроєм для нейтралізації негативного впливу вологості і температури.

Однак, через цей недолік диференціальні датчики значно підвищують їх точність і стабільність і, тим самим, розширюють область їх застосування.

#### **Плюси ємнісних датчиків**

У порівнянні з конкурентними оптичними, індуктивними і п'єзоелектричними датчиками ємнісні датчики мають переваги, серед яких:

- простота виробництва – для виготовлення ємнісних датчиків використовуються недорогі матеріали, що впливає на кінцеву ціну продукту;
- малий розмір і вага;
- низьке енергоспоживання;
- високий ступінь чутливості;
- безконтактний (вони не обов'язково повинні бути поруч з об'єктом дослідження);
- тривалий термін служби;
- проста адаптація конструкції сенсора під різні завдання і вимірювання.

#### **Недоліки**

Деякі з найбільших недоліків ємнісних датчиків:

- порівняно невеликий коефіцієнт конверсії (передачі);
- необхідність роботи на частоті вище 50 Гц;
- на продуктивність може впливати пил і волога, а датчик може виявити неправильні виміри;
- температурна чутливість.

Ємнісні датчики відрізняються простотою виконання, що дозволяє створити довговічну і надійну конструкцію. Параметри конденсатора залежать тільки від його характеристик і не залежать від властивостей використовуваних матеріалів, якщо вони правильно вибрані.

Проблему їх чутливості до температури можна вирішити, вибравши відповідний матеріал для пластин і відповідну ізоляцію для їх кріплення. Залишається тільки поліпшити їх захист від шкідливого впливу пилу, вологи і іонного випромінювання, і цей тип датчиків матиме ще більший спектр застосування. Таким чином, ємнісні датчики використовують дуже невелику механічну силу, яка їм необхідна для переміщення рухомої частини, дозволяють регулювати вихід системи і працюють з високою точністю. Все це робить ці датчики незамінними для точного вимірювання провідних і непровідних елементів. У ємнісних датчиках використовується залежність ємності з конденсатором від площі пластин  $s$ , відстані між ними  $h$  та діелектричної сталої  $\epsilon$  відповідно до формули (3):

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{h}$$

Ємнісними датчиками можна вимірювати або контролювати лінійні й кутові переміщення, розміри, температуру, відносну вологість повітря та інші параметри. Дуже часто в ємнісних датчиках для зміни ємності  $C$  використовується зміна площі пластин конденсаторів змінної ємності, що перекриваються, викликана кутовим переміщенням (поворотом) осі конденсатора  $\alpha(t)$ . При цьому змінюється ємнісний опір  $X_C$  у вихідному колі датчика, а також струм навантаження  $I_H$  (рис. 12).

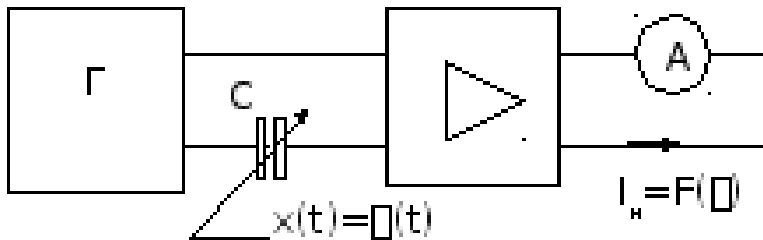


Рисунок 12 – Схематичне зображення дослідження ємнісного опору чутливого елемента одноємнісного датчика.

Оскільки ємність змінного конденсатора незначна ( $C = 50 - 300$  пФ), то для зменшення похибки ємнісні датчики живлять струмом підвищеної частоти ( $f=10 - 30$  кГц). Наприклад, при максимальній ємності  $C = 100$  пФ на частоті  $50$  Гц ємнісний опір конденсатора становитиме

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi 50 * 100 * 10^{-12}} = 31,83 * 10^6 \text{ Ом},$$

а на частоті  $25$  кГц буде дорівнювати

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi 25 * 100 * 10^{-12}} = 63,66 * 10^3$$

### **ТАХОГЕНЕРАТОРНИЙ ДАТЧИК**

Тахогенераторний датчик відноситься до типу генераторних датчиків і призначений для вимірювання швидкості обертання (числа обертів) рухомих частин механізмів: валів генераторів та електродвигунів, елементів різноманітних машин.

Тахогенераторний датчик являє собою електричну машину (генератор  $\Gamma$ ), ротор якої містить магніт (або обмотку збудження), що створює магнітний потік  $\Phi_M$ . При обертанні ротора з кутовою швидкістю  $\Omega$  обмотку статора пронизує магнітний потік ротора, що змінюється за законом  $\Phi = \Phi_M \sin \Omega t$ . При цьому в обмотці статора наводиться е.р.с.

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} = -N_w \Phi_m \sin wt = -E_m \sin wt$$

де  $N$  – кількість витків обмотки статора.

Конструктивно генератор виконується так, щоб забезпечити в робочому діапазоні максимально лінійну залежність амплітудного значення електрорушійної сили  $E_m$  від швидкості обертання. На рисунку 13 представлено схему принципу під'єднання тахогенераторного датчика.

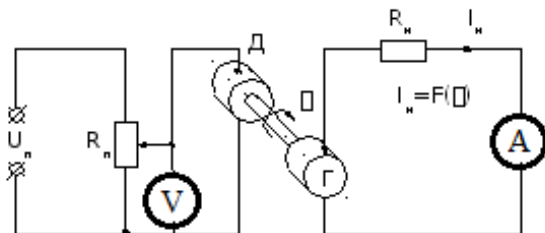


Рисунок 13 – Схематичне зображення дослідження ємнісного опору чутливого елементу одноємнісного датчика.

Схема передбачає наявність двигуна постійного струму, як механічного приводу вала із феромагнітними виступами, що рівномірно вирізано на диску.

#### **Частина I. Опис лабораторної установки дослідження ємнісного чутливого елементу кутового датчика та порядок виконання роботи**

Устаткування лабораторної установки дослідження ємнісного чутливого елементу кутового датчика представлено на рисунку 14. Воно складається з моделі чутливого елементу для одноємнісного датчика кута повороту, що вмонтовано у корпус зручний для роботи студентам та RLC метру, як приладу для виміру величини ємності.



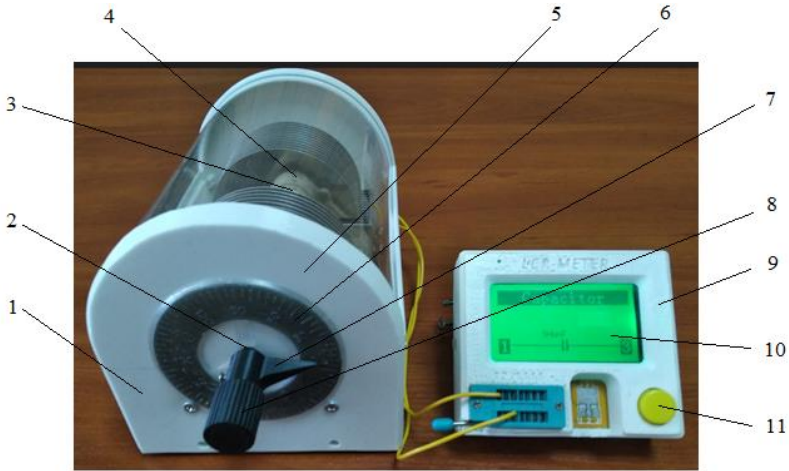


Рисунок 14 – Фото устаткування установки дослідження ємнісного чутливого елемента кутового датчика.

Досліджуваний в лабораторній роботі ємнісний чутливий елемент датчика кута повороту змонтовано у корпусі 1 на валу 2, який закріплено у двох підшипниках 3 та 4 (на фото не видно). На лицьовій панелі 5 установки закріплено шкалу кута повороту 6, а до вала приєднано поворотний указник 7 з ручкою для повороту 8. Наявність RLC-метру 9, приладу для вимірювання безпосередньо ємності спрощує задачу дослідження характеристики залежності ємності від кута повороту.

