




ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

МЕТРОЛОГІЯ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ ВИМІРЮВАННЯ

методичні вказівки до виконання
лабораторних робіт

Запоріжжя 2024



УДК 006.91(072)
М54

Рекомендовано Науково-методичною радою
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
(протокол № 1 від 27.09.2024 р.)

Укладач

Мірошніченко В.І., канд. техн. наук, доцент,
Вовна О.В., докт. техн. наук, професор

М54 Метрологія та технологічні вимірювання: методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт / уклад. О. В. Вовна, В. І. Мірошніченко. Запоріжжя: ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», 2024. 37 с.

У методичних рекомендаціях наведено тематику лабораторних робіт, методичні пояснення щодо порядку та приклади їх виконання, критерії оцінювання, вимоги до оформлення звітів, питання для самоперевірки тощо.

УДК 006.91(072)

© ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МЕТИНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», 2024

ЗМІСТ

Вступ	4
1 Лабораторна робота №1. «Дослідження статичних та динамічних характеристик термометрів опору та термоелектричних перетворювачів»	5
1.1 Завдання 1	5
1.1.1 Теоретичні відомості	5
1.1.2 Хід роботи	7
1.2 Завдання 2	9
1.2.1 Теоретичні відомості	10
1.2.2 Хід роботи	12
1.3 Критерії оцінювання та вимоги до оформлення звіту	15
1.4 Питання для самоперевірки	16
1.5 Перелік рекомендованих джерел	16
2 Лабораторна робота №2. «Дослідження характеристик лінійних змінних диференціальних трансформаторних перетворювачів»	17
2.1 Завдання	17
2.2 Теоретичні відомості	17
2.3 Хід роботи	20
2.3 Критерії оцінювання та вимоги до оформлення звітів	22
2.4 Питання для самоперевірки	22
2.5 Перелік рекомендованих джерел	23
3 Лабораторна робота №3. «Вимірювання рівня в резервуарі за допомогою датчика рівня ємнісного типу»	24
3.1 Завдання	24
3.2 Теоретичні відомості	24
3.3 Хід роботи	28
3.4 Критерії оцінювання та вимоги до оформлення звітів	29
3.5 Питання для самоперевірки	30
3.6 Перелік рекомендованих джерел	30
4 Лабораторна робота №4. «Визначення метрологічних характеристик датчику тиску»	31
4.1 Завдання	31
4.2 Теоретичні відомості	31
4.3 Опис лабораторної установки	32
4.4 Хід роботи	34
4.5 Критерії оцінювання та вимоги до оформлення звітів	35
4.6 Питання для самоперевірки	36
4.7 Перелік рекомендованих джерел	36



ВСТУП

Метою виконання лабораторних робіт з дисципліни «Метрологія та технологічні вимірювання» є закріплення здобувачами знань щодо методів та засобів вимірювання основних технологічних параметрів, перевірки їхніх метрологічних характеристик. В результаті виконання лабораторних робіт передбачається набуття здобувачами навичок: дослідження статичних та динамічних характеристик термометрів опору та термоелектричних перетворювачів, а також перевірки метрологічних характеристик датчиків температури; дослідження впливу параметрів лінійних змінних диференціальних трансформаторних перетворювачів на їхній вихідний сигнал; дослідження впливу параметрів ємнісного датчика рівня на його вихідний сигнал; перевірки метрологічних характеристик датчику тиску.

Лабораторні роботи здобувачами виконуються віртуально, за допомогою обчислювальної техніки, використовуючи платформу віртуальної лабораторії <https://sl-coer.vlabs.ac.in/>. Результатом виконання лабораторної роботи є оформлений за вимогами та зданий звіт. Максимальна кількість балів, яку здобувач може отримати за виконання кожної лабораторної роботи, – 10.

1 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1. «ДОСЛІДЖЕННЯ СТАТИЧНИХ ТА ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОМЕТРІВ ОПОРУ ТА ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ»

1.1 Завдання 1

З використанням покрокової інструкції за посиланням <https://sl-coep.vlabs.ac.in/exp/characterize-temperature-sensor/procedure.html> провести дослідження статичних та динамічних характеристик термометрів опору. Навести скріншоти результатів. Дати відповіді на питання тестування за посиланням <https://sl-coep.vlabs.ac.in/exp/characterize-temperature-sensor/posttest.html>. Навести скріншоти результатів.

1.1.1 Теоретичні відомості

ТО виготовляють з металів, опір яких зростає з температурою. В обмеженому діапазоні температур його опір лінійно зростає з температурою:

$$R_t = R_0[1 + \alpha (t - t_0)] \quad (1.1)$$

де R_t – опір при температурі t

R_0 = опір при $0\text{ }^\circ\text{C}$

α = температурний коефіцієнт опору ($^\circ\text{C}^{-1}$)

Встановивши t_0 на 0°C і перевівши в стандартну лінійну форму $y = m \cdot x + b$, стає зрозумілим, що опір залежності від температури є лінійним з нахилом, що дорівнює

$$R / R_0 = \alpha * t + 1 \quad (1.2)$$

Теоретично для вимірювання температури можна використовувати будь-який метал. Обраний метал повинен мати високу температуру плавлення і здатність протистояти впливу корозії. Тому для більшості застосувань вибирають платину, характеристиками якої є хімічна стабільність, доступність у чистому вигляді та електричні властивості, які є високо відтворюваними.

Розв'язок рівняння (1) для α :

$$\alpha = (R_{100} - R_0) / (R_0 * (t - t_0)) \quad (1.3)$$

де $t = 100\text{ }^\circ\text{C}$ і $t_0 = 0\text{ }^\circ\text{C}$

$\alpha = 0,00385\ \Omega/\Omega^\circ\text{C}$ (для платини)

Залежність між опором і температурою ТОП (Pt) можна апроксимувати рівнянням Каллендара-Ван Дусена:

$$R_t / R_0 = 1 + \alpha [t - \delta((t/100) - 1)(t/100) - \beta((t/100) - 1)(t/100)^3] \quad (1.4)$$

де t – температура ($^{\circ}\text{C}$)

R_t – Опір при температурі, $t^{\circ}\text{C}$

R_0 – Опір при 0°C

$\alpha = 0,00385 \text{ Ом}/(\text{Ом}\cdot^{\circ}\text{C})$;

δ, β - коефіцієнти лінеаризації, де $\beta = 0$ для $t > 0^{\circ}\text{C}$

Рівняння Каллендара Ван Дусена використовується в стандарті ІЕС 751, який є найпопулярнішим стандартом, що використовується для ТОП. Рівняння для ТОП, наведене в ІЕС 751, має вигляд:

$$R_t = R_0 [1 + At + Bt^2 + C(t - 100)t^3] \quad (1.5)$$

де A, B, C — постійні, а $C = 0$ для $t > 0^{\circ}\text{C}$.

Значення A, B і C для $\alpha = 0,00385$:

$$A = 3,9083 \cdot 10^{-3} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$$

$$B = -5,77510^{-7} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-2}$$

$$C = -4,183 \cdot 10^{-12} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-4}$$

Платинові ТО (Pt) визначаються такими стандартами, як DIN 43760 (BS1904), ІЕС 751-1983 і JIS C1604 [1, 3].

Динамічною характеристикою, яка повинна бути проаналізована, є крива розгону платинового термометру опору до температури попереднього експерименту.

Обчислення для констант часу виконуються за допомогою рівняння

$$\tau = (x/k) * \rho * L * s \quad (1.6)$$

де, x - товщина (м)


k - теплопровідність матеріалу ($\text{Вт}/\text{м}\cdot\text{к}$)

ρ - щільність матеріалу ($\text{кг}/\text{м}^3$)

s - питома теплоємність матеріалу($\text{Дж}/\text{Кг}\cdot^{\circ}\text{C}$)

L - довжина елемента (м)

Для неізолюваного елемента матеріалом вважається платина з товщиною 2 мм, довжиною 15 мм



Для постійної часу для оболонки загальна постійна часу становить

$$\tau_{sheath} = \tau_{bareelement} + \tau_{air} + \tau_{sheath} \quad (1.7)$$

Для повітря товщина 0,2 мм, довжина: 15 мм.

Для оболонки враховуйте обрану товщину та довжину: 15 мм.

Для постійної часу для термогільзи загальна постійна часу становить

$$\tau_{thermowell} = \tau_{sheath} + \tau_{filling\ material} + \tau_{thermowell} \quad (1.8)$$

Для наповнювача товщина 2,5 мм; і довжина: 15 мм. Для термогільзи враховуйте обрану товщину та довжину 15 мм [1].

1.1.2 Хід роботи

Дослідження статичних характеристик термометрів опору.

Порядок дій:

1. На вкладці Моделювання (рис. 1.1) виберіть матеріал RTD (Material), відповідний температурний коефіцієнт опору (α) та діапазон вимірювання будуть відображатися на екрані.

2. Натисніть на 'R0', щоб отримати значення R0 для вибраного RTD.

3. Натисніть «Отримати температуру» (Get temperature). На дисплеї відобразиться температура, для якої потрібно знайти Rt.

4. Використовуючи формулу (1.1), обчисліть значення Rt і введіть відповідь у відповідне поле (до 2-х десяткових знаків з округленням). Надішліть відповідь за допомогою кнопки відправити.

5. Якщо результат розрахунку вірний, переходьте до кроку 3. Повторіть процедуру мінімум 3 рази.

6. Якщо результат розрахунку неправильний, вам буде запропоновано повторити те саме. Будь ласка, зверніться до вкладки «Отримати формулу» та перевірте свої розрахунки.

7. Виконавши мінімум 3 набори правильних показань, ви можете побачити графік, натиснувши на «Графік» (Plot).

