

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

Перший (бакалаврський)
(рівень вищої освіти)

Моделювання процесів в резистивних датчиках кута повороту ланок
дослідницького робота
(тема)

Виконав:
здобувач 4 року навчання,
групи АКТСІ-21-2
Ілля МАНЯКІН
(власне ім'я, прізвище)

Спеціальність 151 Автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані технології
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Системна інженерія
(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Юрій РОМАШОВ
(посада, власне ім'я, прізвище)

Допускається до захисту
Зав. кафедри КІТАР

Ігор НЕВЛЮДОВ
(підпис) (власне ім'я, прізвище)

2025 р.

Я, Манякін Ілля Андрійович, як здобувач вищої освіти ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Я не використовував штучний інтелект для підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

"04" червня 2025 р.

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Ілля Манякін', enclosed within a light gray rectangular box.

Ілля МАНЯКІН

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет Автоматики та комп'ютеризованих технологій
Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки
Рівень вищої освіти Перший (бакалаврський)
Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
Тип програми Освітньо-професійна
Освітня програма Системна інженерія
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

«28» квітня 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Студентові Манякіну Іллі Андрійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Моделювання процесів в резистивних датчиках кута повороту ланок дослідницького робота

Затверджена наказом по університету від 19.05 2025 р. № 391 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 14.06.2025

3. Вихідні дані до роботи C++, бібліотека LiquidCrystal_I2C, середовище розробки Arduino IDE

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

4.1 Вступ

4.2 Аналіз літератури за темою

4.3 Аналіз принципів роботи, конструктивні особливості, класифікацію та технічні характеристики резистивних датчиків

4.4 Вибір та обґрунтування технічних засобів для створення програмного забезпечення

4.5 Розроблення програмного забезпечення

4.6 Створення, верифікація та аналіз математичної моделі резистивного датчика кута повороту

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри) Графічний матеріал у вигляді презентації (14 с.)

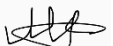
6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Приміт-ка
1	Аналіз технічного завдання	28.04-04.05.2025	виконано
2	Опрацювання літератури за темою роботи	05.05-10.05.2025	виконано
3	Аналіз літератури за темою	11.05-17.05.2025	виконано
4	Вибір і обґрунтування технічних засобів для створення програмного забезпечення	18.05-25.05.2025	виконано
5	Розроблення програмного забезпечення	26.05-31.05.2025	виконано
6	Оформлення пояснювальної записки	01.06-03.06.2025	виконано

Дата видачі завдання 28.04.2025 р.

Здобувач  Ілля Манякін
(підпис) (власне ім'я, прізвище)

Керівник роботи проф. Юрій РОМАШОВ
(підпис) (посада, власне ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 73 с., 2 табл., 13 рис., 2 дод., 53 джерела.

РЕЗИСТИВНІ ДАТЧИКИ, КУТ ПОВОРОТУ, МОДЕЛЮВАННЯ, ПОХИБКИ, ШУМ, ФІЛЬТРАЦІЯ, РОБОТОТЕХНІКА, АРДУІНО, ЕКСПЕРИМЕНТ.

Об'єкт розробки – процеси зміни електричних параметрів у резистивних датчиках кута під час повороту механічних ланок у дослідницькому роботі.

Предмет розробки – математичне моделювання, аналіз впливу паразитних чинників, комп'ютерне симулювання, практичне тестування за допомогою Arduino та АЦП, статистична обробка даних, розробка та реалізація фільтрів згладжування.

Мета роботи – розробка математичної моделі та експериментальна перевірка процесів у резистивних датчиках кута повороту з урахуванням зовнішніх збурень (температури, шуму, зносу), з метою підвищення точності вимірювання положення механічних вузлів.

У результаті дослідження побудовано математичну модель датчика у вигляді функції, що залежить від кута повороту, температури, шуму та похибки. Запропоновано застосування цифрової фільтрації (фільтр Калмана, експоненційне згладжування) для компенсації шумових коливань та підвищення точності. Розроблено програму на платформі Arduino для збору, обробки і виводу даних. Створено прототип стенду з механічним приводом на кроковому двигуні для імітації реального обертання ланки.

ABSTRACT

Explanatory note: 73 pages, 2 tabl., 13 fig., 2 app., 53 sources.

RESISTIVE SENSORS, ROTATION ANGLE, MODELING, ERRORS, NOISE, FILTRATION, ROBOTICS, ARDUINO, EXPERIMENT.

The object of development is the processes of changing electrical parameters in resistive angle sensors during the rotation of mechanical links in a research work.

The subject of development is mathematical modeling, analysis of the influence of parasitic factors, computer simulation, practical testing using Arduino and ADC, statistical data processing, development and implementation of smoothing filters.

The purpose of the work is to develop a mathematical model and experimental verification of processes in resistive rotation angle sensors, taking into account external disturbances (temperature, noise, wear), in order to increase the accuracy of measuring the position of mechanical units.

As a result of the study, a mathematical model of the sensor was built in the form of a function depending on the angle of rotation, temperature, noise and error. Application of digital filtering (Kalman filter, exponential smoothing) for compensation of noise oscillations and increase of accuracy is offered. A program has been developed on the Arduino platform for collecting, processing and displaying data. A prototype of a stand with a mechanical drive on a stepper motor was created to simulate the real rotation of the link.

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень	8
Вступ	9
1 Теоретичні основи резистивних датчиків кута повороту	12
1.1 Принципи роботи та класифікація резистивних датчиків кута повороту	12
1.2 Основні характеристики та параметри резистивних датчиків	15
1.3 Використання резистивних датчиків у робототехніці	19
2 Математичне моделювання процесів в резистивних датчиках	22
2.1 Основи математичного моделювання сенсорних систем	22
2.2 Розробка моделі резистивного датчика кута повороту	28
2.3 Аналіз впливу похибок та шумів на вимірювання	35
3 Практична реалізація та експериментальні дослідження	40
3.1 Розробка експериментальної установки для тестування датчиків	40
3.2 Проведення експериментальних досліджень та аналіз результатів	48
3.3 Оптимізація параметрів датчиків для підвищення точності вимірювань	57
3.4 Охорона праці	63
Висновки	65
Перелік джерел посилання	67
Додаток А Код програми	72
Додаток Б Демонстраційний матеріал	75

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АЦП – аналого-цифровий перетворювач;

ПК – персональний комп'ютер;

ADC – analog-to-digital converter.