Електроживлення RLC-метру. Прилад вмикається пересувним вимикачем, що розташовано зліва на боковій стінці корпусу. Прилад працює від вбудованого акумулятору, та для його зарядки у його корпусі розташовано плату зарядного пристрою. Зовнішнє живлення подається через міні USB роз'єм. Включення схеми вимірювання ємності здійснюється кнопковим вимикачем 11 лицьової панелі RLC – метру. Значення ємності відображається на рідинно кристальному індикаторі (РКІ) 10 лицьової панелі після паузи-затримки. Зміна входної величини кута повороту ємнісного датчика, здійснюється регулюванням кутового положення рукояткою для повороту 8.

### Порядок виконання роботи

1. Вивчити принцип дії RLC-метру та підключити виводи датчика до роз'єму приладу.

2. Дослідити залежність зміни вихідних сигналів ємності від зміни вхідних величин кута повороту.

3. На підставі результатів дослідження побудувати графіки залежностей ємності від кута повороту та побудувати поле похибок.

4. Знайти поріг чутливості, чутливість, середньо квадратичну похибку, граничну межу, відобразити паспортні дані датчика.

5. Скласти звіт про виконану роботу і підготувати відповіді на контрольні запитання.

### Питання контролю та самоконтролю

1. Що таке ємнісний датчик його пристрій і режим роботи?
2. Типи ємнісних датчиків та їх застосування?
3. Класифікація ємнісних датчиків за способом їх реалізації?
4. Які величини вимірює RLC-метр?
5. Що таке електроємність ?
6. Які параметри впливають на величину електроємності?
7. Відносна та абсолютна діелектрична проникність речовини?
8. Вектор діелектричного зміщення ?
9. Ємність плоского конденсатора?
10. Як визначити і відобразити поле похибок?

### Частина II. Опис лабораторної установки дослідження характеристики ємнісного датчика переміщення (датчика вимикача) та порядок виконання роботи

Устаткування для дослідження характеристики ємнісного датчика переміщення представлено на фото (рисунок 15).

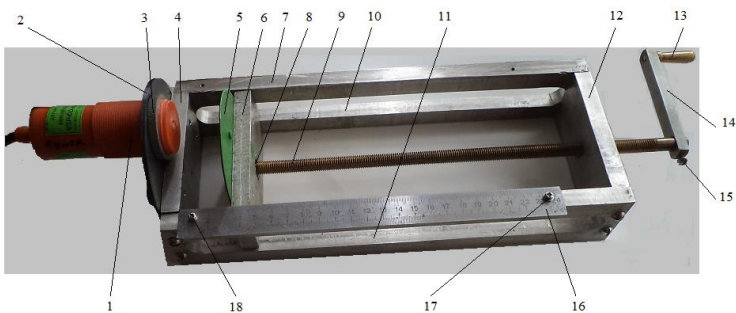


Рисунок 15 – Фото установки дослідження характеристики ємнісного датчика переміщення (датчика вимикача).

Досліджуваний в лабораторній роботі ємнісний датчик переміщення 1 (один з виходів якого працює також як неконтактний вимикач) закріплено у отворі диску 2 за допомогою різьбового з'єднання та затискної циліндричної гайки 3. Диск 2 закріплено до корпусної планки 4. Другий диск 5 закріплено до рухомої планки 6, яка своїми виступами орієнтована у напрямних пазах-вирізах планки 7 та їй протилежній і паралельній. У планці 6 закріплено підшипник 8, у втулці якого закріплено гвинт 9. Виступи планки 8 при обертанні гвинта 9 переміщуються по пазах 10 та 11 бокових планок корпусу устаткування. У планці 12 закріплено гайку, унаслідок чого при обертанні за ручку 13 за допомогою рукоятки 14, що кріпиться гвинтом 15, обертається гвинт 9, а планка 6 з диском 5 переміщується по напрямним 10 та 11. Положення диску 5 відносно датчика 1 першочергово виставляється, а потім фіксується по лінійці 16, яка жорстко закріплена на корпусі гвинтами 17 та 18 на планці 19 корпусу устаткування.

### Порядок виконання роботи

1. Вивчити принцип дії мультиметру та підключити виводи датчика до роз'єму приладу, після чого підключити за маркуванням дровів датчика живлення до датчика.

2. Встановити нульове значення відстані між датчиком 1 та диском 5 після чого закріпити гайкою 3 положення датчика 1 на диску 2. Записати початкове положення диску 5 та планки 6 по лінійці 16.

3. Дослідити залежність вихідного сигналу ємнісного датчику від зміни вхідного відстані до диску 5 та планки 6 по лінійці 16.

3 На підставі результатів дослідження побудувати графіки залежності вихідної напруги від відстані та побудувати поле похибок.

4. Знайти поріг чутливості, чутливість, середньо квадратичну похибку, граничну межу, відобразити паспортні дані датчика.

5 Скласти звіт про виконану роботу і підготувати відповіді на контрольні запитання.

### Питання контролю та самоконтролю

1. Що таке одноємнісний датчик переміщення або безконтактний вимикач як пристрій і його можливі режими роботи?

2. Типи ємнісних датчиків та їх застосування?

3. Класифікація ємнісних датчиків за способом їх реалізації?

4. Що таке електроємність ?

5. Які параметри впливають на величину електроємності?

6. Відносна та абсолютна діелектрична проникність речовини?

7. Вектор діелектричного зміщення ?
8. Ємність плоского конденсатора?
9. Як визначити і відобразити поле похибок?

### **Література**

1. Мещанінов С. К., Співак В. М., Орлов А. Т. Електронні методи і засоби біомедичних вимірювань. – Київ : КПІ, 2016. – 211 с.
2. Шарапов В. М., Полищук Е. С., Кошевой Н. Д., Ишанин Г. Г., Минаев И. Г., Совлуков А. С. Датчики. Довідник. – Техносфера. 2012. – 625 с.

## *Лабораторна робота № 4*

### **Вивчення принципу роботи та характеристики датчиків температури та визначення температурних характеристик провідника, напівпровідника та термопар**

**Мета:** вивчити принцип дії датчика температури, дослідити його параметри і характеристики, такі, як: поріг чутливості, лінійність та робочий діапазон, і можливості застосування для реалізації в якості датчиків елементів РТС.

#### **Теоретичні відомості**

##### **Датчики температури. Види і принцип дії**

Датчики температури потрібні для того, щоб контролювати температуру приміщення, рідини, твердого об'єкта або розплавленого металу.

Основою дії температурних датчиків та застосування в автоматизованих системах керування є перетворення температури в електричний сигнал. Це обумовлює переваги електричних вимірювань: результати легко передавати по мережі, з високою швидкістю передачі. Величини можуть перетворюватися одна в одну на пряму та у зворотному напрямі. Цифровий код створює підвищену точність виміру, швидкість і чутливість.

##### **Термопари**

Термопара утворюється з двох дротів з різних металів з різною роботою виходу, що зварено між собою у спай. При різниці температур між гарячим і холодним кінцем в ланцюзі виникає електричний струм. Величина цього електричного струму залежить від термоелектричної рушійної сили термопари, яка становить від 40 до 60 мкВ, в залежності від матеріалу дротів, що з'єднано у термопару. Матеріал термопари може бути різним. Це можуть бути нікель-хромові, хромо-алюмінієві, залізо-нікелеві, залізо-константанові і т. д. Часто мультиметри передбачають режим виміру температури і комплектуються датчиками температури, наприклад (рисунок 16).



Рисунок 16 – Фото термопари з комплекту мультиметру DT9208A

### **Датчики температури**

Багато виробництв, систем, приладів використовують в своєму складі різні датчики температури. Застосування даного обладнання необхідно у всіх випадках, коли робочі параметри системи так чи інакше залежать від температурних факторів. Важливо, щоб тип і характеристики пристроїв відповідали вимогам застосування.