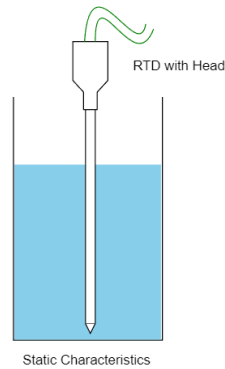
8. Коли відобразиться графік, зробіть знімок екрану, збережіть графік для звіту, натисніть вкладку «Далі» (Reload), щоб повторити процедуру з різним значенням опору (R0) і з різними матеріалами.

9. Для побудови графіка необхідно мінімум 3 розрахунки.

10. Проаналізуйте графіки продуктивності RTD з різними еталонними значеннями опору і різними матеріалами. Наведіть скріншоти усіх досліджених графіків у звіті, зробіть висновки.



Level-1 Static Characteristics



Control Panel

Material :

α value: 0.00385
Temperature range : -200 to 850

R₀:

Get temperature ==> 353°C

Enter Output R_t Value :

Next Set Value Plot Submit

Reload Level-2

Рисунок 1.1 – Віртуальне лабораторне обладнання для дослідження статичних характеристик RTD

Дослідження динамічних характеристик платинового термометру опору

Покроковий порядок дій:

1. Виберіть RTD як неізолюваний елемент (Bare) (відмітка галочкою) (рис. 1.2). Зі стандартними розмірами, що розглядаються для неізолюваного елемента. Значення постійної часу буде відображатися у спливаючому вікні виводу, перевірте правильність за допомогою рівняння (1.6) та таблиці 1.1.

2. Тепер вибираємо динамічну продуктивність RTD з оболонкою. Виберіть відповідний матеріал і значення товщини. Значення постійної часу буде відображено в полі виводу. Переконайтеся в його правильності за допомогою рівняння (1.7) та відомостей, наведених в таблиці 1.1.

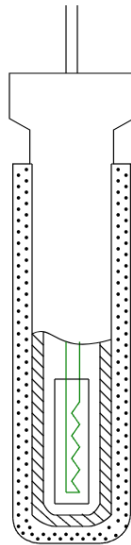
Таблиця 1.1 – Властивості матеріалів

Material	$\rho(\text{kg/m}^3)$	$s(\text{J/Kg} \cdot ^\circ\text{C})$	$K(\text{W/m}\cdot\text{k})$
Platinum	21450	130	71.6
SS304	8030	500	21.4
SS316	7990	500	21.4
SS410	7750	460	24.9
Air	1.20	1005	0.025
MgO Powder	3580	877	26.8
Silicon compound	3210	800	3

3. Спостерігайте за зміною постійних значень часу для різних матеріалів з різною товщиною.



Level-2 Dynamic Characteristics



Level-1

Bare:

Material:

Withsheath:

Material:

Thickness:

Thermowell:

Material:

Thickness:

Filling Material:

Output:

Рисунок 1.2 – Віртуальне лабораторне обладнання для дослідження динамічних характеристик RTD

4. Тепер виберіть динамічну продуктивність RTD з термогільзою. Виберіть відповідний матеріал, товщину та матеріал для наповнення. Значення постійної часу буде відображатися у вихідному полі при виборі матеріалу, товщини та наповнювача thermowell. Переконайтеся в цьому за допомогою рівняння (1.8) та відомостей, наведених в таблиці 1.1.

5. Спостерігайте за зміною постійних значень часу для різних матеріалів з різною товщиною. Також зауважте ефект від зміни матеріалу наповнювача термогільзи.

6. Натисніть на кнопку графіка, щоб спостерігати за динамічним відгуком (залежністю температури від часу).

7. Спостерігайте та перевіряйте час реакції RTD, який зазвичай у 5 разів перевищує значення постійної часу. Наведіть скріншоти усіх досліджених графіків у звіті, зробіть висновки.

Після завершення обох частин слід перейти до посттесту, щоб з'ясувати, чи зрозуміли ви всі аспекти експерименту [1].

1.2 Завдання 2

З використанням покрокової інструкції за посиланням <https://sl-coep.vlabs.ac.in/exp/temperature-sensor/procedure.html> провести дослідження статичних та динамічних характеристик термоелектричних перетворювачів. Навести скріншоти результатів. Дати відповіді на питання тестування за посиланням <https://sl-coep.vlabs.ac.in/exp/temperature-sensor/posttest.html> . Навести скріншоти результатів [2].



1.2.1 Теоретичні відомості


Термоелектричний ефект — це пряме перетворення різниці температур в електричну напругу і навпаки. Термоелектричний перетворювач створює напругу при різниці температур з обох сторін. І навпаки, коли до нього прикладається напруга, це створює різницю температур. Існує три основні ефекти, які пояснюють принцип роботи термоелектричного перетворювача.

Ефект Зеебека: коли два дроти, що складаються з різнорідних металів, з'єднуються на обох кінцях і один з кінців нагрівається, у термоелектричному колі протікає постійний струм.

Ефект Пельтьє: місця з'єднання різнорідних металів нагріваються або охолоджуються залежно від напрямку, в якому через них проходить електричний струм. Тепло, що виділяється струмом в одному напрямку, або поглинається, якщо напрямок струму протилежний. Ефект завжди включає пари з'єднань. По суті, струм передає тепло від однієї сторони перетворювача до іншої.

Ефект Томпсона: описує існування градієнта температури під час нагрівання або охолодження провідного матеріалу. Будь-який струмопровідний провідник (крім надпровідника) з різницею температур між двома точками поглинатиме або випромінюватиме тепло залежно від матеріалу.

Термопара — це з'єднання двох дротів з різнорідних металів, в якому виникає напруга, пов'язана з різницею температур місць з'єднань. Коли один з кінців нагрівається, у термоелектричному колі протікає постійний струм (термоелектричний ефект або ефект Зеебека). Цей струм залежить від різниці температур на двох кінцях провідного дроту. Тобто термопари завжди вимірюють різницю температур, а не абсолютну температуру. Щоб виміряти температуру одного спаю, інший спай підтримується при певній еталонній температурі. Лабораторне калібрування передбачає використання крижаної ванни для забезпечення температури холодного спаю $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. При технічних вимірюваннях застосовують термістори або діоди, що входять до складу ізотермічного блоку. Особлива увага приділяється мінімізації будь-якого градієнта температури між спаями. Отже, напруга від відомого холодного спаю може бути змодельована та застосована відповідна корекція. Це відоме як компенсація холодного спаю. Програмна компенсація є найбільш універсальною технікою, яка використовується для вимірювання термопар. До одного блоку можна підключати багато термопар. Техніка не залежить від типів термопар. Усі перетворення виконує комп'ютер. Недоліком є те, що комп'ютеру потрібен додатковий час для розрахунку еталонної температури спаю. Для максимальної швидкості ми можемо використовувати апаратну компенсацію. Апаратну компенсацію можна розглядати як під'єднання в коло батареї, що компенсує зміщення напруги, спричинене холодним



спаєм. Ці комерційно доступні схеми забезпечують електронний контроль точки льоду. Їхньою основною перевагою є швидкість, а недоліком є те, що вони підходять для компенсації лише певного типу термопар.

Властивості термопар (критерії вибору матеріалів для термопар):

- Діапазон температур
- Температура плавлення
- Реакція на різні атмосферні умови
- Електропровідність
- Стабільність
- Взаємозамінність
- Повторюваність
- Точність
- Роздільна здатність
- Вартість
- Доступність
- Хімічні властивості
- Стійкість до стирання та вібрації
- Вимоги до встановлення
- Магнітні властивості
- Простота обробки та виготовлення

Що слід пам'ятати: вибір розміру дроту, який використовується в датчику термопар, залежить від застосування. Як правило, коли для вищих температур потрібен довший термін служби, слід вибирати дроти більшого розміру. Якщо чутливість є основною проблемою, слід використовувати менші розміри.

Довжина зонда термопар: оскільки необхідно мінімізувати вплив теплопровідності від гарячого кінця термопар, зонд термопар повинен мати достатню довжину. Якщо немає достатнього занурення, показники будуть низькими.

Рекомендується занурювати термопару на мінімальну відстань, еквівалентну чотирикратному зовнішньому діаметру захисної труби або гільзи.

Розташування термопар: Термопари завжди повинні бути в такому положенні, щоб мати певне співвідношення температури з робочим навантаженням. Зазвичай термопара повинна розташовуватися між робочим навантаженням і джерелом тепла і розташовуватися приблизно на 1/3 відстані від робочого навантаження до джерела тепла.

Типи термопар на основі комбінації металів. Різні типи найкраще підходять для різних застосувань. Зазвичай їх вибирають на основі діапазону температур і необхідної чутливості. Термопары з низькою чутливістю (типи В, R і S) мають відповідно нижчу роздільну здатність. Властивості термопар наведені у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Властивості термопар

Type of Thermocouple	Material	K (W/m·k)	ρ (kg/m ³)	s (J/Kg·°C)
J	Iron- Constantan	46	8535	345
K	Kromel- Alumel	35	8738	380
T	Copper- Constantan	160	8902	316
E	Cromel - Constantan	33	8825	336
N	Nicrocil- Nisil	34	8702	376
B	Pt(30%)Rhodium - Pt(6%)Rhodium	19	15718	56
R	Platinum(13%)Rhodium - Platinum	55	16628	99
S	Platinum(10%)Rhodium - Platinum	52.9	16745	99

Необхідність термогільзи: Термогільзи використовуються в промислових вимірюваннях температури для забезпечення ізоляції між датчиком температури (часто термопарою) і середовищем, температуру якого потрібно виміряти. Вони є інтрузивними фітінгами і піддаються статичним і динамічним силам рідини. Основною проблемою є вихрові явища, які здатні призвести до резонансу, викликаного потоком, і, як наслідок, руйнування термогільзи. Це особливо важливо при високих швидкостях рідини. Термогільзи використовуються для полегшення ремонту датчиків температури без переривання процесу, що контролюється. Термогільзи доступні в трьох основних типах конструкції barrel або хвостовика. Barrel або хвостовик — це пристрій типу контейнера, який вставляється в технологічний потік. Оскільки термогільзи вставляються безпосередньо в технологічний потік, мета полягає в тому, щоб дозволити вимірювання, спричиняючи якомога менше обмеження потоку. При виборі між наявними типами термогільз враховуються такі моменти: довжина штока (довжина від отвору до кінця свердловини) і діаметр отвору термогільзи; температура та в'язкість середовища, в яке буде вставлено термогільзу; відставання розширення, через які повинен буде проходити датчик [2, 3].