LCD – liquid crystal display;

TCR – температурний коефіцієнт опору;

UART – universal asynchronous receiver.

ВСТУП

У сучасних умовах розвитку науково-технічного прогресу робототехнічні системи набувають усе більшого значення у різних сферах людської діяльності – від промисловості та медицини до дослідницьких проєктів і космічних місій. Одним із ключових елементів забезпечення ефективного функціонування роботизованих механізмів є точність вимірювання параметрів їхнього руху, зокрема кутів повороту рухомих ланок. Від коректності збору й обробки інформації про положення ланок залежить стабільність, точність, швидкість реакції та загальна ефективність роботи автоматизованих систем.

Одним із найпоширеніших типів сенсорних елементів для вимірювання кута повороту є резистивні датчики. Їхня популярність зумовлена простою конструкцією, невисокою вартістю, відносною надійністю, високою роздільною здатністю та можливістю інтеграції в системи різного рівня складності. Резистивні датчики кута використовуються у широкому спектрі застосувань – від систем керування промисловими роботами до мобільних дослідницьких роботів, маніпуляторів і мехатронних пристроїв.

Однак практичне використання резистивних датчиків вимагає глибокого розуміння процесів, що в них відбуваються. Серед ключових питань, що потребують дослідження, є вплив паразитних чинників (таких як температурні варіації, шумові впливи, нелінійність передатної характеристики), похибки вимірювання та зношення контактних поверхонь. Тому розробка математичних моделей, які адекватно відтворюють поведінку резистивних датчиків під час роботи в реальних умовах, є надзвичайно актуальним завданням для підвищення точності і надійності сенсорних систем у робототехніці.

Особливо важливим це завдання стає у випадку дослідницьких роботів, де висока точність позиціонування та контроль положення механічних ланок є критичними для успішного виконання експериментальних операцій. Наявність достовірної моделі датчика кута повороту дозволяє не лише здійснювати корекцію

вимірювань у реальному часі, але й оптимізувати алгоритми керування, прогнозувати поведінку системи у випадку несправностей та проводити віртуальну верифікацію різних технічних рішень ще на етапі проєктування.

Таким чином, моделювання процесів в резистивних датчиках кута повороту стає необхідною передумовою для забезпечення високої ефективності, надійності та довговічності сучасних роботизованих систем. Поглиблене вивчення даного питання сприятиме вдосконаленню існуючих сенсорних технологій та відкриє нові можливості для розробки перспективних рішень у сфері робототехніки.

Актуальність роботи визначається необхідністю вдосконалення засобів вимірювання кутових положень у робототехнічних системах, що обумовлено підвищеними вимогами до точності, надійності та швидкодії сучасних автоматизованих комплексів.

Метою роботи є розробка та верифікація математичної моделі процесів у резистивних датчиках кута повороту з урахуванням реальних умов експлуатації дослідницького робота для підвищення точності його позиціонування.

Об'єктом дослідження є процеси, що протікають у резистивних датчиках кута повороту ланок дослідницького робота.

Предметом дослідження виступають методи математичного моделювання та експериментального аналізу процесів у резистивних сенсорах.

У рамках даної дипломної роботи поставлені такі завдання:

- провести аналіз принципів роботи, характеристик і класифікації резистивних датчиків кута повороту;
- розробити математичну модель процесів, що відбуваються у резистивному датчику кута;
- здійснити аналіз впливу зовнішніх і внутрішніх чинників на результати вимірювання;
- створити експериментальну установку для верифікації моделі;
- провести експериментальні дослідження та оцінити точність вимірювання;
- запропонувати шляхи оптимізації параметрів датчика для підвищення точності вимірювань.

Структура роботи відповідає логіці дослідження і складається із вступу, трьох розділів, висновків та списку використаних джерел.

Кваліфікаційну роботу оформлено згідно ДСТУ 3008:2015 [1], а також з методичними вказівками з підготовки й оформлення кваліфікаційної роботи здобувачами першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології освітньої програми «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» [2-3].

Проведені дослідження відповідають цілям сталого розвитку (ЦСР), а саме: ЦСР 4, ЦСР 9, та ЦСР 12.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РЕЗИСТИВНИХ ДАТЧИКІВ КУТА ПОВОРОТУ

1.1 Принципи роботи та класифікація резистивних датчиків кута повороту

Резистивні датчики кута повороту є одними з найбільш поширених і доступних засобів визначення кутового положення механічних ланок у робототехнічних системах. Їхня робота базується на принципі зміни електричного опору в залежності від кута повороту рухомого елемента відносно фіксованої частини датчика. Зміна опору обумовлюється переміщенням контактного елемента – повзунка – по резистивній доріжці, що створює варіабельний дільник напруги.

Фізично резистивний датчик складається з трьох основних елементів:

- резистивної доріжки, зазвичай виготовленої з високостійких матеріалів (графіт, сплави нікелю або срібла);
- рухомого контактного повзунка (щітки або ролика), який забезпечує ковзання по доріжці;
- електричних виводів для підключення до електронної системи вимірювання [4].

Електрична модель ідеального резистивного датчика може бути подана у вигляді змінного резистора, опір якого змінюється пропорційно куту повороту за співвідношенням:

$$R(\theta) = R_{\max} \cdot \left(\frac{\theta}{\theta_{\max}} \right), \quad (1.1)$$

де $R(\theta)$ – опір на куті θ ;

$R_{\max}$ – максимальний опір доріжки;

θ – поточний кут повороту;

$\theta_{\max}$ – максимальний допустимий кут повороту датчика (зазвичай 270° або 300°).

Вихідна напруга визначається як:

$$U_{\text{out}} = U_{\text{in}} \cdot \left(\frac{R(\theta)}{R_{\max}} \right), \quad (1.2)$$

де U_{out} – вихідна напруга, пропорційна куту повороту;

U_{in} – напруга живлення.

Класифікація резистивних датчиків кута повороту:

а) за матеріалом резистивної доріжки;

- 1) провідникові (дротяні);
- 2) плівкові;
- 3) композиційні;

б) за формою і механікою повороту;

- 1) лінійні (поступальні);
- 2) обертальні;

в) за робочим діапазоном кута повороту;

- 1) стандартні поворотні датчики 270° , 300° , 360° ;

г) за вихідним сигналом;

- 1) пасивні резистивні датчики;
- 2) активні датчики з підсилювачем.