### **Основні види**

На сьогоднішній день випускаються наступні види температурних датчиків:

- **Термістори.** По суті, даний тип датчиків – це термометри опору, виготовлені на основі змішаних оксидів перехідних металів. Термістори діляться на два основних типи – РТС (з позитивним коефіцієнтом) і НТС (з негативним коефіцієнтом температурного опору). Найбільш поширені температурні датчики НТС. Термістори РТС застосовуються виключно у вузьких діапазонах температур (всього кілька градусів), тому, їх використання частіше обмежується системами контролю і сигналізації. В цілому, термометри дуже чутливі до вимірюваної температури, але, на жаль, цього не можна сказати про лінійність вихідного сигналу. Приклади деяких промислових датчиків температури наведено на рисунку 11.



Рисунок 17 – Фото промислових датчиків температури у захищених корпусах та неконтактного приладу для виміру температури

- **Термопари.** Дане обладнання є ідеальним рішенням для вимірювання температури в максимально широкому діапазоні (до +2300°C). Воно відрізняється високою точністю і відтворюваністю. Але, важливо зазначити: термопари потребують встановлення схем посилення сигналу, що необхідно для його подальшої обробки.

- **Терморезистивні датчики.** Принцип роботи терморезистивних датчиків температури (RTDs – Resistance Temperature Devices) заснований на пропусненні через них електричного струму.

- **Напівпровідникові датчики.** Сучасні напівпровідникові датчики виконують свої функції в широкому діапазоні температур. Вони мають високу точність. Пристрої оснащені вбудованою схемою посилення сигналу, що дозволяє налаштовувати обладнання на необхідну температурну залежність.

Згідно характеристикам і області застосування, виділяють датчики температури повітря, рідини і т. д. Крім цього, датчик температури-

ри повітря може бути зовнішнім (вуличним) або внутрішнім (кімнатним, що встановлюються в приміщеннях).

Розрізняють датчики температури і за принципом виконання чутливого елемента, а також, типу застосованого корпусу:

- датчики з платиновим чутливим елементом;
- корпусовані датчики;
- датчики з напівпровідниковим чутливим елементом.

Основні виробники температурних датчиків для систем автоматизації «розумний будинок» – Siemens SBT, REGIN, S + S REGELTECHNIK, HONEYWELL та інші.

### **Характеристики**

Датчики температури зовнішнього повітря, рідини (води), кімнатні пристрої і т. д. мають єдиний перелік найбільш важливих характеристик. Плануючи придбати датчик температури, слід звернути увагу на наступні параметри:

- точність показників (можлива / допустима похибка);
- діапазон вимірюваних температур;
- лінійність вихідних характеристик;
- орієнтовний (гарантій) термін служби;
- стандартизація характеристик (можливість взаємозамінності датчиків);
- стійкість до температурних перевантажень;
- час відгуку.

Будь то датчик зовнішньої температури повітря або пристрій, що вимірює параметри рідини або газу, дані характеристики повинні обов'язково враховуватися при виборі і установці типу обладнання. У деяких випадках можна віддати перевагу такій характеристиці як мінімальний час відгуку, а в інших – першорядну роль відіграє ширина діапазону температур.



### Лабораторна робота № 4/1

#### Вивчення температурної залежності питомого опору провідників

**Мета:** експериментальна перевірка залежності опору від температури та визначення температурного коефіцієнту провідників.

Здатність провідника проводити струм характеризується його питомим опором, величина якого визначається хімічною природою речовини та умовами, наприклад температурою, в яких він знаходиться. Для більшості металів питомий опір  $\rho$  зростає приблизно за лінійним законом:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t), \text{ а } R = R_0(1 + \alpha t), \quad (1)$$

де  $\rho_0$  – питомий опір при  $0^\circ\text{C}$ ;  
 $t$  – температура за шкалою Цельсія;  
 $\alpha$  – температурний коефіцієнт.

Температурним коефіцієнтом опору провідників називається відносна зміна питомого опору провідника при зміні його температури на 1 градус:

$$\alpha = \frac{\Delta\rho}{\rho t} = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0 t} = \frac{R - R_0}{R_0 t}$$

При низьких температурах спостерігається відхилення від лінійної залежності.

В цій роботі температурна залежність опору визначається за допомогою експериментальної установки, схема якої зображена на рис. 18.

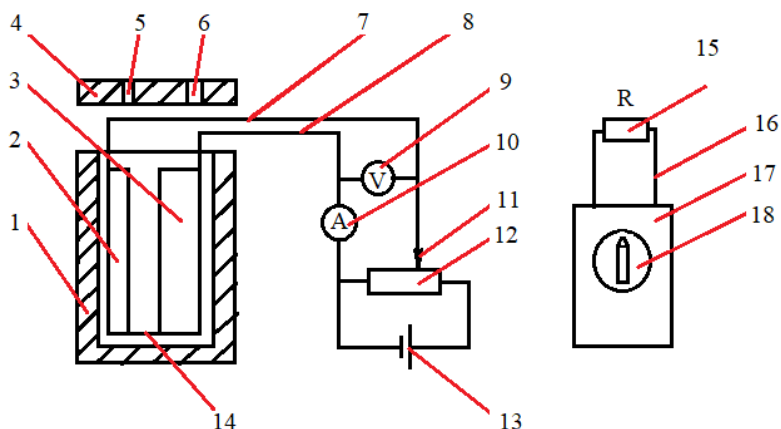


Рисунок 18 – Схематичне зображення експериментальної установки для дослідження характеристики чутливих елементів датчиків температури

Установка складається із трьох умовних структурних блоків: блоку нагрівача; регульованого та стабілізованого блоку живлення, що забезпечує стабілізацію кожного із режимів роботи; блоку заміру параметрів чутливого елемента опору та режиму температури.

Схема складається з із циліндричної ємності 1 з теплоізолювальними стінками, розподілених вертикальних нагрівачів 2 та 3 або і більше, що з'єднано послідовно і розташовано по внутрішній поверхні стінок. Простір для розташування чутливих елементів що досліджуються закривається теплоізолюваною кришкою 4, у якій передбачено отвір 5 для дротів, що з'єднують чутливий елемент із вимірювальною апаратурою та окремий отвір 6 для проведення електрично ізолюваних дротів живлення і вимірювальних засобів термометри і термометра (умовно на схемі не показано). Вводи 5 та 6 герметично закриті під час дослідження термостійкими тампонами. Дроти 7 та 8 під'єднують нагрівачі 2 і 3, які послідовно з'єднано дротом 14. Коло живлення, що забезпечує необхідні режими роботи складається із вольтметра 9 амперметра 10 та реостата, з клемою повзунка 11, якою регулюється напруга нагрівача, та 12 які живить сбаланзоване джерело 13. Кінці дротів чутливого елемента 15, що пройшли через отвір 5 під'єднано дротами 16 до мультиметра 17. Поворотний вказівник 18 задає режими та діапазон роботи мультиметра 17. При необхідності

виміру термопарою використовується два мультиметра (на схемі не показано). Хромель–алюмелева термопара та цифровий вольтметр, що дозволяє вимірювати температуру до 300 градусів за Цельсієм та величину опору постійного струму в діапазоні від 0,001 Ом до 20 МОм.

Температура досліджуваного опору визначається шляхом вимірювання термо-ЕРС хромель-алюмелевої термопари за допомогою мультиметру DT9208A або потенціометром постійного струму ПП-63. Перехід від термо-ЕРС в мілівольтах до відповідної температури здійснюється за допомогою таблиці для хромель-алюмелевої термопари (табл. 1). Температурний коефіцієнт  $\alpha$  визначається як середнє значення температурних коефіцієнтів:

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^N \alpha_i}{N} ; \quad \alpha_i = \frac{R_{x_{i+1}} - R_{x_i}}{R_{x_i} t_{i+1} - R_{x_{i+1}} t_i} \quad (1)$$

де  $R_{x_i}$ ,  $t_i$  – значення опору та температури в  $i$ -й точці;

$N$  – число експериментальних точок температурної залежності.