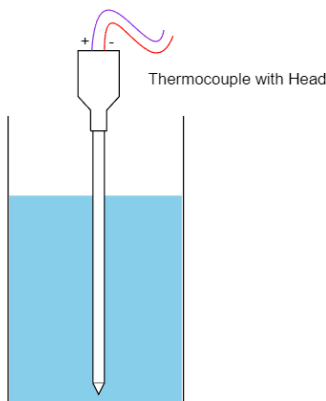
1.2.2 Хід роботи

Дослідження статичних характеристик термопари (зміни ЕРС термопари в залежності від температури процесу).

Покроковий порядок дій:

1. Виберіть тип термопари для експерименту (рис. 1.3).

Level-1 Static Characteristics



Thermocouple Reference Table

Control Panel

Thermocouple Type: --Select--
Reference Temp: --Select--

Get temperature ==>

Enter Input value mV: Enter your Output

Level 2 Submit

Plot Next Set Reload

Selected Values:

Thermocouple Reference Table link

[Type B Thermocouple](#)
[Type E Thermocouple](#)
[Type J Thermocouple](#)
[Type K Thermocouple](#)
[Type N Thermocouple](#)
[Type R Thermocouple](#)
[Type S Thermocouple](#)
[Type T Thermocouple](#)

NOTE

1. For simulation purpose get temperature is limited to 400 °C

2. As the thermocouple 8th order equations are converted to lower order, the simulation results may differ from reference table values

Рисунок 1.3 – Віртуальне лабораторне обладнання для дослідження статичних характеристик термопар

2. Виберіть «Температура холодного спаю» (Reference temperature), щоб встановити температуру еталонного спаю зі спадного меню.

3. Клацніть зелену кнопку «Отримати температуру» (Get temperature). Буде відображено температуру, для якої потрібно знайти вихід (мВ).

4. Клацніть посилання «Довідкова таблиця термопар» (Thermocouple Reference Table) під ескізом, щоб переглянути стандартні таблиці термопар. По відповідній таблиці знайдіть вихідне значення в мілівольтах, що відповідає температурам холодного спаю та заданих.

5. Обчисліть показання термопар з урахуванням поправки на температуру холодного спаю. Введіть його у відповідне поле та надішліть (Submit). Якщо відповідь правильна, вона буде вказана в полі під відповіддю. Якщо ні, перевірте його та введіть правильне вихідне значення. Якщо неправильна відповідь надсилається повторно протягом 3 разів, правильна відповідь наводиться у спливаючому вікні.

6. Перейдіть до кроку 3. Повторіть процедуру принаймні 3 рази.

7. Після завершення необхідного набору точок вкладки «Графік» (Plot), «Наступний набір» (Next set) і «Рівень 2» (Level 2) увімкнені. Перегляньте графік, клацнувши вкладку «Графік».

8. Клацнувши вкладку «Далі встановити» (Reload), повторіть процедуру для різних типів термопар при різних значеннях температури холодного спаю.

9. Натисніть «Графік», щоб переглянути графіки для порівняльного дослідження.

10. Дослідить графіки статичних характеристик різних термопар з різними значеннями температури холодних спаїв. Наведіть скріншоти усіх досліджених графіків у звіті, зробіть висновки.

Для переходу до досліджень динамічних характеристик термопар слід натиснути «Рівень 2».

Покроковий порядок дій:

1. Тип термопар, вибраний як неізолюваний елемент (рис. 1.4), є тим самим, що було обрано на «Рівні 1». Зі стандартними розмірами, які розглядаються для неізолюваного елемента, значення постійної часу буде відображатися у спливаючому вікні виводу, перевірте правильність за допомогою рівняння (1.6) та таблиці 1.2.

2. Тепер виберіть динамічні характеристики термопар з оболонкою. Виберіть відповідний матеріал і значення товщини. Значення постійної часу буде відображено у полі виводу, перевірте правильність за допомогою рівняння (1.7) та таблиць 1.1, 1.2.

3. Спостерігайте за зміною значень постійної часу для різних матеріалів різної товщини.

4. Тепер виберіть динамічні характеристики термопар з термогільзою. Виберіть відповідний матеріал, товщину та матеріал наповнення. Значення постійної часу буде відображено у вікні виводу, коли вибрано матеріал термогільзи, товщину та матеріал наповнення. Перевірте правильність за допомогою рівняння (1.8) та таблиць 1.1, 1.2.

5.

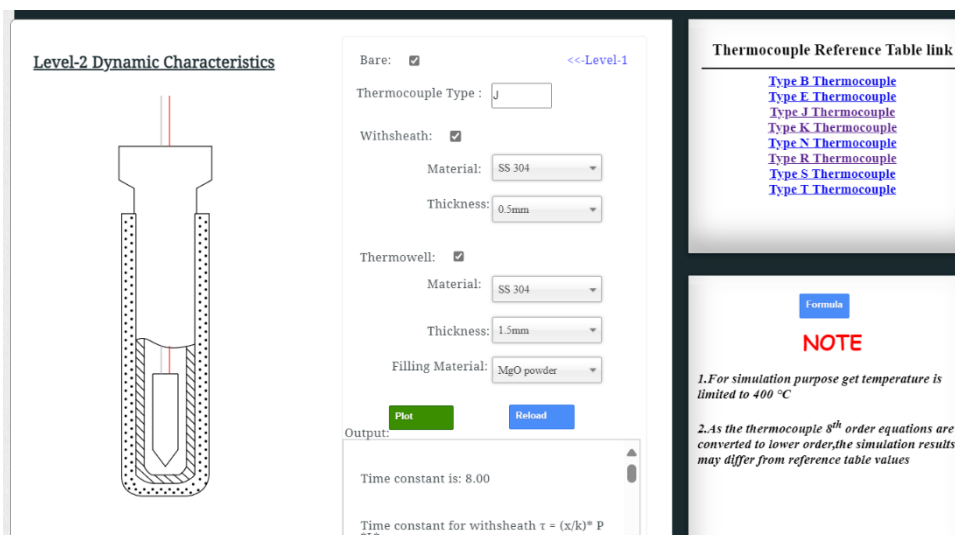


Рисунок 1.4 – Віртуальне лабораторне обладнання для дослідження динамічних характеристик термопар

6. Спостерігайте за зміною значень постійної часу для різних матеріалів різної товщини. Також зауважте вплив зміни пломбувального матеріалу.

7. Клацніть на кнопці «Графік», щоб спостерігати динамічний відгук (температура від часу). Наведіть скріншоти усіх досліджених графіків у звіті.

8. Спостерігайте та перевіряйте час відгуку термопари, який зазвичай у 5 разів перевищує значення постійної часу. Після завершення обох частин слід перейти до посттесту, щоб дізнатися, чи зрозуміли ви всі аспекти експерименту [2].

1.3 Критерії оцінювання та вимоги до оформлення звіту

Робота здобувачами виконується на практичних (лабораторних) заняттях з використанням комп'ютера.

Звіт має бути оформлений відповідно до вимог щодо оформлення технічної документації на аркушах формату А4 . До складу звіту повинні входити:

1. Титульна сторінка.
2. Назва та мета практичної роботи.
3. Постановка завдань.
4. Результати досліджень (графіки) та їхнього аналізу.
5. Загальні висновки.

Таблиця 1.3 – Критерії оцінювання

Кількість балів	Критерій оцінювання
10	Здобувач(ка) працював(ла) на лабораторних заняттях, приймав(ла) активну участь у виконанні лабораторної роботи, виконав(ла) завдання у повному обсязі та завантажив(ла) звітні матеріали відповідно до методичних рекомендацій в Moodle згідно з семестровим графіком (до наступного заняття)
9-8	Здобувач(ка) працював(ла) на лабораторних заняттях, частково виконав(ла) завдання та завантажив(ла) звітні матеріали відповідно до методичних рекомендацій в Moodle пізніше терміну вказаного у семестровому графіку
7-6	Здобувач(ка) не працював(ла) на лабораторних заняттях, повністю виконав(ла) завдання та завантажив(ла) звітні матеріали відповідно до методичних рекомендацій в Moodle пізніше терміну вказаного у семестровому графіку
5-4	Здобувач(ка) не працював(ла) на лабораторних заняттях, частково виконав(ла) завдання та завантажив(ла) звітні матеріали відповідно до методичних рекомендацій в Moodle пізніше терміну вказаного у семестровому графіку
3-2	Здобувач(ка) не працював(ла) на лабораторних заняттях, частково виконав(ла) завдання та завантажив(ла) звітні матеріали не в повному обсязі відповідно до методичних рекомендацій в Moodle пізніше терміну вказаного у семестровому графіку
0	Здобувач(ка) був(ла) відсутня на лабораторних заняттях та не завантажив(ла) звіт (сертифікат) в Moodle




1.4 Питання для самоперевірки

1. Дайте визначення принципам дії термометру опору, термопар.
2. Наведіть рівняння статичної характеристики мідних та платинових термометрів опору.
3. Яким чином здійснюється введення поправки на температуру холодного спаю термопар? Наведіть переваги та недоліки кожного способу.
4. Від яких параметрів залежить час реакції термометрів опору на зміну вхідної величини?
5. Від яких параметрів залежить час реакції термопар на зміну вхідної величини?