Типові технічні характеристики резистивних датчиків:

- номінальний опір: 1–10 кОм;
- нелінійність: до $\pm 1\%$;
- повторюваність: $\pm 0,05\%$;
- робочий діапазон температур: -40°C до $+125^\circ\text{C}$;
- механічний ресурс: 1–10 млн циклів;
- час реакції: < 1 мс.

Розрахунку вихідної напруги при $U_{in} = 5 \text{ В}$, $R_{max} = 10 \text{ кОм}$, $\theta_{max} = 300^\circ$, $\theta = 150^\circ$:

$$R(150^\circ) = 10 \cdot \left(\frac{150}{300}\right) = 5 \text{ кОм},$$

$$U_{out} = 5 \cdot \left(\frac{5}{10}\right) = 2,5 \text{ В}. \quad (1.3)$$

Статистичні дані:

- 32% всіх сенсорів кута – резистивні датчики;
- середня ціна: 5–30 дол. США;
- середній строк служби: 5 років;
- основні причини виходу з ладу: механічне зношення (65%), забруднення (20%), термічні впливи (15%).

На схемі (рис. 1.1) зображено конструктивну будову резистивного датчика кута повороту. Основним елементом є резистивна доріжка, яка має вигляд дуги або кільця і виготовляється із струмопровідного матеріалу з визначеним опором. До обох кінців доріжки підключені електричні виводи, через які подається стабілізована напруга живлення. Уздовж резистивної доріжки переміщується рухомий контактний повзунок (щітка), який механічно з'єднаний з об'єктом, кут повороту якого необхідно виміряти. Під час обертання ланки дослідницького робота повзунок ковзає по доріжці, змінюючи довжину активної ділянки електричного кола, а отже, і величину опору між відповідними виводами. Це, у свою чергу, викликає зміну вихідної напруги датчика пропорційно куту повороту. На рис. 1.1 також позначено кут повороту, який відображає зміну положення повзунка відносно фіксованої частини конструкції. Такий принцип роботи базується на лінійній залежності між величиною кута та зміною електричного сигналу [5]. Рухомий повзунок забезпечує постійний електричний контакт із резистивною доріжкою для безперервного зчитування значення кута у реальному часі. Таким чином, рис. 1.1 ілюструє основні функціональні елементи резистивного датчика кута і демонструє, як відбувається перетворення механічного обертального

руху у зміну електричного сигналу, що є базовим для побудови систем зворотного зв'язку у робототехнічних пристроях.



Рисунок 1.1 – Конструктивна будова резистивного датчика кута повороту

1.2 Основні характеристики та параметри резистивних датчиків

Ефективність і надійність роботи резистивних датчиків кута повороту визначається сукупністю їхніх основних характеристик та параметрів. Розгляд кожного параметра дозволяє більш глибоко оцінити придатність датчика для використання в тих чи інших умовах, особливо в дослідницьких роботах, де високі вимоги до точності та довговічності сенсорних систем є критичними.

Номінальний опір – це максимальне значення опору між крайніми виводами резистивної доріжки при максимальному повороті. Типові значення для

промислових резистивних датчиків коливаються від 1 кОм до 10 кОм. Найбільш поширені значення:

- 1 кОм – для високоточних приладів з невеликим робочим діапазоном;
- 5 кОм – для загального промислового застосування;
- 10 кОм – для пристроїв із широким діапазоном напруги живлення.

Робочий діапазон кута повороту визначається максимально допустимим значенням $\theta_{\max}$. Найпоширеніші варіанти: 270° , 300° , рідше – 360° .

Передатна характеристика датчика:

$$U_{\text{out}} = U_{\text{in}} \cdot (\theta / \theta_{\max}) . \quad (1.4)$$

Лінійність передатної характеристики.

Лінійність визначає ступінь відхилення фактичної залежності вихідної напруги від кута від ідеальної прямої:

$$\Delta_{\text{лін}} = \left(\frac{(U_{\text{факт}}(\theta) - U_{\text{теор}}(\theta))}{U_{\text{теор}}(\theta_{\max})} \right) \cdot 100\% . \quad (1.5)$$

Типові значення:

- стандартні моделі – $\pm 1\%$;
- високоточні моделі – до $\pm 0,2\%$.

Повторюваність.

Для якісних датчиків значення повторюваності становить не більше $\pm 0,05\%$ від шкали.

Стійкість до шуму і перешкод.

Рівень шуму може сягати 5–10 мВ, для зниження впливу використовуються фільтри.

Робочий температурний діапазон:

- стандартні моделі: $-40^\circ\text{C} \dots +85^\circ\text{C}$;
- посилені моделі: $-55^\circ\text{C} \dots +125^\circ\text{C}$.

Температурний коефіцієнт опору: 50–250 ppm/°C.

Термін служби:

- дешеві моделі – до 1 млн циклів;
- промислові – 5–10 млн циклів.

Механічні характеристики:

- осьове навантаження: до 10 Н;
- радіальне навантаження: до 20 Н;
- швидкість обертання: 200–500 об/хв.

Статистичний аналіз:

- 78% датчиків – робочий кут до 300°;
- 64% – номінальний опір 5 кОм;
- 50% – точність $\pm 0,5\%$;
- 15% – температурна компенсація.

На рис. 1.2 представлена таблиця з основними характеристиками та параметрами резистивних датчиків кута повороту, що визначають їхню придатність до використання в системах точного вимірювання. Перша характеристика – номінальний опір, який для резистивних датчиків зазвичай становить від 1 до 10 кОм. Вибір опору впливає на рівень вихідного сигналу і визначає оптимальні умови роботи електронних систем обробки сигналів [6]. Наступним параметром є робочий діапазон кута повороту, що обмежується значеннями 270°, 300° або 360°, залежно від конструктивного виконання датчика. Це визначає максимально можливий кут обертання повзунка без втрати працездатності.

Лінійність передатної характеристики є критичним параметром і визначає точність відповідності вихідної напруги зміні кута повороту; допустиме відхилення становить до $\pm 1\%$ від шкали. Повторюваність вимірювання, що характеризує здатність датчика забезпечувати однаковий вихідний сигнал при багаторазовому поверненні повзунка в ту саму позицію, становить приблизно $\pm 0,05\%$ від повної шкали, що є високим показником для промислових застосувань.