### **Методика виконання роботи**

1. Зібрати схему рис. 18.
2. Ознайомитися з принципом роботи ПП-63 та цифрового вольтметра.
3. Ввімкнути цифровий вольтметр, дати йому прогрітися 15 хв.
4. Ввімкнути муфельну піч.
5. Виконати заміри опору  $R_i$  за цифровим вольтметром та відповідні їм температури  $t$  за потенціометром ПП-63 для 10-ти значень термо-ЕРС з кроком 0,5 мВ за реохордом.
6. Виконати замір температури навколишнього середовища (кімнатної температури) за термометром.
7. Використовуючи таб. 1, перейти від термо-ЕРС до температури, враховуючи, що другий спай знаходиться при кімнатній температурі.
8. За формулою (1) розрахувати температурний коефіцієнт опору  $\alpha$  для декількох пар температур.
9. Похибку визначення температурного коефіцієнта рахувати методом середнього.
10. Побудувати графік та нанести поле похибок

*Таблиця 1*

мВ	°С	мВ	°С	мВ	°С
0	0	1,25	31,25	2,5	62
0,25	6,25	1,5	37,5	2,75	68
0,5	12,5	1,75	43,75	3	74
0,75	18,75	2,0	50,0	3,25	80
1,0	25,0	2,25	56	3,5	86

**Контрольні питання**

1. Що називається температурним коефіцієнтом опору?
2. Як залежить опір провідника від температури?
3. Що таке відносне вимірювання опору провідника?
4. Як знайти похибку у визначенні кімнатної температури?
5. Від чого залежить температурний коефіцієнт опору провідника?
6. Від чого залежить опір провідника?

**Література**

1. Кучерук, І. М. Загальний курс фізики. У трьох томах : навч. посіб. Т. 3 : Оптика. Квантова фізика / І. М. Кучерук, І. Т. Горбачук. – 2-ге вид., випр. – К. : Техніка, 2006. – 518 с.
2. Введение в мехатронику / О. М. Яхно, А. В. Узунов, А. Ф. Луговской, и др. – К. : НТУУ «КПИ», 2008.

## Лабораторна робота № 4/2

### Вивчення температурної залежності опору терморезисторів

**Мета:** вивчення залежності опору напівпровідникового резистора від температури; отримання градуовальної кривої та визначення температурного коефіцієнта терморезистора

#### Теоретичні відомості

Терморезистор – це теплозалежний резистор, що виготовлений з напівпровідника та має високий негативний температурний коефіцієнт.

Тверді тіла за електричними властивостями можуть бути поділені на три класи: метали, напівпровідники, ізолятори. Напівпровідники займають проміжне місце за величиною питомої електропровідності між металами та ізоляторами. Основною та характерною властивістю напівпровідників є здатність їх електропровідності змінюватись під дією різних факторів: температури, освітлення, поділу і т. д. Електропровідність напівпровідників різко зростає з підвищенням температури, в той час як в металах вона спадає.

В металах, навіть при найнижчих температурах, вже є велика кількість ( $\approx 10^{23} \text{ м}^{-3}$ ) вільних електронів. Тепловий рух в утворенні електронів провідності в металах не має суттєвого значення, та концентрація електронів провідника, таким чином, практично не залежить від температури. Електропровідність метала, як показує досвід, зменшується зі збільшенням температури. Цю закономірність легко зрозуміти, аналізуючи формулу для питомої електропровідності

$$\sigma = ne\mu_0, \quad (1)$$

де  $n$  – концентрація носіїв струму;

$e$  – заряд електрону;

$\mu_0$  – рухомість носіїв струму (середня швидкість, яку набуває носій заряду в електричному полі напруженість якого дорівнює одиниці), яка падає з підвищенням температури. Зовсім інакшою є справа у випадку напівпровідників, коли концентрація носіїв струму сильно залежить від температури.

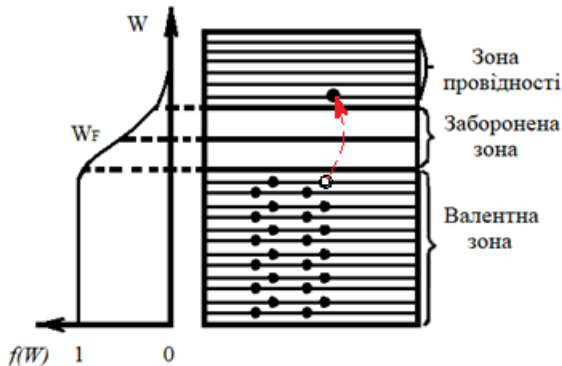


Рисунок 19 – Енергетична діаграма розподілу електронів у напівпровіднику

На рисунку 19 показана картина появи провідності напівпровідника при нагріванні. Тут показана енергетична модель напівпровідника із зображеними на ній полосами енергій, які можуть мати електрони в напівпровіднику, так званими валентною зоною та зоною провідності. Ці зони дозволених значень енергії відокремлені одна від одної інтервалом заборонених значень енергії – забороненою зоною. Ширина забороненої зони позначена  $\Delta W_0$ . В напівпровідниках рівні валентної зони повністю зайняті електронами – зона заповнена. Тому для того, щоб збільшити енергію електрона, необхідно надати йому енергію не меншу, ніж  $\Delta W_0$ , виконуючи, наприклад нагрівання напівпровідника (рис. 19).

При цьому виникають носії струму: електрони та «дірки». Їх концентрація зростає з температурою за законом

$$n \approx e^{-\frac{\Delta W_0}{2kT}}, \quad (2)$$

де  $\Delta W_0$  – ширина забороненої зони;

$k$  – стала Больцмана;

$T$  – абсолютна температура.

Провідність, що виникає в результаті переходу електронів з верхніх рівнів валентної зони в зону провідності, називається власною.

Якщо в основній кристалічній решітці напівпровідника є домішкові атоми, то в забороненій зоні утворюються вузькі (локальні) енергетичні рівні. На рис. 20 та рис. 21 представлені два найбільш цікаві

випадки, коли домішкові рівні розташовані або поблизу дна зони провідності, або поблизу валентної зони.

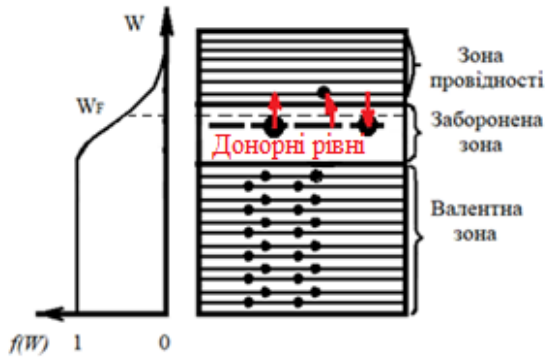


Рисунок 20 – Схематичне відображення розподілу електронів у напівпровіднику з  $n$  типом домішкової провідності

В першому випадку електрони домішкових атомів можуть легше закидатися при нагріванні з цих рівнів у зону провідності, інакше кажучи, вони можуть відриватися від домішкових атомів та блукати по кристалу. Так виникає домішкова електронна провідність. Необхідна для цього енергія  $\Delta W_q$  – енергія іонізацій домішку – дорівнює інтервалу від домішкового рівня до дна зони провідності. Вона зазвичай набагато менше енергії збудження власної провідності. Домішки, які доставляють електрони в зону провідності, називаються донорами, а енергетичні рівні цих домішок – донорними рівнями. В цьому випадку концентрація електронів провідності змінюється за

$$n \approx e^{-\frac{\Delta W_A}{2kT}}$$

Рис. 21 дає уявлення про напівпровідник, в якому локальні незаповнені рівні розташовуються поблизу валентної зони.