1.5 Перелік рекомендованих джерел

1. Characterize temperature sensor (RTD) : Virtual Labs. URL: <https://sl-coep.vlabs.ac.in/exp/characterize-temperature-sensor/procedure.html> (дата звернення: 05.07.2024).
2. Characterize temperature sensor (Thermocouple) : Virtual Labs. URL: <https://sl-coep.vlabs.ac.in/exp/temperature-sensor/procedure.html> (дата звернення: 05.07.2024).
3. Webster J., Eren H. Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook. CRC Press, 2018. URL: <https://read.kortext.com/library/books/190207> .



2 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2. «ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЛІНІЙНИХ ЗМІННИХ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНИХ ТРАНСФОРМАТОРНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ»

2.1 Завдання

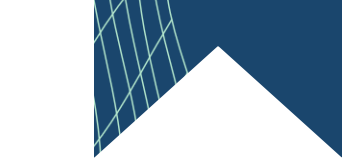
З використанням покрокової інструкції за посиланням [\[1\]](#) дослідити вплив параметрів лінійного змінного диференціального трансформатора на його вихідний сигнал. У звіті навести скріншоти результатів впливу зміни параметрів по пунктах 2-4 для різної кількості витків обмоток котушок, для різних значень напруги живлення та її частоти, на вихідну напругу. Проаналізувати результати, у звіті навести висновки та скріншоти відповідей на питання тестування [1].

2.2 Теоретичні відомості

Лінійний змінний диференціальний трансформатор (LVDT) – електромеханічний перетворювач прямолінійного переміщення будь-якого об'єкта, з яким він механічно пов'язаний, у пропорційний йому електричний сигнал.

Конструкція: LVDT складається з двох основних компонентів: рухомого якоря та зовнішніх обмоток трансформатора. LVDT складається з 3 обмоток. Центральна – первинна обмотка, а дві інші - вторинні обмотки. Вторинні ідентичні та розташовані симетрично відносно первинної. Вторинні котушки з'єднані послідовно-протилежно. Рухомий елемент LVDT називається сердечником. Це арматура циліндричної форми, виготовлена з феромагнітного матеріалу. Він вільно переміщується вздовж осі труби. Одним кінцем сердечник з'єднаний з об'єктом, переміщення якого потрібно виміряти, а інший кінець вільно рухається всередині порожнистого отвору котушки.

Робота: До первинної обмотки підключається змінний струм відповідної амплітуди та частоти (первинне збудження). Частота струму зазвичай знаходиться в діапазоні від 1 до 10 кГц. Цей струм викликає індукцію напруги в кожній вторинній обмотці, яка пропорційна її взаємній індуктивності з первинною. Хоча частота індукованої напруги така ж, як і частота збудження, її амплітуда змінюється залежно від положення сердечника. Коли сердечник рухається, напруга, індукована у вторинній обмотці, змінюється через зміну взаємної індуктивності. Котушки з'єднані послідовно, але в протилежній фазі, так що вихідна напруга є різницею між двома вторинними напругами. Коли сердечник знаходиться точно в центральному положенні, тобто на однаковій відстані від двох вторинних обмоток, у цих двох котушках індуються однакові, але протилежні за знаком напруги, тому вихідна напруга дорівнює нулю. Коли сердечник зміщується в одному напрямку, напруга в одній котушці зростає відносно



іншої, в результаті чого вихідна напруга збільшується від нуля до максимального значення. Ця напруга знаходиться в фазі з первинною напругою. Коли сердечник рухається в іншому напрямку, вихідна напруга також зростає від нуля до максимального значення, але фаза протилежна первинній. Величина вихідної напруги пропорційна відстані, на яку переміщується сердечник. Фаза напруги вказує напрямок зміщення.

Випадок 1: Коли сердечник не зміщується, а залишається в нульовому положенні без будь-якого руху, тоді напруга, індукована в обох вторинних обмотках, є однаковою, що призводить до того, що чистий вихід дорівнює нулю тобто $E_{s1} - E_{s2} = 0$

Випадок 2: Коли зміщення застосовується таким чином, що сердечник рухається вліво, тоді напруга, індукована в цій (лівій) вторинній котушці, є більшою порівняно з ЕРС, індукованою в іншій вторинній котушці. Таким чином, чистий вихід $E_{s1} - E_{s2}$.

Випадок 3: Коли сила прикладена до сердечника так, що він рухається в правому напрямку, тоді ЕРС, індукована у вторинній котушці 2, більша порівняно з ЕРС, індукованою у вторинній котушці 1, отже, чиста вихідна напруга дорівнює $E_{s2} - E_{s1}$. Як видно, напруга зазнає фазового зсуву на 180 градусів, проходячи через нуль. Вихідний сигнал E не відповідає фазі збудження. Зазвичай ця вихідна напруга змінного струму перетворюється відповідною електронною схемою на постійну напругу або струм високого рівня, що є більш зручним у використанні.


Залишкова напруга: Вихідна напруга в нульовому положенні ідеально дорівнює нулю. Але через гармоніки в напрузі збудження та зв'язку блукаючої ємності між первинною та вторинною обмотками в нульовому положенні існує ненульова напруга. Це називається залишковою напругою. Якщо вона становить менше 1 % повної вихідної напруги (що є нормальним випадком), то знаходиться в допустимих межах.

Вихрові струми: Коли через котушку пропускається змінний струм, у котушці та навколо неї створюється магнітне поле. Коли стрижень наближається до провідного матеріалу, змінне магнітне поле стрижня створює потік струму в матеріалі. Вони називаються вихровими струмами. Вихрові струми створюють власні магнітні поля, які взаємодіють з первинним магнітним полем котушки. Коли вихровий струм протікає через провідний сердечник, він створює тепло. Це спричиняє втрату потужності в ядрі. Для зменшення втрат на вихрові струми сердечник забезпечений пазом. Цей проріз розсікає створене магнітне поле, таким чином зменшуючи потік. З цією ж метою використовується також ламінований сердечник.

Класифікація LVDT на основі застосування:

- LVDT загального призначення використовуються в багатьох промислових і дослідницьких програмах.

- Високоточні LVDT: для калібрування датчиків та застосувань контролю якості.



– Занурюваний LVDT: герметично закритий для використання в промислових і дослідницьких середовищах, що включають корозійні рідини та газу, високу температуру та вібрацію тощо.

Класифікація LVDT в залежності від діапазону дії:

Короткий: повномасштабний лінійний діапазон від $\pm 0,01$ дюйма ($\pm 0,25$ мм) до $\pm 0,5$ дюйма ($\pm 12,7$ мм)

Довгий: повномасштабний лінійний діапазон від $\pm 0,5$ дюйма ($\pm 12,7$ мм) до $\pm 18,5$ дюйма (± 470 мм)

Класифікація LVDT на основі збудження, що використовується:

– LVDT змінного струму збуджується напругою змінного струму частотою від 50 Гц до 25 кГц із номінальним значенням 2,5 кГц. Несуча частота зазвичай вибирається принаймні в 10 разів більшою за найвищу очікувану частоту руху сердечника. LVDT, що працюють від змінного струму, як правило, менші за розміром і більш точні, ніж версії постійного струму. Вони здатні витримувати екстремальні коливання робочої температури, ніж LVDT постійного струму. Сучасні схеми часто постачають схеми визначення фази разом із LVDT. Схема фазочутливого детектора (PSD) корисна, щоб зробити напрям вимірювання чутливим. Він підключається до виходу LVDT і порівнює фазу вторинного виходу з первинним сигналом, щоб судити про напрямок руху. Вихід фазочутливого детектора після проходження через фільтр низьких частот має форму постійної напруги, яка використовується для постійного відхилення.

– LVDT постійного струму оснащений вбудованим генератором, підсилювачем несучої та демодулятором. Основними перевагами LVDT, що працюють від постійного струму ("DC-to-DC"), є простота встановлення та формування сигналу, можливість роботи від батарей із сухими елементами у віддалених місцях і менша вартість системи (особливо в багатоточкових додатках). LVDT постійного струму має температурні обмеження, що зазвичай працюють від -40 °C до $+120$ °C

Класифікація LVDT на основі арматури:

– Некерована арматура – це найпростіша конфігурація, у якій арматура вільно вставляється в порожнину отвору котушок. Для цього необхідна правильна установка, щоб забезпечити правильний рух уздовж осі. Це забезпечує рух без тертя без зносу. Цей тип має необмежений термін служби втомі, хорошу повторюваність із нескінченною роздільною здатністю. Вільна арматура в основному підходить для застосування на короткій відстані з високою швидкістю.

– Направляюча арматура: у цьому типі арматура фіксується та направляється підшипниковим вузлом із низьким коефіцієнтом тертя. Вони підходять для тривалої роботи. Щоб уникнути можливості перекошу арматуру направляють.

– Пружинні подовжені арматури – ця арматура схожа на керовану арматуру LVDT з внутрішньою пружиною, яка безперервно штовхає

арматуру до максимально можливого висування. Це забезпечує легкий і надійний контакт з вимірюваним об'єктом. Найкраще підходить для статичних або повільних застосувань.

Застосування LVDT:

Позиційний зворотний зв'язок у сервомеханізмах.