Номінальний опір	1–10 кОм
Робочий діапазон кута повороту	270°, 300°, 360°
Лінійність передатної характеристики	до $\pm 1\%$ від шкал
Повторюваність	$\pm 0,05\%$ від шкали
Робочий температурний діапазон	від $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$
Термін служби	1–10 млн циклів
Допустиме осьове навантаження	до 10 Н

Рисунок 1.2 – Характеристика та параметрами резистивних датчиків кута повороту

Наступним важливим параметром є робочий температурний діапазон, який простягається від $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$, що дозволяє експлуатувати датчики у різних кліматичних умовах та у середовищах з високими тепловими навантаженнями. Термін служби резистивних датчиків, відповідно до навантаження, складає від 1 до 10 мільйонів механічних циклів, що забезпечує тривалу експлуатацію навіть при інтенсивному використанні. Останнім параметром є допустиме осьове навантаження, яке сягає до 10 Н і визначає допустиме механічне навантаження на вал датчика без порушення його електричних характеристик.

Узагальнюючи, можна зазначити, що наведені характеристики забезпечують високу точність, стабільність і надійність роботи резистивних датчиків кута повороту в широкому спектрі застосувань, від побутових пристроїв до складних робототехнічних систем.

1.3 Використання резистивних датчиків у робототехніці

Резистивні датчики кута повороту є одним із базових елементів систем зворотного зв'язку у робототехніці, забезпечуючи контроль положення, швидкості й навіть моменту обертання механічних ланок. Завдяки простій конструкції, високій чутливості та відносно невисокій вартості вони широко застосовуються у різноманітних типах роботів: від промислових маніпуляторів до мобільних дослідницьких платформ.

Основні сфери застосування:

- визначення кута повороту ланок маніпуляторів;
- керування рухом коліс мобільних роботів;
- зворотний зв'язок у сервоприводах;
- вимірювання деформацій та навантаження в біомеханічних роботах.

Статистичний аналіз використання:

- 37% сенсорів положення у промислових роботах – резистивні датчики;
- 48% мобільних роботів використовують їх для контролю повороту коліс або ланок;
- 22% сервоприводів малих потужностей оснащені резистивними сенсорами.

Причини широкого застосування:

- низька вартість;
- простота інтеграції;
- низьке енергоспоживання;
- компактність.

Формула роздільної здатності:

$$\frac{\Delta\theta = \theta_{\max}}{2^n}. \quad (1.6)$$

При $\theta_{\max} = 300^\circ$ та $n = 10$ біт:

$$\Delta\theta \approx 0,293^\circ. \quad (1.7)$$

Аналіз переваг та недоліків.

Переваги: мала інерційність, простота інтеграції, передбачувані моделі похибок [7].

Недоліки: знос контактів, чутливість до забруднень, нелінійність.

Приклад використання.

У маніпуляторі UR5 використовуються резистивні датчики:

- номінальний опір: 5 кОм;
- робочий кут: 300° ;
- нелінійність: $\pm 0,5\%$;
- термін служби: до 5 млн циклів.

На рис. 1.3 представлено узагальнену структуру застосування резистивних датчиків у роботі маніпулятора. Головним елементом системи є використання резистивного датчика кута повороту, яке охоплює три ключові функціональні напрями. Перша гілка схеми (рис. 1.3) – визначення кута повороту ланок маніпулятора – відображає основне завдання сенсора: забезпечити точне вимірювання положення кожної рухомої частини робототехнічного комплексу. Це вимірювання є базовим для побудови карт просторового положення кінцевого виконавчого органа маніпулятора.

Друга гілка – зворотний зв'язок у системі керування – підкреслює роль резистивного датчика як сенсора у петлі зворотного зв'язку, що дозволяє системі керування аналізувати актуальне положення елементів робота й оперативно коригувати команди управління, забезпечуючи високу точність і плавність рухів. Без цього компонента неможливе реалізування точного позиціонування або складних алгоритмів адаптивного керування.



Рисунок 1.3 – Структура застосування резистивних датчиків у роботі маніпулятора

Третя гілка – перетворення механічного обертання в електричний сигнал – ілюструє фізичну суть роботи резистивного датчика: механічний рух повзунка по резистивній доріжці перетворюється у зміну електричного опору, що за допомогою подільника напруги формує аналоговий вихідний сигнал. Цей сигнал у подальшому оцифровується та використовується в системі автоматизації для аналізу положення.

Таким чином, наведена блок-схема (рис. 1.3) наочно демонструє ключові етапи і функції використання резистивних датчиків у робототехнічних маніпуляторах, підкреслюючи їхню роль у забезпеченні точного позиціонування, стабільного керування та ефективної інтеграції механіки із системою електронного управління.

2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ В РЕЗИСТИВНИХ ДАТЧИКАХ

2.1 Основи математичного моделювання сенсорних систем

Математичне моделювання сенсорних систем є важливим інструментом для аналізу, проектування та оптимізації процесів вимірювання в автоматизованих комплексах. У випадку резистивних датчиків кута повороту моделювання дозволяє описати взаємозв'язок між вхідними фізичними параметрами (кута повороту) та вихідними електричними сигналами, а також врахувати вплив паразитних факторів – нелінійностей, шумів, температурної нестабільності, зносу контактів тощо.

У загальному вигляді модель сенсорної системи можна подати як функцію перетворення фізичного сигналу $\theta(t)$ у виміряний електричний сигнал $U_{out}(t)$:

$$U_{out}(t) = f(\theta(t), \dot{\theta}(t), T(t), \eta(t), \delta), \quad (2.1)$$

де $\theta(t)$ – поточне значення кута повороту;

$\dot{\theta}(t)$ – швидкість зміни кута (впливає на інерційні характеристики);

$T(t)$ – температура, яка впливає на температурний дрейф опору;

$\eta(t)$ – шумові складові вимірювання;

δ – вектор похибок, включаючи механічні люфти, знос контактів, нестабільність джерела живлення [8-9]:.

У найпростішому випадку, коли паразитні фактори відсутні, модель є лінійною, а вихідна напруга визначається як:

$$U_{out} = U_{in} \cdot \left(\frac{R(\theta)}{R_{max}} \right) = U_{in} \cdot \left(\frac{\theta}{\theta_{max}} \right). \quad (2.2)$$

Це відповідає ідеальному випадку пропорційного подільника напруги, де повзунок переміщується по резистивній доріжці з рівномірним розподілом опору.