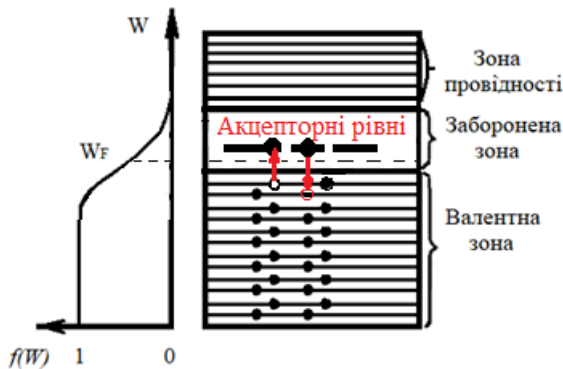


Рисунок 21 – Схематичне відображення розподілу електронів у напівпровіднику з  $p$  типом домішкової провідності

На відміну від попереднього випадку теплове збудження буде насамперед переводити електрони з валентної зони на ці порожні домішкові рівні. Носіями струму будуть «дірки» валентної зони, і тому електропровідність називають дірковою. Домішки, що «захоплюють» електрони з валентної зони та називаються акцепторами, а їх енергетичні рівні – акцепторними рівнями. Концентрація «дірок» провідності та при цьому зростає з температурою за законом  $n \approx e^{-\frac{\Delta W_A}{2kT}}$ , де  $\Delta W_A$  – енергія іонізації акцепторів. Таким чином, квантова механіка пояснює походження типів провідності.

Зауважимо, що енергетична модель ізолятора така ж, як на рис. 13, лише ширина забороненої зони  $\Delta W_q$  буде для ізолятора приблизно на порядок більше.

Якщо уявити, що в напівпровіднику відсутні домішки (власний напівпровідник), то кількість електронів в зоні провідності, що дорівнює кількості «дірок» в заповненій зоні, як зазначалося вище, буде пропорційна  $e^{-\frac{\Delta W_o}{2kT}}$ .

Питому електропровідність згідно з формулою функції розподілу (1) та (2) можна записати у вигляді

$$\sigma = \sigma_1 e^{-\frac{\Delta W_A}{2kT}} \quad (3)$$



Тут  $\sigma_1$  можна вважати практично сталою для даного примірника, оскільки рухомість носіїв струму залежить зазвичай від температури значно слабше (степенева функція температури), ніж їх концентрація

(експонента з показником  $-\frac{\Delta W_0}{2kT}$ , як правило, значно більше одиниці).

При наявності домішків в напівпровіднику провідність при низьких температурах буде головним чином обумовлено електронами або «дірками» домішки, тому що енергія їх іонізацій значно менша ширини забороненої зони.

Питома електропровідність в цьому випадку

$$\sigma = \sigma_2 \frac{\Delta W}{2kT}, \quad (4)$$

де  $\Delta W$  – енергія іонізації домішки, рівна  $\Delta W_d$  або  $\Delta W_A$ .

Величину  $\sigma_2$ , так само, як і  $\sigma_1$ , можна вважати сталою при умові, що  $\Delta W \Rightarrow 2kT$ . При підвищенні температури концентрації домішкових носіїв струму швидко досягає насичення. Це означає, що звільнюються усі донорні або заповнюються електронами усі акцепторні рівні. Разом з тим, з ростом температури все в більшій мірі починає проявлятися власна провідність. Тому електропровідність напівпровідника складається з власної та домішкової провідності:

$$\sigma = \sigma_1 \frac{\Delta W_0}{2kT} + \sigma_2 e^{-\frac{\Delta W}{2kT}}. \quad (5)$$

При низьких температурах переважає другий доданок (домішкова провідність), при високих – перший (власна провідність).

Як видно з виразів (3)–(5), для напівпровідників питома електропровідність або обернена їй величина – питомий електричний опір – значно залежить від температури. В цьому й полягає цінна властивість терморезисторів, які знайшли широке застосування в науці та техніці. Використання терморезисторів в якості термометрів опору дає помітні переваги в порівнянні з іншими термометрами опору (наприклад, платиновими). До таких переваг слід віднести:

- 1) малі розміри терморезисторів (до декількох десятих долей міліметрів);
- 2) мала теплова інерційність;
- 3) можливість вимірювання температури поверхні невеликих об'єктів, матеріал яких характеризується поганою теплопровідністю.

Відносно прості пристрої з терморезисторами дозволяють виявити зміни температури до  $0,0005^\circ$ .

Терморезистори застосовуються також в реле часу, стабілізаторах напруги та інших пристроях електронної техніки та автоматики.

Використовуваний в лабораторній роботі терморезистор типу ММТ-4 виготовлений з  $MnO_4$  та  $CuO$ . Його будова показана на рис. 22.

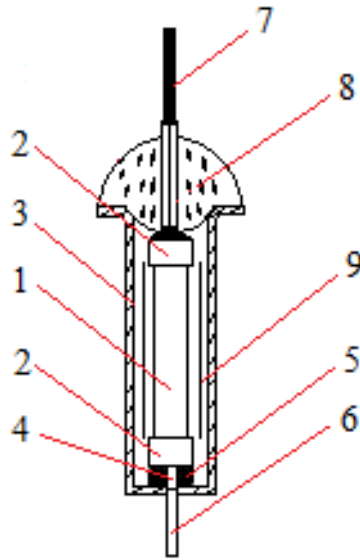


Рисунок 22 – Схематичне відображення розрізу терморезистора типу ММТ-4

Напівпровідниковий стрижень 1 з контактними ковпачками 2, вміщено в литий металевий герметичний корпус 3 циліндричної форми, що виготовлено з червоної міді. Металевий контакт 4 на ковпачку 2 напівпровідникового стрижня 1 впаяно в корпус 3 за допомогою олов'яно-свинцевого сплаву 5, і, таким чином, корпус 3 терморезистора є одним з його виводів. Для зручності підключення терморезистора в схему до його корпусу приварено дротяний вивід 6. Другий дротяний вивід 7 від верхнього ковпачка терморезистора виходить з корпусу через впаяний в нього скляний ізолятор 8. Для покращення теплопередачі між внутрішніми стінками корпусу терморезистора та напівпровідниковим стрижнем 1 на останній намотана алюмінієва

фольга 9, яка заповнює простір між стрижнем 1 та внутрішніми стінками корпусу. 3.

Основною характеристикою терморезистора є температурна залежність його опору. В робочому діапазоні температур вона визначається виразом

$$R_T = Ae^{\frac{B}{T}}, \quad (6)$$

де  $R_T$  – величина опору, що відповідає температурі  $T$ ;

$A$  – сталий коефіцієнт, що характеризує фізичні властивості матеріалу та геометрію терморезистора;

$B$  – стала величина, що характеризує властивості напівпровідника та визначає його теплову активність. Зі співставлення формул (3) або (4) та (6) випливає, що ця величина пропорційна ширині забороненої зони напівпровідника.

Визначивши експериментально опір терморезистора для температур  $T_1$  та  $T_2$ , можна обчислити величину  $B$ :

$$\ln \frac{R_{T_1}}{R_{T_2}} = B \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right); \quad (7)$$

$$B = \frac{T_1 T_2}{0,43(T_2 - T_1)} \lg \frac{R_{T_1}}{R_{T_2}}.$$

Стала величина  $B$  характеризує температурний коефіцієнт опору  $\alpha_T$ , який визначається виразом

$$\alpha_T = \frac{1}{R_T} \frac{dR_T}{dT}. \quad (8)$$

Використовуючи вираз (6), можна отримати

$$\alpha_T = -\frac{B}{T^2}. \quad (9)$$

Схема виміральної частини установки для дослідження характеристик терморезистора представлена на рис. 3.