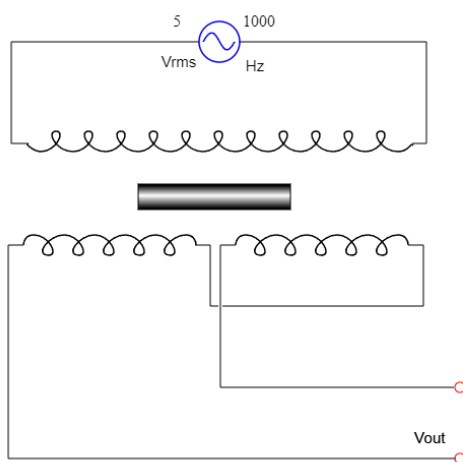
Автоматичне вимірювання у верстатах і багатьох інших промислових і наукових застосуваннях.

Вимірювання зміщення в діапазоні від часток мм до см

Як вторинний перетворювач використовується для вимірювання сили, ваги та тиску [1-3].

2.3 Хід роботи

1. Спочатку потрібно налаштувати LVDT. Оберіть вкладку Моделювання (рис. 2.1). Клацніть вкладку «Показати панель» у правому нижньому куті. Щоб створити схему, перетягніть первинну котушку, арматуру та вторинні котушки в місцях, показаних ліворуч.



NOTE

- The Supply Voltage range is 5V to 15V
- The Supply Frequency range is 1KHz to 10KHz
- For simulation purpose ,the Supply Voltage is restricted to 10V and Supply Frequency is restricted to 5 KHz

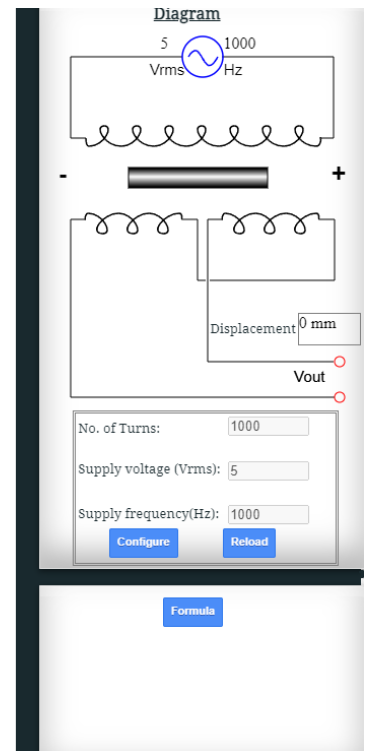
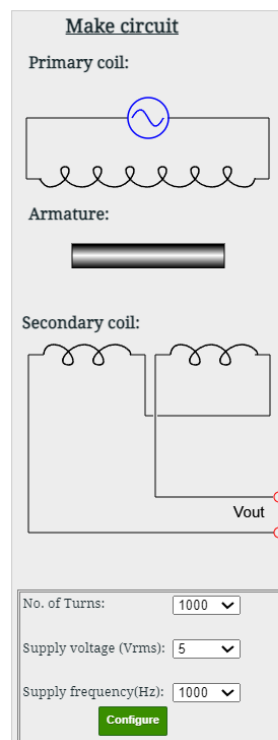


Рисунок 2.1 – Віртуальне лабораторне устаткування для дослідження лінійного диференціального трансформаторного перетворювача

2. Тепер виберіть «Кількість витків» (No. of Turns), «Пікова напруга живлення» (Supply voltage) та «Частота» (Supply frequency) з меню перетягування, доступного під діаграмою LVDT. Натисніть на блок конфігурації, щоб налаштувати LVDT.

3. Тепер натисніть на чорний прямокутний сердечник, розміщений між первинною та вторинною обмотками.

4. Перетягніть сердцевину вліво та спостерігайте за впливом на вихідну величину. Це можна спостерігати на осцилограмі залежності вихідної напруги від часу та на графіку залежності вихідної напруги від відстані (рис. 2.2). Переміщення сердечника вказано у квадраті під діаграмою.

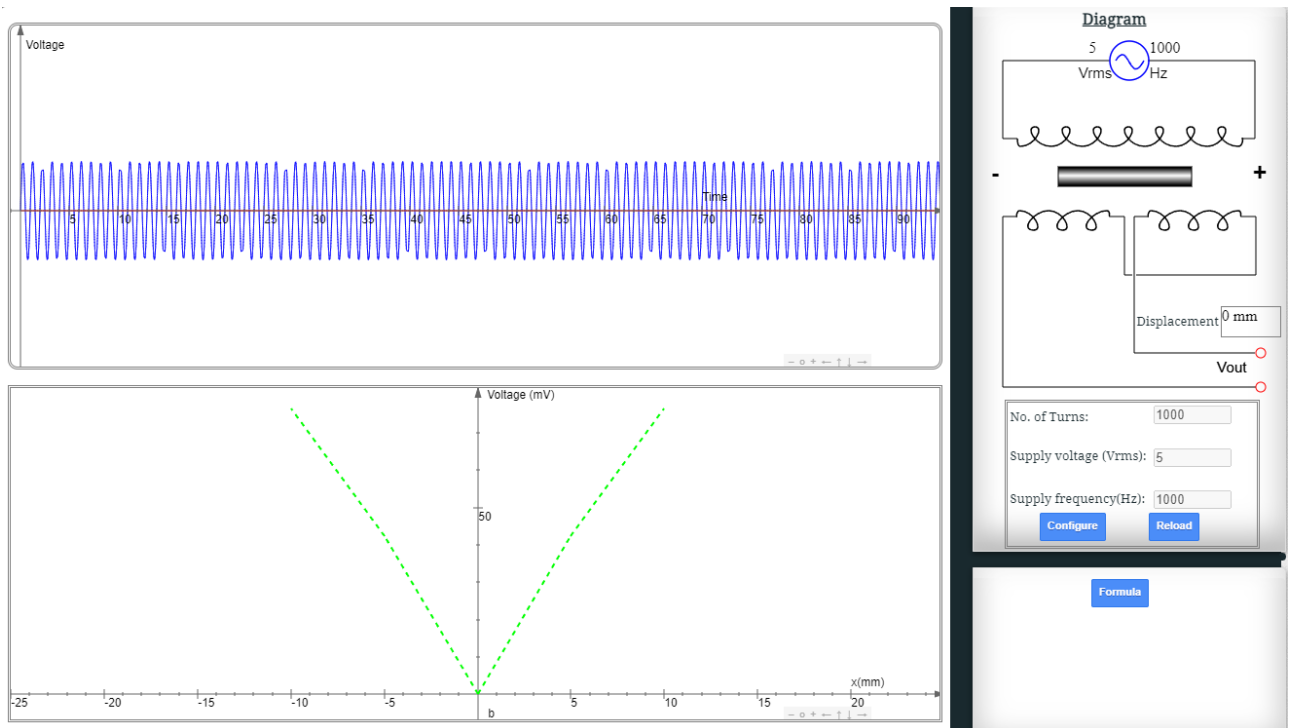


Рисунок 2.2 – Осцилограми залежності вихідної напруги від часу та на графіку залежності вихідної напруги від відстані

5. Перетягніть сердечник в праву сторону та спостерігайте за впливом на вихідну величину. Також спостерігайте за зміною фази.

6. Повторіть кроки 2-4, змінюючи напругу живлення, зберігаючи постійну частоту та кількість витків.

7. Проаналізуйте вплив на вихідну напругу. Для цього натисніть синю вкладку «Налаштувати» на правій бічній панелі. Необхідно вибрати необхідне значення параметра зі спадного меню. Після вибору значень клацніть зелену вкладку «Налаштувати», щоб встановити значення параметрів.

8. Повторіть кроки 2-4, змінюючи частоту живлення та лишаючи кількість витків на постійному рівні. Проаналізуйте вплив на вихідну напругу. Тепер підтримуйте постійну напругу та частоту живлення. Змініть кількість витків і спостерігайте за впливом на вихідну напругу, повторюючи кроки 2-4.

У звіті слід навести скріншоти графіків вихідної напруги при зазначених параметрах. По кожному необхідно навести висновки [1].

2.3 Критерії оцінювання та вимоги до оформлення звітів

Кількість балів	Критерій оцінювання
10	Здобувач(ка) працював(ла) на лабораторних заняттях, приймав(ла) активну участь у виконанні лабораторної роботи, виконав(ла) завдання в повному обсязі, зробивши обґрунтовані висновки, та завантажив(ла) оформлений відповідно до вимог звіт в Moodle згідно з семестровим графіком (до наступного заняття)
9-8	Здобувач(ка) працював(ла) на лабораторних заняттях, виконав(ла) роботу в повному обсязі та завантажив(ла) оформлений відповідно до вимог звіт в Moodle згідно з семестровим графіком (до наступного заняття), але припустив(ла)ся незначних помилок у висновках
7-6	Здобувач(ка) не працював(ла) на лабораторних заняттях, повністю виконав(ла) завдання та завантажив(ла) звітні матеріали відповідно до методичних рекомендацій в Moodle пізніше терміну вказаного у семестровому графіку
5-2	Здобувач(ка) не працював(ла) на лабораторних заняттях, частково або з суттєвими помилками виконав(ла) завдання та завантажив(ла) звітні матеріали в Moodle пізніше терміну вказаного у семестровому графіку
0	Здобувач(ка) був(ла) відсутнім на лабораторних заняттях та не завантажив(ла) звіт (сертифікат) в Moodle

Звіт має бути оформлений відповідно до вимог щодо оформлення технічної документації на аркушах формату А4. До складу звіту повинні входити:

1. Титульна сторінка.
2. Назва та мета лабораторної роботи.
3. Постановка завдання.
4. Результати дослідження впливу параметрів перетворювача на його вихідний сигнал (графіки та висновки по них).
5. Висновки.