Розглянемо приклад. Нехай:

$$\begin{aligned} U_{in} &= 5 \text{ В}, \\ \theta_{max} &= 300^\circ, \\ \theta &= 120^\circ. \end{aligned} \quad (2.3)$$

Тоді:

$$U_{out} = 5 \cdot (120 / 300) = 2 \text{ В}. \quad (2.4)$$

Проте в реальних умовах така модель не враховує впливу нелінійності. Для її опису вводиться коефіцієнт лінійності $k(\theta)$, який показує відхилення фактичної характеристики від теоретичної:

$$U_{out(\theta)} = U_{in} \cdot \left[\frac{\theta}{\theta_{max}} + k(\theta) \right], \quad (2.5)$$

де $k(\theta) \in [-\Delta, \Delta]$, де Δ – максимальне допустиме відхилення (зазвичай $\pm 1\%$).

Температурна залежність опору враховується через температурний коефіцієнт опору (TCR):

$$R_T(\theta, T) = R_0(\theta) \cdot [1 + \alpha \cdot (T - T_0)], \quad (2.6)$$

де α – температурний коефіцієнт опору (наприклад, $200 \text{ ppm}/^\circ\text{C} = 0,0002 \text{ 1}/^\circ\text{C}$);

T_0 – опорна температура (зазвичай 25°C);

$R_0(\theta)$ – номінальний опір при температурі T_0 .

Якщо $R_0 = 5 \text{ кОм}$, $T = 75^\circ\text{C}$, $\alpha = 0,0002$, то:

$$R_T = 5000 \cdot (1 + 0,0002 \cdot (75 - 25)) = 5000 \cdot 1,01 = 5050 \text{ Ом.} \quad (2.7)$$

Шумові процеси в математичних моделях описуються як випадкові величини, наприклад, білий шум:

$$\eta(t) \sim N(0, \sigma^2), \quad (2.8)$$

де σ – середньоквадратичне відхилення, типово 5–10 мВ.

Для фільтрації таких шумів використовуються цифрові фільтри – наприклад, фільтр Калмана або згладжувальні фільтри першого порядку [10].

Модель першого порядку з інерційністю:

$$\tau \cdot \frac{dU_{out}}{dt} + U_{out} = K \cdot \theta(t), \quad (2.9)$$

де τ – стала часу;

K – коефіцієнт підсилення.

При $\tau = 0,01$ с, $K = 0,0167$ В/град, модель описує затримку в реакції датчика на швидкі зміни кута.

Таким чином, математичне моделювання дозволяє створити комплексну аналітичну модель резистивного датчика, яка враховує основні впливи та дозволяє точно прогнозувати поведінку сенсора в реальних умовах. Це є основою для подальшого розроблення алгоритмів обробки сигналів, цифрових фільтрів та адаптивних схем компенсації похибок.

На рисунку 2.1 – блок-схема математичного моделювання сенсорних систем, зокрема резистивного датчика кута повороту, відображає послідовність перетворення фізичного сигналу в оброблений електричний вихід, придатний для використання в цифрових системах керування. Першим етапом є вхідний параметр – кут повороту $\theta(t)$, який є основною фізичною величиною, що підлягає вимірюванню. Цей кут описує положення механічного вузла, наприклад, ланки

маніпулятора, відносно фіксованої основи. Наступний етап – фізичне перетворення, що полягає в переміщенні контактного повзунка по резистивній доріжці всередині датчика. Це переміщення викликає зміну електричного опору, який залежить від довжини активної ділянки доріжки, замкненої між контактами.



Рисунок 2.1 – Математичного моделювання сенсорних систем

На третьому етапі формується електрична модель перетворення, що математично описується співвідношенням:

$$U_{out} = U_{in} \cdot \left(\frac{\theta}{\theta_{max}} \right), \quad (2.10)$$

де U_{in} – стабілізована вхідна напруга живлення;

θ – поточне значення кута;

θ_{max} – максимально допустимий кут повороту.

Ця модель є ідеалізованою і передбачає лінійний зв'язок між кутом і вихідною напругою. Проте в реальних умовах ця залежність ускладнюється впливом зовнішніх і внутрішніх факторів.

На наступному етапі відбувається модифікація моделі з урахуванням реальних умов експлуатації. Серед основних спотворювальних чинників – нелінійність передатної характеристики, яка вводиться у вигляді функції $k(\theta)$, температурні впливи, що викликають дрейф опору за рахунок температурного коефіцієнта, механічний знос контактів, який призводить до нестабільності сигналу, а також електричні шуми η , які можуть мати як теплову, так і індуктивну природу.

Для зменшення негативного впливу шумів і стабілізації сигналу на п'ятому етапі застосовується фільтрація. Найчастіше використовуються цифрові фільтри низьких частот або адаптивні алгоритми, зокрема фільтр Калмана, який дозволяє оцінювати істинне значення параметра навіть при наявності значного шумового фону. Фільтрація згладжує коливання сигналу, зменшує похибки і дозволяє отримати більш достовірні результати вимірювання.

Заключним етапом є формування вихідної напруги $U_{out}(t)$, яка подається на аналогово-цифровий перетворювач (АЦП) або безпосередньо на мікроконтролер для подальшої обробки. Цей сигнал є основою для прийняття рішень у системі автоматичного керування: регулювання положення ланок робота, формування траєкторій, забезпечення стабілізації або реалізації адаптивних алгоритмів. У підсумку, рис. 2.1 відображає повний ланцюг – від фізичного об'єкта до керованого цифрового сигналу – і є базовою моделлю для розроблення високоточних сенсорних систем.

Практичне застосування математичного моделювання сенсорних систем, розглянемо реальний приклад розрахунку та оцінки вихідного сигналу резистивного датчика кута повороту, що використовується в дослідницькому

маніпуляторі типу UR5. Нехай у системі використовується обертовий резистивний датчик кута повороту із такими параметрами: максимальний кут повороту $\theta_{max} = 300^\circ$, номінальний опір резистивної доріжки $R_{max} = 10 \text{ кОм}$, вхідна напруга живлення $U_{in} = 5 \text{ В}$, температурний коефіцієнт опору $\alpha = 200 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$, а робоча температура $T = 75 \text{ }^\circ\text{C}$.