За законом Ома для ділянки кола впливає, що падіння напруги залежить від величини струму та опору ділянки кола. При цьому, якщо струм підтримувати сталим, падіння напруги буде пропорційним опору ділянки кола. Та більше того, якщо задати струм стабілізації  $I_{\text{стаб}} = 1\text{мА}$ , а опір терморезистора вибрати рівним  $R$  кОм, то падіння напруги на такій ділянці:

$$U = I_{\text{стаб}}R = 10^{-3} \text{А} \cdot 10^3 \text{Ом} = \text{NB}, \quad (10)$$

т.т. вольтметр, підключений до такого терморезистора, буде вимірювати падіння напруги (в вольтах), яке чисельно дорівнює опору терморезистора (в кілоомах)

Як видно з рис. 3, вхідний опір вольтметра підключений паралельно опору  $R_T$ , тому при вимірюванні опорів таким методом повинна виконуватись умова  $R_{\text{вх}} \gg R_0$

Практично досить, що  $R_{\text{вх}} = (10 + 20)R_0$

В цій роботі використано терморезистор ММТ-4-5, 1кОм. Вхідний опір вольтметра на межі 10 В  $R_{\text{вх}} = 10^6 \text{Ом}$ .

### **Методика виконання роботи**

1. Ознайомитися з призначенням органів керування вольтметра та стабілізатора струму.

2. Зібрати схему. Ввімкнути вольтметр, для чого:

3. Увімкнути шнур вольтметра в мережу змінного струму 220 В;

4. Тумблер «ЗАПУСК» встановити в положення «РУЧНИЙ» та ввімкнути прилад. При цьому повинна спалахнути лампочка індикатора термостата;

5. Прогріти прилад. По закінченні прогріву яскравість світла лампи значно зменшиться, вона мигає або гасне. Після виконання зазначених операцій прилад готовий для вимірювання;

6. Вимірювання виконуються наступним чином: тумблер «НУЛЬ» перевести в положення «ВИКЛ.», перемикач «ВОЛЬТИ» поставити на межу вимірювання 10 В, тумблер «ЗАПУСК» залишити в положенні «РУЧНИЙ», подати вимірювану напругу на роз'єм «ВХІД». Полярність та величина вимірюваної напруги відносно корпусу приладу індукуються на шкалі.

7. **Увага!** Вмикати тумблер «НУЛЬ» при вимірюванні напруги заборонено.

8. Ввімкнути стабілізатор струму, для чого:

9. Ввімкнути шнур стабілізатора в мережу змінного струму 220 В;

10. Ручки «СТАБ», «ГРУБО», «ТОЧНО» повернути проти годинникової стрілки та ввімкнути стабілізатор. При цьому повинна спалахнути лампочка – індикатор ввімкнений;

11. Прогріти прилад 5-10 хв. Тумблер «КАЛІБРОВКА» – «РОБОТА» поставити в положення «КАЛІБРОВКА» та ручками «I<sub>стаб</sub>» досягти показу вольтметра 1,000 (допускається відхилення не більше 0,01). При цьому струм стабілізації буде дорівнювати 1 мА;

12. Тумблер «КАЛІБРОВКА» – «РОБОТА» перевести в положення «РОБОТА». Прилад готовий до роботи.

13. Виконати вимірювання опору терморезистора в інтервалі температур від кімнатної до 90°C через кожні 5°C

14. Повторити вимірювання при охолодженні терморезистора.

### **Зауваження**

1. Прогрівання вольтметра та стабілізатора струму рекомендується виконувати одночасно.

2. Як вже зазначалось, терморезистори мають теплову інерційність, тому необхідно змінювати температуру якомога повільніше.

3. Побудувати графіки залежності  $I_{grT}=f(T)$  (для нагрівання та охолодження на одному аркуші).

4. За формулою (7) обчислити сталу В для 4-5 значень температури заданих викладачем.

5. Використовуючи формулу (9) або графічно, визначити  $\alpha_T$  та побудувати графік залежності  $\alpha_T=\varphi(T)$ .

Похибку визначення сталої В визначити по середньому.

### **Контрольні питання**

1. Що являє собою терморезистор?
2. Чим відрізняються напівпровідники та діелектрики (ізолятори)?
3. Що називають шириною забороненої зони?
4. Що називають донорами та акцепторами?
5. Що називають власною та домішковою провідностями?
6. Які переваги має терморезистор в порівнянні з платиновим термометром опору?
7. За якою формулою визначається опір терморезистора?
8. Чому покази цифрового вольтметра чисельно рівні опору терморезистора?

**Література**

1. Вступ в мехатронику / О.М. Яхно, А.В. Узунов, А.Ф. Луговской, и др. – К. : НТУУ «КПІ», 2008.
2. Мещанінов С. К., Співак В. М., Орлов А. Т. Електронні методи і засоби біомедичних вимірювань. – К. : КПІ, 2016. – 211 с.
3. Шаратов В. М., Полищук Е. С., Кошевой Н. Д., Ишанин Г. Г., Минаев И. Г., Совлуков А. С Датчики. Довідник. – Техносфера. 2012. – 625 с.
4. Кучерук, І. М. Загальний курс фізики. У трьох томах : навч. посіб. Т. 3 : Оптика. Квантова фізика / І. М. Кучерук, І. Т. Горбачук. – 2-ге вид., випр. – К. : Техніка, 2006. – 518 с.

## Лабораторна робота № 5

### Визначення відстані та лінійних розмірів за допомогою лазерного далекоміра

**Мета:** ознайомлення з роботою лазерного далекоміра та експериментальне визначення відстаней до об'єктів.

#### Теоретичні відомості

Відомо, що за допомогою променя лазера відстань вимірюють шляхом прямого виміру часу переміщення лазерного імпульсу від лазера до об'єкту і назад. Цей метод називають імпульсним (або TOF) і застосовують в основному в тих випадках, коли відстані до потрібного об'єкту досить великі (>100м). Через те, що швидкість світла дуже висока, то за один імпульс лазера досить складно з великою точністю виміряти час розповсюдження світлового імпульсу, а отже провести розрахунок відстані. Для вимірювання часових інтервалів з такою точністю використовують ПЛС і спеціалізовані мікросхеми. Крім того, застосовують велику кількість імпульсів постійної протяжності і скважності, що забезпечить збільшення точності вимірювання часу і відстані у цілому. Однак, існують і інші лазерні методи заміру відстані, одним з них є фазовий. У цьому методі, на відміну від попереднього, лазер працює постійно, але його випромінювання амплітудно модулюється сигналом певної частоти. Відбите від об'єкта випромінювання приймається фотоприймачем, і його фаза порівнюється з фазою опорного сигналу – від лазера. Наявність затримки при поширенні хвилі створює зсув фаз, який і вимірюється далекоміром.

Відстань визначається за формулою:

$$L = \frac{c}{2f} \cdot \frac{\varphi}{2\pi},$$

де  $c$  – швидкість світла у даному середовищі,  $f$  – частота модуляції лазера,  $\varphi$  – фазовий зсув. Ця формула справедлива лише в тому випадку, якщо відстань до об'єкта менше половини довжини хвилі змодельованого сигналу, яка дорівнює  $c/2f$ . Якщо частота модуляції дорівнює 10 МГц, то відстань, яка вимірюється, може доходити до 15 метрів, і при зміні відстані від 0 до 15 метрів різниця фаз буде змінюватися від 0 до 360 градусів. Зміна зсуву фаз на 1 градус в такому випадку відповідає переміщенню об'єкта приблизно на 4 см.

При перевищенні цієї відстані виникає неоднозначність – неможливо визначити, скільки періодів хвилі укладається у відстані. Для

вирішення неоднозначності частоту модуляції лазера перемикають, після чого вирішують систему рівнянь.

Найпростіший випадок – використання двох частот, на низькій частоті приблизно визначають відстань до об'єкта (але максимальна відстань все одно обмежена), на високій визначають відстань з потрібною точністю, при використанні високої частоти точність вимірювання відстані буде помітно вище.