2.4 Питання для самоперевірки

1. Опишіть конструкцію лінійного диференціального трансформаторного перетворювача.
2. Опишіть принцип дії лінійного диференціального трансформаторного перетворювача.
3. Наведіть класифікації лінійного диференціального трансформаторного перетворювача
4. Охарактеризуйте параметри та їхній вплив на вихідний сигнал лінійного диференціального трансформаторного перетворювача



2.5 Перелік рекомендованих джерел

1. Characterize the LVDT : Virtual Labs. URL: <https://sl-coep.vlabs.ac.in/exp/lvdt/procedure.html> (дата звернення: 05.07.2024).

2. Webster J., Eren H. Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook. CRC Press, 2018.
URL: <https://read.kortext.com/library/books/190207> .

3. Сусліков Л. М., Студеняк І. П. Первинні вимірювальні перетворювачі фізичних величин : навч. посіб. Ужгород : Видавництво УжНУ, 2018. 311 с.



3 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3. «ВИМІРЮВАННЯ РІВНЯ В РЕЗЕРВУАРІ ЗА ДОПОМОГОЮ ДАТЧИКА РІВНЯ ЄМНІСНОГО ТИПУ»

3.1 Завдання

З використанням покрокової інструкції за посиланням [\[1\]](#) виконати дослідження впливу параметрів ємнісного датчика рівня на його вихідний сигнал. У звіті навести скріншоти результатів. Дати відповіді на питання тестування. У звіті навести скріншоти відповіді.

3.2 Теоретичні відомості

У промисловості вимірювання рівня, зокрема, рідин та сипких речовин має важливе значення. Рівень рідини в ємності впливає не тільки на її кількість, але й на тиск і швидкість потоку в контейнер і з нього. Датчики рівня визначають рівень речовин, таких як рідини, суспензії, гранульовані матеріали та порошки. Речовина, що підлягає вимірюванню, може знаходитися всередині контейнера або бути в природному вигляді (наприклад, річка або озеро). Вимірювання рівня може бути як безперервним, так і точковим.

Безперервні датчики рівня вимірюють рівень, щоб визначити точну кількість речовини безперервним способом.

Точкові датчики вказують, чи знаходиться речовина вище або нижче точки зондування. Це важливо для уникнення переповнення або спорожнення резервуарів, а також для захисту насосів від сухого ходу.

До критеріїв вибору датчика рівня можна віднести:

- Фізична фаза (рідка, тверда речовина або суспензія)
- Температура
- Тиск або вакуум
- Хімія
- Діелектрична проникність середовища
- Щільність (питома вага) середовища
- Агітація (дія)
- Акустичний або електричний шум
- Вібραції
- Механічні удари
- Розмір і форма резервуара або смітєвого бака
- 3 точки зору застосування, міркування такі:
 - Ціна
 - Точність
 - Швидкість реагування
 - Простота калібрування
 - Фізичний розмір і кріплення інструменту

– Моніторинг або контроль безперервних або дискретних рівнів
Методи вимірювання рівня в цілому поділяються на прямі та непрямі.

У прямих методах рівень вказується безпосередньо за допомогою простих механічних пристроїв. На вимірювання не впливають зміни щільності матеріалу. Ось кілька прикладів:

- паличка для занурення;
- стрічки опору;
- оглядове скло;
- поплавці;
- ультразвукові;
- радар.

У непрямих методах рівень перетворюється у вимірюваний сигнал за допомогою відповідного перетворювача. Зміна матеріалу впливає на результат вимірювання. При повторному калібруванні приладу необхідно використовувати коригуючий коефіцієнт. Ось кілька прикладів:

- методи гідростатичного напору;
- тензодатчик;
- ємності;
- провідність.

Вимірювання рівня ємнісним методом: Ємнісний перетворювач рівня є прикладом непрямого вимірювання рівня.

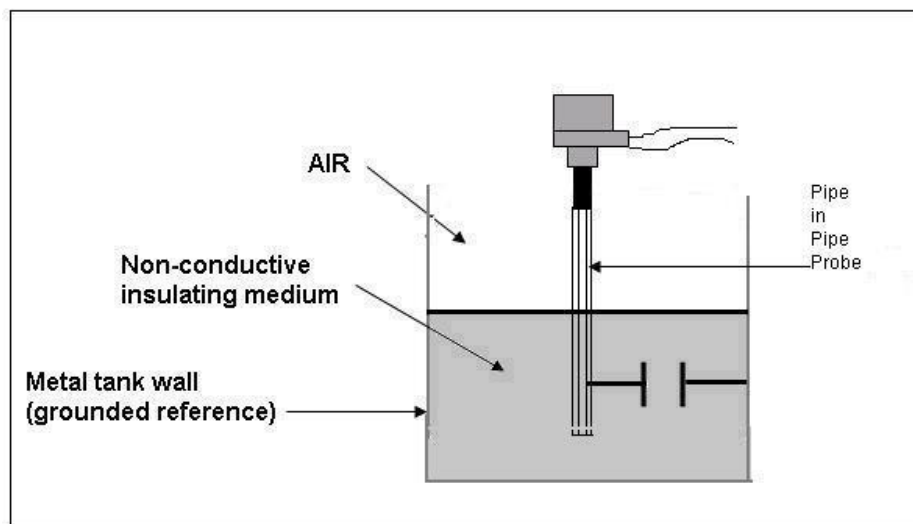



Рисунок 3.1 – Вимірювання рівня ємнісним датчиком

Ємнісні датчики рівня використовуються для широкого спектру твердих речовин, водних і органічних рідин, а також суспензій. Цей метод часто називають РЧ як радіочастотні сигнали, що подаються на коло ємності. Датчики можуть бути розроблені для визначення матеріалу із діелектричними проникними від 1,1 (кокс і летюча зола) до 88 (вода) або



більше. Також можна вимірювати рівень шламів та суспензій, таких як зневоднена макуха та суспензія стічних вод (діелектрична проникність приблизно 50) та рідкі хімічні речовини, такі як негашене вапно (діелектрична проникність приблизно 90). Двозондові ємнісні датчики рівня також можуть бути використані для визначення межі поділу між двома рідинами, що не змішуються, з істотно різними діелектричними проникними.

Оскільки ємнісні датчики рівня є електронними пристроями, фазова модуляція та використання більш високих частот робить датчик придатним для застосувань, в яких діелектричні проникності схожі.

Принцип вимірювання рівня ємнісним методом заснований на зміні ємності. Ізольований електрод діє як одна пластина конденсатора, а стінка резервуара (або еталонний електрод у неметалевому резервуарі) діє як інша пластина. Ємність залежить від рівня речовини. Порожній бак має меншу ємність, тоді як наповнений бак має більшу ємність. Простий конденсатор складається з двох електродних пластин, розділених невеликою товщиною ізолятора, наприклад твердого, рідкого, газового або вакуумного. Цей ізолятор ще називають діелектричним. Величина C залежить від використовуюваного діелектрика, площі пластини, а також відстані між пластинами.

$$C = E (K A/d) \quad (3.1)$$

де C – ємність в пікофарадах (pF);

E – константа – абсолютна діелектрична проникність вільного простору;

K – відносна діелектрична проникність ізоляційного матеріалу

A – ефективна площа провідників

d – відстань між провідниками

Цю зміну ємності можна виміряти за допомогою моста змінного струму.

Вимірювання проводиться шляхом застосування радіочастотного сигналу між провідним зондом і стінкою резервуару. Радіочастотний сигнал призводить до дуже низького протікання струму через матеріал діелектричного процесу в резервуарі від зонда до стінки резервуару. При зниженні рівня в ємності діелектрична проникність падає, викликаючи падіння показань ємності і хвилинне падіння протікання струму. Ця зміна реєструється внутрішньою схемою реле рівня і перетворюється на зміну стану реле рівня у випадку визначення точкового рівня. У випадку з безперервними детекторами рівня на виході виходить не релейний стан, а масштабований аналоговий сигнал.

Вимірювання рівня можна розділити на три категорії:

– Вимірювання непровідного матеріалу

- Вимірювання струмопровідного матеріалу
- Безконтактне вимірювання

Для вимірювання рівня непровідних рідин використовується неізольоване розташування зонда, так як опір рідини досить великий, щоб зробити його діелектричним. Так як електрод і бак закріплені на місці, то відстань (d) постійна, ємність прямо пропорційна рівню матеріалу, що виступає в ролі діелектрика.

У провідних рідинах пластини зонда ізолюються за допомогою тонкого покриття зі скла або пластику, щоб уникнути короткого замикання. Струмопровідний матеріал виконує роль пластини заземлення конденсатора.

При вимірюванні рівня безконтактним методом площа ємності пластин фіксована, але відстань між пластинами варіюється. Таке вимірювання рівня не дає лінійного виходу і використовується при зміні рівня на кілька дюймів.

Переваги вимірювання рівня ємнісним методом:

1. Відносно недорогий
2. Універсальний
3. Надійний
4. Вимагає мінімального обслуговування
5. Не містить рухомих частин
6. Простий в установці і може бути легко адаптований для різних розмірів суден
7. Хороша дальність вимірювання, від декількох см до приблизно 100 м
8. Міцний
9. Простий у використанні
10. Легко чистити
11. Може бути використаний для застосування при високій температурі та тиску.

Застосування:

Датчики рівня ємності використовуються для вимірювання рівня

- рідин
- твердих та гранульованих твердих речовин;
- рідких металів при дуже високій температурі;
- зріджених газів при дуже низькій температурі;
- корозійних матеріалів, таких як плавикова кислота;
- у промислових процесах дуже високого тиску.

Недоліки:

Матеріали зі щільністю менше 20 фунтів/фут³ та матеріали з розміром частинок, що перевищують 1/2' в діаметрі можуть бути проблемою через їхні дуже низькі діелектричні проникності (викликані великою кількістю повітряного простору між частинками).