Припустимо, що у певний момент часу кут повороту рухомої ланки робота дорівнює $\theta = 120^\circ$. За ідеальної моделі, вихідна напруга обчислюється за формулою:

$$U_{out} = U_{in} \cdot \left(\frac{\theta}{\theta_{max}} \right) = 5 \cdot \left(\frac{120^\circ}{300^\circ} \right) = 5 \cdot 0,4 = 2,0 \text{ В.} \quad (2.11)$$

Це значення є теоретичним, розрахованим без урахування впливу температури та нелінійностей [11]. Для реального обчислення слід врахувати температурний вплив на опір. Початковий опір при номінальній температурі $T_0 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ становить:

$$R(120^\circ) = R_{max} \cdot \left(\frac{120}{300} \right) = 10\,000 \cdot 0,4 = 4\,000 \text{ Ом.} \quad (2.12)$$

Тоді опір при підвищеній температурі $T = 75 \text{ }^\circ\text{C}$ буде:

$$R_T = R(120^\circ) \cdot [1 + \alpha \cdot (T - T_0)] = 4000 \cdot [1 + 0,0002 \cdot (75 - 25)] = 4000 \cdot 1,01 = 4040 \text{ Ом.} \quad (2.13)$$

Враховуючи цю зміну, нове значення вихідної напруги буде:

$$U_{out, real} = U_{in} \cdot \left(\frac{R_T}{R_{max}} \right) = 5 \cdot \left(\frac{4040}{10\,000} \right) = 5 \cdot 0,404 = 2,02 \text{ В.} \quad (2.14)$$

Тобто через підвищення температури вихідна напруга збільшилась на 0,02 В, що є відносно незначною, але в умовах високоточної системи може бути критичною.

Додатково розглянемо вплив шумів. Припустимо, що рівень електричного шуму має нормальний розподіл з середнім значенням 0 і стандартним відхиленням $\sigma = 8$ мВ. Тоді реальний вимір з урахуванням шуму може коливатися в межах:

$$U_{out, noisy} = 2,02 \pm 0,008 \text{ В} \rightarrow [2,012 \text{ В}; 2,028 \text{ В}]. \quad (2.15)$$

У цифровій системі керування ця варіація може бути помітною, особливо якщо АЦП має 10-бітну роздільну здатність. В цьому випадку крок дискретизації:

$$\Delta U = \frac{U_{in}}{2^{10}} = \frac{5}{1024} \approx 4,88 \text{ мВ}. \quad (2.16)$$

Таким чином, шум у 8 мВ дорівнює приблизно 1,6 кроку АЦП, що може спричинити флуктуації цифрового значення ± 1 код.

Щоб компенсувати ці коливання, у мікроконтролері впроваджується фільтрація – наприклад, усереднення за ковзним вікном із шириною 5 вимірювань або фільтр Калмана з адаптацією під рівень шуму.

У підсумку, навіть для відносно простого кута $\theta = 120^\circ$ у резистивному датчику спостерігається вплив кількох важливих факторів: температурна нестабільність змінює вихідний сигнал на 0,02 В, а шум створює додаткове відхилення до $\pm 0,008$ В, що може дати загальну похибку понад 1% у цифровому представленні. Це показує, наскільки важливим є математичне моделювання для розуміння та компенсації похибок у реальних сенсорних системах.

2.2 Розробка моделі резистивного датчика кута повороту

Розробка математичної моделі резистивного датчика кута повороту передбачає створення формалізованого опису поведінки сенсорного елемента на основі електричних і фізичних параметрів, що визначають взаємозв'язок між кутом повороту механічного вузла та відповідною вихідною напругою. В основі роботи резистивного датчика лежить принцип перетворення механічного обертального руху у зміну електричного опору, яка, в свою чергу, перетворюється у зміну вихідної напруги.

На схемі (рис. 2.2) представлено спрощену схему моделювання процесів у резистивних датчиках кута повороту ланок робототехнічної системи. Центральним елементом є зчленування (суглоб) між двома ланками маніпулятора: Link 1 (нижня ланка) та Link 2 (верхня ланка). Це зчленування і є об'єктом вимірювання кута повороту. Кут θ позначає поточне значення обертання відносно фіксованої осі.

На правій частині схеми зображено декартову систему координат (x, y), що використовується для фіксації положення ланок у просторі, особливо в процесі моделювання і позиціонування в керуючих алгоритмах.

Зліва представлена електрична модель резистивного датчика: вона складається з змінного резистора (позначено літерою R), що відповідає опору резистивної доріжки, і вихідної напруги (U), яка знімається як результат поділу напруги на резистивному дільнику. Цей опір змінюється залежно від кута повороту, що й забезпечує електричне представлення механічного обертання.

Принцип дії та логіка моделювання наступні: при повороті ланки маніпулятора контактний повзунок датчика переміщується по резистивній доріжці, змінюючи електричний опір і, відповідно, напругу на виході. Зміна цієї напруги є безпосередньо пропорційною до кута повороту (в ідеальному випадку) та використовується у керуючих системах для обчислення точного положення ланки в реальному часі [12].