Оскільки існують відносно прості способи вимірювати фазовий зсув з високою точністю, то точність вимірювання відстані в таких далекомірах може доходити до 0,5 мм. Саме фазовий принцип використовується в далекомірах, що вимагають великої точності вимірювання – геодезичних далекомірах, скануючих далекомірах, що встановлюються на мобільних роботах та технічних засобах автоматизації різного призначення.

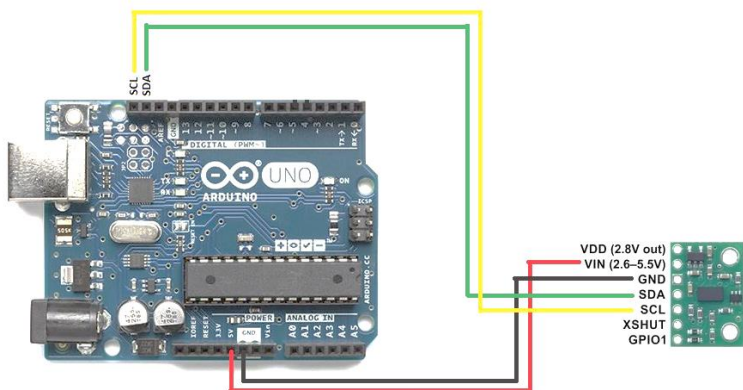


Рисунок 23 – Схема підключення далекоміру до платформи Arduino

Однак, у методу є і недоліки – потужність випромінювання лазера, який працює у постійному режимі помітно менше, ніж у імпульсного лазера, що не дозволяє використовувати фазові далекоміри для вимірювання великих відстаней. Крім того, вимірювання фази з потрібною точністю може займати певний час, що обмежує швидкодію приладу.

Таким чином, для виконання лабораторної роботи було обрано фазовий лазерний далекомір на базі модуля CJMCU-5303. Схему підключення обраного модуля до платформи Arduino зображено на рис. 23.



Характеристики:

- Напруга живлення: 3,3-5 В;
- Вимірюється відстань до 2 м;
- Значення показань датчика не залежать від властивостей поверхні;
- Струм: до 300 мкА;
- Вихідний інтерфейс: І<sup>2</sup>С (адреса: 0 × 29);
- 3 режими роботи (швидкодія, точність, дальність)

### Опис експериментальної установки

Експериментальна установка дослідження характеристик далекоміра складається з корпусної конструкції що утворена з стійки 1 напрямляючих 2, які забезпечують переміщення рухомої стійки 3. Стійкість конструкції забезпечується завдяки фіксації напрямляючих у стійці 1 та 4. Далекомір 5 фіксується у стійці 4, таким чином щоб табло 6 легко спостерігалось. Кнопка запуску 6 запускає роботу далекоміра 5. Результат виміру відстані показується на табло 7. Відстань до об'єкту стійки 3 виставляється за лінійкою 9. Направляючі кріпляться у стійках за допомогою гвинтів 8 та 10.

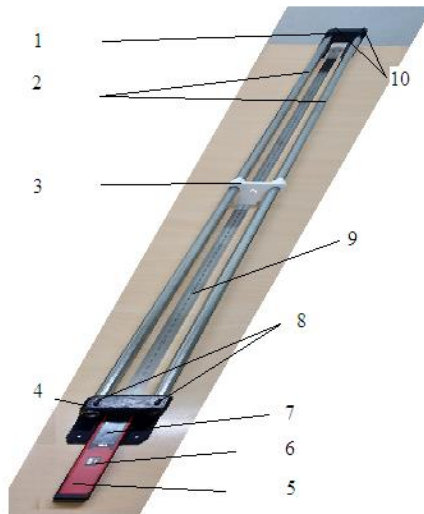


Рисунок 24 – Експериментальна установка дослідження характеристик далекоміра

### **Порядок виконання робіт**

1. Зафіксувати положення далекоміра.
2. Встановити стійку 3 на відстані, що задано викладачем. Відстань вимірювати вимірювальною скобою або штангенциркулем або лінійкою. Визначити похибку та занести значення величини відстані і значення величини похибки до робочого аркушу.
3. Провести вимірювання відстані до (стійки 3), що встановлено відповідно до завдання викладача за допомогою далекоміра. Для цього необхідно натиснути кнопку 6 на позначці ON/OFF, яку необхідно утримувати аж до появи зображень на табло 7. Включений далекомір готовий до вимірювань відстані.
4. Результат вимірювання відстані до стінки 3, що замірено далекоміром буде відображено на табло 7.
5. Результати вимірів за лінійкою (або штангенциркулем) та далекоміром занести до таблиці робочого аркушу.
6. Вимірювання повторити 6-10 разів для кожної з відстаней, що задано викладачем.
7. Встановити стійку 3 на наступній відстані, що задано викладачем та повторити дії пунктів 4, 5, 6.
8. Витягнути далекомір із кріплення та виміряти розміри приміщення лабораторії, встановити похибку та записати результати.
9. Нанести точки середніх значень результатів вимірювання на графік, відобразити поле похибок та провести криву.
10. Визначити систематичну похибку.
11. Сформулювати рекомендації для застосування далекоміра
12. Визначити лінійні розміри та об'єм приміщення.
13. Похибки визначати методом середнього.

### **Питання для контролю та самоконтролю**

1. Що називається фазою коливання?
2. Як визначити різницю фаз двох променів?
3. Від яких параметрів залежить різниця фаз двох променів?
4. Який принцип покладено у основу вимірювання відстані далекоміру?
5. Чому дорівнює зсув фаз для двох променів ?
6. Які методи дозволяють уникати неоднозначності коли зсув фаз більше за два  $\pi$ ?
7. У чому полягає метод двох частот?
8. Який принцип використовується в далекомірах, що вимагають великої точності вимірювання – геодезичних далекомірах, сканую-

чих далекомірах, що встановлюються на мобільних роботах та технічних засобах автоматизації різного призначення.

9. Які складові містить похибка вимірювання лінійних розмірів приміщень оптичним далекоміром?

10. Яка величина обмежує швидкодію приладу.

### **Література**

1. Trounov, A. N. Application of Sensory Modules for Adaptive Robots : Proc. Robotics Technology, London, UK, 9-11 October 1984,. IFS (Publications) Ltd/ Bedford, 85-0641. Vol. 4. P. 320

2. Лазерний датчик відстані GY-530 на VL53L0X. код: ADC225. URL : <https://arduino.ua/prod2144-lazernii-datchik-rasstoyaniya-gy-530-na-vl53l0x>

## Лабораторна робота №6

### Дослідження характеристики датчика Холла

**Мета:** вивчити принцип дії датчика Холла та дослідити параметри його характеристики поріг чутливості, лінійність та встановити робочий діапазон.

#### Теоретичні відомості

Ефект Холла\* полягає в у тому, що в провіднику, який знаходиться у магнітному полі і по якому тече струм, додатково створюється електричне поле в напрямку, перпендикулярному до площини векторів густини струму та індукції магнітного поля. Причиною виникнення цього ефекту є сила Лоренца, що діє на носії зарядів електрони і дірки (для напівпровідника), внаслідок чого вони відхиляються від траєкторії свого руху та концентруються на бічних гранях. Процес розшарування протікає до встановлення рівноваги між силами Лоренца та додатково створеного у наслідок розшарування зарядів електростатичного поля. Напрямок векторів швидкостей електронів  $\vec{u}^-$  та дірок  $\vec{u}^+$  у струмі протилежний, а значить напрямок сили Лоренца, яка діє і на електрони і на дірки, що визначається правилом лівої руки та знаком заряду буде однаковим. Таким чином, до однієї з граней відхиляються носії зарядів і відбувається перерозподіл зарядів і як наслідок утворюється додаткове поперечне електричне поле напруженістю  $E_x$ , яке перешкоджає подальшому перерозподілу зарядів.