Вихідний сигнал ємнісного датчика типу труба в трубі можна визначити за формулою:

$$C=2 \pi \epsilon_0 (\epsilon_1 h_1 + \epsilon_2 h_2) / \ln (r_2/r_1) \quad (3.2)$$

де

C – ємність в мкФ;

r_1 – радіус внутрішнього циліндра/труби для зонда типу «труба в трубі»;

r_2 – радіус зовнішнього циліндра/труби для зонда типу «труба в трубі»;

ϵ_0 – діелектрична проникність простору = $8,85 \cdot 10^{-12}$

ϵ_1 – діелектрична проникність повітря = 1

ϵ_2 – діелектрична проникність технологічної рідини/обраної послуги

h_1 – висота (рівень) повітряного стовпа = Span (проліт) – висота стовпа рідини;

h_2 – висота (рівень) стовпа рідини проліт Span (проліт) = (Висота бака * 0,9) – 5 [1-3].

Таблиця 3.1 – Значення діелектричної проникності технологічних речовин

Технологічна рідина/сервіс	Діелектрична проникність (ϵ_2)
Water	80
Hydrochloric Acid	5
Coffee Beans	1.5
Grain of mustard seed	3.6
Skimmed milk powder	2.3

3.3 Хід роботи

Покроковий порядок дій:

1. Виберіть висоту резервуара в сантиметрах (рис. 3.2).

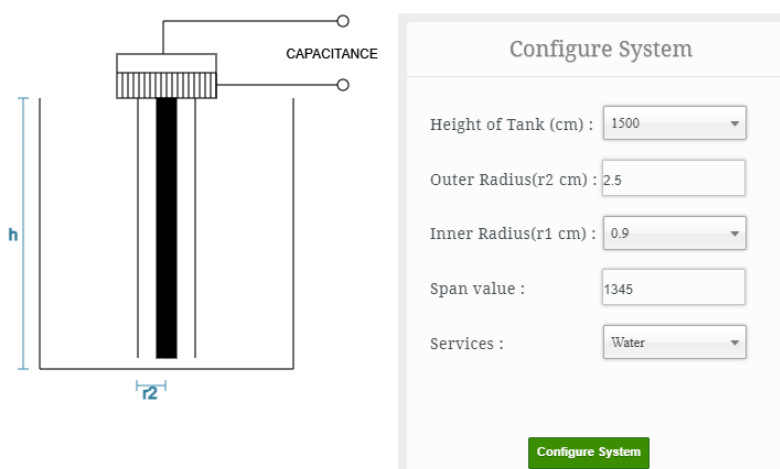


Рисунок 3.2 – Віртуальне лабораторне устаткування для дослідження вимірювання рівня в резервуарі ємнісним датчиком

2. Величина радіуса r_2 зовнішнього циліндра зонду типу труба в трубі фіксована 2,5 см.
3. Виберіть значення радіуса внутрішнього циліндра зонду типу труба в трубі r_1 в сантиметрах.
4. Буде відображено значення Span (проліт), що становить 90% від висоти резервуара.
5. Виберіть застосування (Services), для якого буде використовуватися ємнісний датчик рівня.
6. Натисніть «Налаштувати систему» (Configure System).
7. Після підтвердження виберіть рівень рідини з випадаючого меню для обраного застосування.
8. Введіть розраховану вихідну ємність користувача в мкФ. Для розрахунку вихідної ємності натисніть на кнопку «отримати формулу». Використовуючи формулу (3.2), обчисліть значення вихідної ємності для відповідного рівня і введіть відповідь у відповідне поле (до 2-х десяткових знаків з округленням). Надішліть відповідь за допомогою кнопки «відправити».
9. Для побудови графіків необхідно мінімум три розрахунки. Слід послідовно обирати значення рівня на початку, в середині та в кінці шкали. Натисніть на графік залежності ємності від рівня та графік залежності струму від рівня та проаналізуйте їх.
10. Натисніть на Next, щоб змінити значення r_1 і повторіть кроки з 7 по 10. У звіт необхідно додати скріншоти графіків залежностей ємності від рівня та струму від рівня та зробити висновки, проаналізувавши вплив параметрів ємнісного датчику рівня на його вихідний сигнал [1].

3.4 Критерії оцінювання та вимоги до оформлення звітів

Кількість балів	Критерії оцінювання
10	Здобувач(ка) працював(ла) на лабораторних заняттях, приймав(ла) активну участь у виконанні завдання, виконав(ла) роботу в повному обсязі, зробивши обґрунтовані висновки, та завантажив(ла) оформлений відповідно до вимог звіт в Moodle згідно з семестровим графіком (до наступного заняття)
9-8	Здобувач(ка) працював(ла) на лабораторних заняттях, частково виконав(ла) роботу (визначив(ла) та завантажив(ла) оформлений відповідно до вимог звіт в Moodle згідно з семестровим графіком (до наступного заняття), але припустив(ла)ся незначних помилок у висновках
7-6	Здобувач(ка) не працював(ла) на лабораторних заняттях, повністю виконав(ла) завдання та завантажив(ла) звітні матеріали відповідно до методичних рекомендацій в Moodle пізніше терміну вказаного у семестровому графіку

5-2	Здобувач(ка) не працював(ла) на лабораторних заняттях, частково або з суттєвими помилками виконав(ла) завдання та завантажив(ла) звітні матеріали в Moodle пізніше терміну вказаного у семестровому графіку
0	Здобувач(ка) був(ла) відсутня на лабораторних заняттях та не завантажив(ла) звіт (сертифікат) в Moodle

Звіт має бути оформлений відповідно до вимог щодо оформлення технічної документації на аркушах формату А4 . До складу звіту повинні входити:

1. Титульна сторінка.
2. Назва та мета лабораторної роботи.
3. Постановка завдання.
4. Результати роботи у вигляді графіків зміни вихідного сигналу датчика та висновків, де проаналізовано вплив кожної зміни параметрів датчика та середовища на вихідний сигнал.
5. Загальні висновки.

3.5 Питання для самоперевірки

1. Обґрунтуйте важливість вимірювання рівня в промислових умовах.
2. Які методи використовують для вимірювання рівня?
3. Опишіть принцип дії ємнісних датчиків рівня, їхні переваги та недоліки.
4. Наведіть узагальнені висновки щодо впливу параметрів датчика та середовища на результати вимірювання.

3.6 Перелік рекомендованих джерел

1. Measurement of level in a tank using capacitive type level probe : Virtual Labs. URL: <https://sl-coep.vlabs.ac.in/exp/tank-using-capacitive/procedure.html> (дата звернення: 05.07.2024).
2. Webster J., Eren H. Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook. CRC Press, 2018. URL: <https://read.kortext.com/library/books/190207> .
3. Сусліков Л. М., Студеняк І. П. Первинні вимірювальні перетворювачі фізичних величин : навч. посіб. Ужгород : Видавництво УжНУ, 2018. 311 с.

4 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4. «ВИЗНАЧЕННЯ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДАТЧИКУ ТИСКУ»

4.1 Завдання

1. Провести калібрування цифрового датчику тиску, використовуючи як еталонний цифровий кремнієвий п'єзорезистивний датчик тиску.
2. Визначити метрологічні характеристики цифрового датчику тиску.

4.2 Теоретичні відомості

П'єзорезистивний ефект

Коли на метал або напівпровідник прикладається зовнішня сила або деформація, змінюється його електричний опір, зміна електричного опору при механічному деформації називається п'єзорезистивним ефектом. Зміна опору за рахунок зовнішнього входу є більш домінуючою в напівпровідниках в порівнянні з металами.

П'єзорезистивні перетворювачі використовують п'єзорезистивний ефект для перетворення фізичних величин в електричні. П'єзорезистивний перетворювач використовує п'єзорезистори для перетворення механічного входу в електричний вихід. Зазвичай п'єзорезистори підключаються за допомогою мостової схеми з постійним джерелом живлення постійного струму. Коли механічний вхід до п'єзорезистивного перетворювача дорівнює нулю, міст збалансований, а вихід перетворювача дорівнює нулю.

При подачі механічного входу на п'єзорезистивний перетворювач змінюється і електричний опір п'єзорезистора. Ця зміна робить міст незбалансованим, що генерує електричну напругу, пропорційну механічному входу в п'єзорезистивний перетворювач.

Застосування п'єзорезистивного ефекту


П'єзорезистивний ефект має застосування як у перетворювачах, так і в датчиках. Деякі з цих застосувань включають п'єзорезистивні датчики тиску, п'єзорезистивні перетворювачі з кремнієвим чіпом і п'єзорезистивні акселерометри.

1. П'єзорезистивні датчики тиску

П'єзорезистивні датчики тиску вигідні своєю високою чутливістю та лінійністю. Вони застосовуються в біомедичних пристроях, автомобілях, побутовій електроніці та аерокосмічній промисловості.

2. П'єзорезистивні кремнієві перетворювачі

П'єзорезистивні кремнієві чіпи використовують п'єзорезистивний ефект у кремнієвих напівпровідниках. Перетворювач з кремнієвим чіпом перетворює прикладений тиск в пропорційну електричну напругу за



допомогою мостової схеми [1]. До переваг п'єзорезистивних кремнієвих чіп-перетворювачів можна віднести:

3. Лінійність за рахунок відсутності гістерезису
4. Висока роздільна здатність
5. Частотний діапазон до 100 кГц

Калібрування — комплекс дій, що проводяться під час регулювання та періодичного підтвердження градуовальних характеристик контрольно-вимірювального приладу чи системи вимірювання спеціально для того, щоб встановити кореляцію (залежність) між показаннями приладу та кінцевим (що має бути повідомленим) результатом. Під час калібрування повинна бути мінімізована систематична похибка та встановлена точність контрольно-вимірювального приладу чи системи вимірювання. Зазвичай, калібрування контрольно-вимірювального приладу проводиться на еталонному матеріалі з використанням добре охарактеризованого матеріалу. Результат калібрування може записуватися в документ, що називається сертифікатом калібрування, і, деколи, відображається як фактор калібрування чи набір факторів калібрування, наприклад, у формі кривої калібрування. Процес калібрування повинен включати оцінку похибки калібрування.

Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність» розділяє калібрування на два етапи:

на першому етапі встановлюється співвідношення між значеннями величини, що забезпечуються еталонами з притаманними їм невизначеностями вимірювань, та відповідними показами з пов'язаними з ними невизначеностями вимірювань;

на другому етапі ця інформація використовується для встановлення співвідношення для отримання результату вимірювання з показу [2].

4.3 Опис лабораторної установки

Лабораторна робота виконується виключно під час лабораторних занять на реальному стенді (рис. 4.1), до якого забезпечено віддалений доступ через вебінтерфейс (рис. 4.2).

До складу лабораторного стенду входять датчики тиску:

- Манометр 1 – XGZP6847A Pressure Sensor Module, що використовується як еталонний (Exemplary pressure, рис. 4.2). Характеристики наведені у таблиці 4.1[3];
- Манометр 2 – Digital Barometric Pressure Sensor, який необхідно відкалібрувати та визначити метрологічні характеристики (Measured pressure, рис. 4.2);
- Насос для нагнітання повітря у резервуар (Pump, рис. 4.2);
- Скидний клапан (Solenoid, рис. 4.2);
- Контролер Arduino.

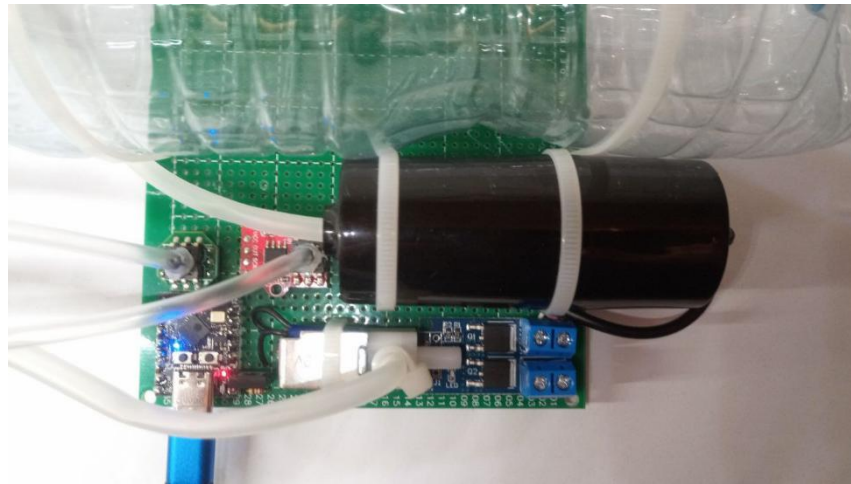




Рисунок 4.1 – Лабораторний стенд для визначення метрологічних характеристик датчику тиску

Lab work #4. Pressure sensor verification

 Exemplary pressure **-0.02** kPa

 Measured pressure **-4** units

PUMP

SOLENOID

Рисунок 4.2 – Вебінтерфейс лабораторного стенду для визначення метрологічних характеристик датчику тиску

Таблиця 4.1 – Характеристики XGZP6847A [3]


Item	Data	Unit
Power Supply	5(or 3.3 or 3)	V
Max. Excitation current	3	mA
Output Signal	0.5-4.5(or 0.2-2.7 or customized)	V
Accuracy(≥ 20 kPa)	± 1.0 (or ± 0.5)	%Span
TCO(Temp. Coefficient of Offset)	± 0.03	%FS/ $^{\circ}$ C
TCS(Temp. Coefficient of Span)	± 0.03	%FS/ $^{\circ}$ C
Long Term Stability(1year)	± 0.5	%Span
Over Pressure	2X (≤ 500 kPa)	Rated
	1.5X(≥ 500 kPa)	
Compensation Temp.	0 ~ 60/32 ~ 140	$^{\circ}$ C/ $^{\circ}$ F
Ambient Temp.	-10 ~ 85/14 ~ 176	$^{\circ}$ C/ $^{\circ}$ F
Storage Temp.	-40 ~ 125/-40 ~ 257	$^{\circ}$ C/ $^{\circ}$ F


4.4 Хід роботи

Покроковий порядок дій:

1. При увімкненому стенді натисканням кнопки PUMP (вмиканням насосу) слід збільшити тиск повітря в резервуарі (рис. 4.3) до 12 кПа.

Lab work #4. Pressure sensor verification

 Exemplary pressure 2.42 kPa

 Measured pressure 92 units

PUMP

SOLENOID

Рисунок 4.3 – Індикація роботи лабораторного стенду для визначення метрологічних характеристик датчику тиску

2. Провести калібрування датчика тиску Манометр 2 (Measured pressure, units) на зворотному ході при повільному падінні тиску, одночасно фіксуючи в таблицю 4.2 значення тиску, виміряні Манометром 1, Exemplary pressure, kPa, та значення тиску, виміряні Манометром 2, Measured pressure, units, з кроком 0,5 кПа.

Таблиця 4.2 – Дані для калібрування Манометру 2

№	Манометр 1 Exemplary pressure, kPa	Манометр 2 Measured pressure, units
1	2	3
1	12	
2	11,5	
3	11	
...	...	
24	0,5	
25	0	

3. Для встановлення співвідношення між значеннями тиску, що є результатами вимірювання Манометром 1, та показаннями Манометру 2 слід побудувати графік залежності даних ст. 3 від даних ст. 2, табл. 4.2.

4. Визначити відповідність одиниць шкали Манометру 2 вимірюваному тиску в кПа, обчисливши відношення середніх значень відповідних

стовпців 2 та 3, таким чином, встановити, скільки одиниць (units) відповідає 1 кПа.

5. Для перевірки метрологічних характеристик Манометру 2 слід використати дані, отримані на кроках 1-4. З урахуванням відповідності між одиницями шкали Манометру 2 та кПа, обчислити значення тиску в кПа, заповнивши стовпчик 4, табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Дані для визначення метрологічних характеристик Манометру 2


№	Манометр 1 Exemplary pressure, kPa	Манометр 2 Measured pressure, units	Манометр 2 Measured pressure, kPa	Δ, кПа	γ, %
1	2	3	4	5	6
1	12				
2	11,5				
3	11				
...	...				
24	0,5				
25	0				

6. Розрахувати абсолютну та приведені похибки вимірювання, прийнявши нормувальний показник шкали Манометру 2 рівним 12 кПа, занести їхні значення в таблицю 4.3.

7. Визначити максимальну приведену похибку, порівняти її значення зі стандартним для датчиків такого типу 1%Span. Зробити висновок.

4.5 Критерії оцінювання та вимоги до оформлення звітів

Кількість балів	Критерій оцінювання
10	Здобувач(ка) працював(ла) на лабораторних заняттях, приймав(ла) активну участь у виконанні завдання, виконав(ла) завдання в повному обсязі та завантажив(ла) звіт в Moodle згідно з семестровим графіком (до наступного заняття)
9-8	Здобувач(ка) працював(ла) на лабораторних заняттях, виконав(ла) завдання в повному обсязі та завантажив(ла) звіт або Сертифікат інформальної освіти з файлами скриптів в Moodle згідно з семестровим графіком (до наступного заняття), але припустив(ла)ся незначних помилок у розрахунках/висновках
7-6	Здобувач(ка) не працював(ла) на лабораторних заняттях, виконав(ла) завдання в повному обсязі та завантажив(ла) звіт або Сертифікат інформальної освіти в Moodle пізніше терміну вказаного у семестровому графіку
5-2	Здобувач(ка) не працював(ла) на практичних заняттях, виконав(ла) завдання частково та завантажив(ла) звіт в Moodle пізніше терміну вказаного у семестровому графіку
0	Здобувач(ка) був(ла) відсутня на практичних заняттях та не завантажив(ла) звіт (сертифікат) в Moodle



Звіт має бути оформлений відповідно до вимог щодо оформлення технічної документації на аркушах формату А4. До складу звіту повинні входити:

1. Титульна сторінка.
2. Назва та мета лабораторної роботи.
3. Постановка завдання.
4. Результати роботи у вигляді заповнених таблиць, розрахунків, графіків, відповідних висновків.
7. Загальні висновки.

4.6 Питання для самоперевірки

1. Наведіть відомі методи вимірювання рівня.
2. Опишіть принцип дії п'єзорезистивних датчиків тиску.
3. З використанням якої схеми вимірюється опір елемента сприйняття п'єзорезистивних сенсорів?
4. Вкажіть відмінності між аналоговими та цифровими датчиками тиску.
5. Наведіть формулу для обчислення приведеної похибки вимірювання датчику у вказаному діапазоні.

4.7 Перелік рекомендованих джерел

1. Anderson N. A. Instrumentation for Process Measurement and Control. Third Edition. CRC Press LLC, 2017. URL: <https://read.kortext.com/library/books/243663> .
2. Про метрологію та метрологічну діяльність : Закон України від 05.06.2014 № 1314-VII : станом на 20 січня. 2021 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1314-18#Text> (дата звернення: 16.01.2024).
3. Micros - Hurtownia części elektronicznych. URL: https://www.micros.com.pl/mediaserver/CZ_XGZP6847a010kpg_0001.pdf (дата звернення: 13.01.2024).



Навчально-методичне видання

**Мірошніченко Вікторія Ігорівна
Вовна Олександр Володимирович**

МЕТРОЛОГІЯ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ ВИМІРЮВАННЯ
методичні вказівки до виконання лабораторних робіт

Самостійне електронне мережеве видання

Публікується в авторській редакції