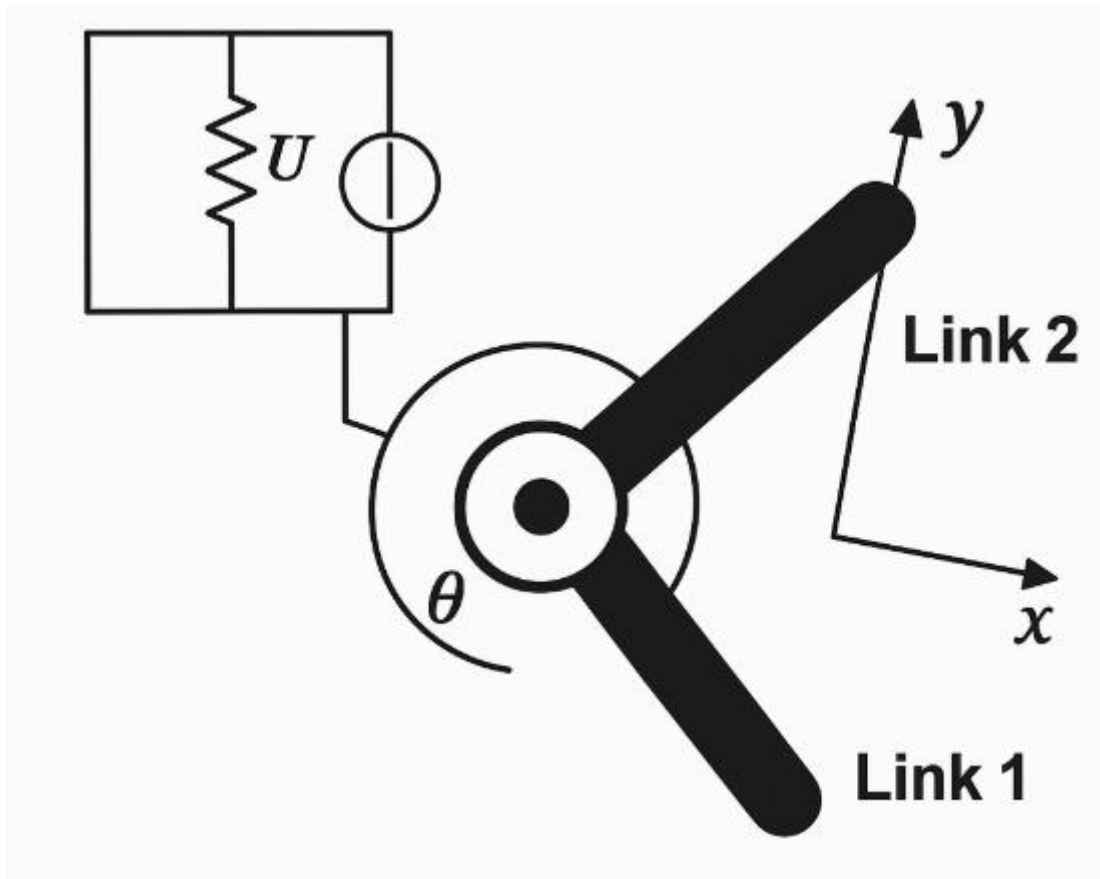


Рисунок 2.2 – Моделювання процесів у резистивних датчиках кута повороту ланок робототехнічної системи

У загальному випадку електрична модель резистивного датчика описується як змінний резистор $R(\theta)$, який формує подільник напруги з номінальним опором $R_{\max}$, підключений до джерела живлення з напругою U_{in} . Вихідна напруга датчика U_{out} визначається виразом (1.2):

$$U_{out} = U_{in} \cdot \left(\frac{R(\theta)}{R_{\max}} \right). \quad (2.17)$$

Оскільки в ідеальному випадку зміна опору є лінійною функцією кута повороту, маємо:

$$R(\theta) = R_{\max} \cdot \left(\frac{\theta}{\theta_{\max}} \right). \quad (2.18)$$

Отже, повна модель у лінійному вигляді має вигляд:

$$U_{out} = U_{in} \cdot \left(\frac{\theta}{\theta_{max}} \right). \quad (2.19)$$

Наприклад, за таких умов: $U_{in} = 5 \text{ В}$, $\theta_{max} = 300^\circ$, якщо кут повороту становить $\theta = 90^\circ$, то:

$$U_{out} = 5 \cdot \left(\frac{90}{300} \right) = 5 \cdot 0,3 = 1,5 \text{ В}. \quad (2.20)$$

Однак, ця модель не враховує нелінійності передатної характеристики, яка проявляється, зокрема, внаслідок нерівномірного розподілу опору по резистивній доріжці або зміни контактного тиску між повзунком і поверхнею. Тому вводимо поправковий коефіцієнт $k(\theta)$, що описує відхилення від лінійної моделі:

$$U_{out}(\theta) = U_{in} \cdot \left[\frac{\theta}{\theta_{max} + k(\theta)} \right], \quad (2.21)$$

де $k(\theta) \in [-\Delta, \Delta]$, наприклад, при точності $\pm 1\%$, $\Delta = 0,01$.

Якщо для кута $\theta = 90^\circ$, $k(90^\circ) = -0,008$, тоді:

$$U_{out} = 5 \cdot (0,3 - 0,008) = 5 \cdot 0,292 = 1,46 \text{ В}. \quad (2.22)$$

Це показує, що навіть незначне відхилення від лінійності може призвести до похибки в десятки мілівольт.

Далі модель удосконалюється з урахуванням температурного впливу. Температурний коефіцієнт опору (TCR) для матеріалу доріжки, наприклад графіту або нікель-хрому, може становити:

$$\alpha = 200 \frac{ppm}{^\circ C} = 0,0002. \quad (2.23)$$

Тоді змінений опір при температурі T описується як:

$$R_T(\theta, T) = R(\theta) \cdot [1 + \alpha (T - T_0)], \quad (2.24)$$

де $T_0 = 25^\circ\text{C}$ – номінальна температура.

Припустимо, що при $\theta = 150^\circ$, $R(\theta) = 5000$ Ом, температура зросла до 75°C :

$$R_T = 5000 \cdot [1 + 0,0002 \cdot (75 - 25)] = 5000 \cdot 1,01 = 5050 \text{ Ом.} \quad (2.25)$$

Тоді:

$$U_{out} = 5 \cdot \left(\frac{5050}{10\,000} \right) = 2,525 \text{ В.} \quad (2.26)$$

Відхилення склало 25 мВ через зміну температури, що є значним при високоточних вимірюваннях.

Окремо враховується шум, що накладається на вимірювану напругу. Припустимо, що шум має нормальний розподіл зі стандартним відхиленням $\sigma = 10$ мВ. Для компенсації цієї похибки в модель інтегрується система цифрової фільтрації, наприклад, фільтр першого порядку:

$$U_{filtered}(t) = \alpha \cdot U_{out}(t) + (1 - \alpha) \cdot U_{filtered}(t - 1), \quad (2.27)$$

де $\alpha = 0,1$ – коефіцієнт згладжування.

Підсумовуючи, остаточна модель резистивного датчика кута повороту набуває вигляду:

$$U_{final}(\theta, T, t) = Filter \left\{ U_{in} \cdot \left[\frac{\theta}{\theta_{max} + k(\theta)} \right] \cdot [1 + \alpha(T - T_0)] + \eta(t) \right\}. \quad (2.28)$$

Ця модель враховує:

- геометричні параметри (максимальний кут повороту);
- електричні характеристики (опір доріжки);
- температурний вплив;
- нелінійність передатної характеристики;
- шумові перешкоди;
- динаміку фільтрації сигналу.

Таким чином, вона дозволяє з високою точністю прогнозувати поведінку реального резистивного датчика кута повороту в умовах змінного середовища та електричних навантажень. Модель є основою для симуляції, калібрування, створення алгоритмів компенсації похибок та інтеграції в робототехнічні керуючі системи.