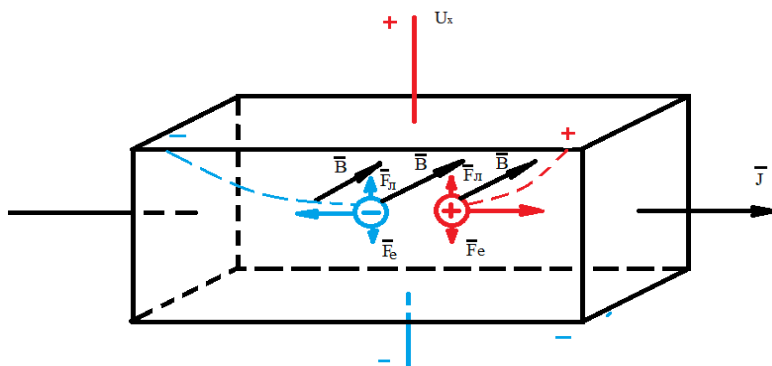


Рисунок 25 – Динамічна рівновага настає за умови рівності сили Лоренца  $F_l = q \times u \times B$  та сили дії на частинку з боку електричного поля  $F_e = q \times E_x$

( $q$  – заряд носіїв струму,  $u$  – їхня дрейфова швидкість). Враховуючи, що густина струму  $j = q \times u \times n$  і

\* **Ефект Холла** був відкритий у 1879 році американським фізиком Е. Холлом (1855–1938).

Вважаючи холлівське поле  $E_x$  однорідним, тобто холлівська напруга  $U_x = E_x \times b$ , одержуємо

$$U_x = \frac{jBb}{qn} \quad (11)$$

Таким чином, знак холлівської напруги залежить від знаку основних носіїв заряду, а її величина обернено пропорційна їхній концентрації  $n$ . Тому в напівпровідниках холлівська напруга на декілька порядків більша, ніж у металах і досягає десятків мілівольт.

**Застосування ефекту Холла:**

а) Цей ефект покладений в основу роботи магнетометрів – приладів для вимірювання індукції магнітного поля. Формула (11) показує, що  $U_x \sim B$ , тобто шкалу мілівольметра можна проградувати в одиницях індукції (Тл).

б) Вимірювання концентрації носіїв заряду та їх рухливості  $u$ . Густина струму  $j = I/(bd)$ . З врахуванням цього із (11) одержуємо

$$n = \frac{jBb}{qU_x} = \frac{iBb}{qdU_x} \quad (12)$$

Знаючи товщину  $d$  датчика Холла, струм  $I$  і індукцію магнітного поля  $B$ , можна розрахувати концентрацію  $n$ , вимірюючи холлівську напругу  $U_x$ . Для вимірювання рухливості необхідно додатково вимірювати опір  $R$  зразка – датчика Холла та його геометричні розміри: довжину  $a$  і ширину  $b$ . Для прямокутного зразка, зображеного на рисунку

$$R = \frac{a}{\sigma db}$$

де питома електропровідність

$$\sigma = qnu$$

Одержуємо

$$u = \frac{a}{qndbR} \quad (13)$$

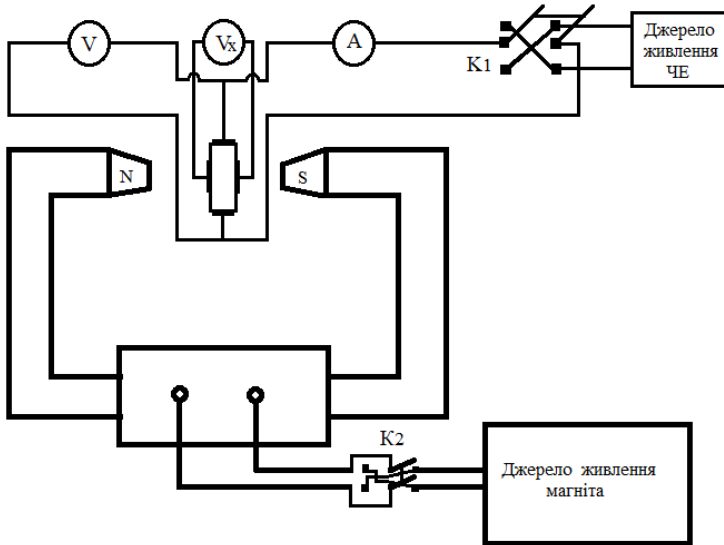


Рисунок 26 – Принципова схема питомого опору та е. р. с. Холла

### Опис експериментальної установки для дослідження характеристики датчика Холла

Експериментальна установка складається із стабілізованого джерела живлення, яке має регульоване значення величини вихідної напруги. До складу установки входять вольтметр та амперметр, що здатні вимірювати та представити у цифровому вигляді величину спаду напруги та сили струму. Крім того, до устаткування входить котушка із засобом механічного кріплення датчика Холла. Схема устаткування показана на рис. 26.

### Порядок виконання роботи

1. Не під'єднуючи джерела живлення, з'єднати провідники та зібрати схему відповідно до рис. 26.

2. При від'єднаному джерелі живлення виставити робочу напругу на виході джерела (задається викладачем).

3. Виключити джерело та з'єднати дроти з установкою відповідно до схеми

4. За дозволом викладача із заданим кроком по величині напруги зняти напругу силу струму в котушці та покази датчика Холла. Заміри провести для трьох значень кількості витків у котушці при зростанні сили струму та спади.

5. За експериментальними даними побудувати графік характеристики датчика Холла та відобразити поле похибок.

6. Знайти поріг чутливості, чутливість, середньо квадратичну похибку, граничну межу, відобразити паспортні дані датчика.

### **Питання для контролю та самоконтролю:**

1. Сила Лоренца, чому дорівнює коли виникає?
2. Правило лівої руки для визначення напрямку сили Лоренца.
3. Як обчислити силу, що діє на заряд у електростатичному полі.
4. Від чого залежить концентрація вільних носіїв заряду у речовині?
5. Від чого залежить рухливість носіїв заряду та як на неї впливає температура тіла?
6. Від яких факторів залежить поріг чутливості датчика Холла?
7. Чи існує верхня межа у датчиків Холла та чим вона визначається?
8. Як впливає температура датчика на метрологічні характеристики?
9. Як знайти поріг чутливості, чутливість, середньо квадратичну похибку, граничну межу, відобразити паспортні дані датчика?
10. Як знайти похибку вимірювання цифровим приладом?

### **Література**

1. Мещанінов С. К., Співак В. М., Орлов А. Т. Електронні методи і засоби біомедичних вимірювань. – Київ : КПІ, 2016. – 211 с.
2. Шарапов В. М., Полищук Е. С., Кошевой Н. Д., Ишанин Г. Г., Минаев И. Г., Совлуков А. С. Датчики. Довідник. – Техносфера. 2012. – 625 с.

*Навчальне видання*

**Олександр Миколайович  
ТРУНОВ**

# **ДАТЧИКИ ТА СЕНСОРИ РОБОТОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ**

**Навчальний посібник  
для підготовки бакалаврів за спеціальністю  
174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології  
та робототехніка»**

---

Редактор *О. Михайлова*  
Комп'ютерна верстка, дизайн обкладинки *К. Гросу-Грабарчук*  
Друк *С. Волинець*. Фальцювально-палітурні роботи *О. Мішалкіна*.

Підп. до друку 07.11.2023.  
Формат 60x84<sup>1/16</sup>. Папір офсет.  
Гарнітура «Times New Roman». Друк ризограф.  
Ум. друк. арк. 3,2. Обл.-вид. арк. 1,8.  
Тираж 100 пр. Зам. № 6625.

Видавець і виготовлювач: ЧНУ ім. Петра Могили.  
54003, м. Миколаїв, вул. 68 Десантників, 10.  
Тел.: 8 (0512) 50–03–32, 8 (0512) 76–55–81,  
e-mail: rector@chmnu.edu.ua.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6124 від 05.04.2018.