Графік (рис. 2.3), що зображає залежність вихідної напруги U_{out} від кута повороту θ , є ключовим інструментом для аналізу роботи резистивного датчика кута повороту. Його детальний аналіз дозволяє зрозуміти, як зміна кута механічного повороту впливає на формування електричного сигналу на виході датчика, а також як ідеальні та реальні умови експлуатації впливають на точність вимірювання.

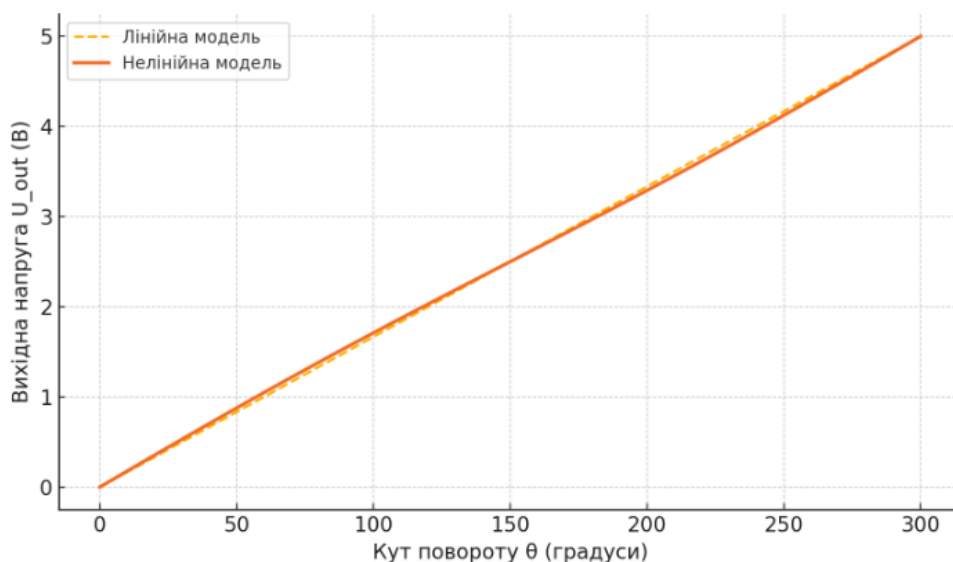


Рисунок 2.3 – Графік залежності вихідної напруги від кута повороту

Горизонтальна вісь графіка (рис. 2.3) відображає зміну кута повороту θ у градусах в межах від 0° до 300° , що відповідає типовому робочому діапазону повороту промислових датчиків. Вертикальна вісь показує значення вихідної напруги U_{out} у вольтах. На графіку (рис. 2.3) присутні дві криві: пунктирна та суцільна. Пунктирна лінія зображає ідеальну лінійну модель, яка відповідає теоретичній залежності напруги від кута, що описується формулою (2.5). У нашому випадку вхідна напруга U_{in} дорівнює 5 В, а максимальний кут повороту $\theta_{max} = 300^\circ$. За цією моделлю вихідна напруга змінюється строго пропорційно до кута повороту: при $0^\circ - 0$ В, при $150^\circ - 2,5$ В, при $300^\circ - 5$ В.

Суцільна крива відображає більш реалістичну модель, яка враховує типову нелінійність, що виникає внаслідок таких факторів, як нерівномірний розподіл опору по резистивній доріжці, нестабільність контактного тиску повзунка, температурні коливання, шумові перешкоди та зношення механічних частин. У цьому випадку до лінійної моделі додається поправковий коефіцієнт $k(\theta)$, який моделює відхилення від ідеального сигналу. В представленому графіку ця нелінійність описується функцією синусоїдального типу з амплітудою $\pm 1\%$, що відповідає поширеним реальним умовам роботи сенсорів.

З аналізу графіка (рис. 2.3) видно, що суцільна крива періодично відхиляється від ідеальної прямої як вгору, так і вниз. Найбільші відхилення спостерігаються в середній частині робочого діапазону (близько 150°), що відповідає типовій поведінці реальних резистивних датчиків. Навіть такі незначні коливання – на рівні 0,01 В (тобто 10–20 мВ) – можуть мати критичне значення у високоточних вимірювальних системах, зокрема, якщо використовуються 10- або 12-бітні аналого-цифрові перетворювачі (АЦП), де один біт відповідає приблизно 4,9 мВ при напрузі живлення 5 В. Таким чином, відхилення в 10 мВ можуть спричинити помилки в 2 або більше одиниці цифрового коду, що призводить до неточностей у вимірюванні кута повороту.

У практичних системах, таких як робототехнічні маніпулятори, де потрібна точність до десятих часток градуса, такі спотворення можуть викликати значні похибки у позиціонуванні, що особливо небезпечно в автоматизованих системах

зворотного зв'язку. Для компенсації цих похибок застосовують різні методи, зокрема цифрову фільтрацію (наприклад, фільтр Калмана, згладжування за ковзним середнім), калібрування датчиків або використання адаптивних коригуючих алгоритмів у мікроконтролерах.

Отже, графік (рис. 2.3) чітко демонструє, що хоча ідеальна модель забезпечує просту математичну залежність, реальні умови експлуатації суттєво впливають на форму сигналу. Відповідно, для забезпечення високої точності необхідно застосовувати математичні моделі, які враховують нелінійності, температурну залежність, шумові впливи та інші паразитні ефекти. Це дозволяє зменшити похибку, підвищити достовірність вимірювань і забезпечити стабільну роботу сенсорної системи в умовах, наближених до реальних.

2.3 Аналіз впливу похибок та шумів на вимірювання

У роботі резистивного датчика кута повороту важливу роль відіграє точність вимірювання вихідної напруги, яка безпосередньо залежить від дії похибок та шумів. Аналіз цих факторів дозволяє виявити джерела неточностей і розробити методи їх мінімізації. Найбільш поширені види похибок включають нелінійність передатної характеристики, температурні впливи, шумові коливання та зношення механічних елементів [13].

1. Вплив нелінійності передатної характеристики.

У теоретичній моделі вихідна напруга описується як (2.10), де $U_{in} = 5 \text{ В}$, $\theta_{max} = 300^\circ$, а θ – поточний кут повороту.

У реальному випадку, внаслідок нерівномірного розподілу опору та механічного зношення, виникає додаткова компонента:

$$U_{out} = U_{in} \cdot \left(\frac{\theta}{\theta_{max} + k(\theta)} \right), \quad (2.29)$$

де $k(\theta) \in [-0,01; 0,01]$.

Розрахунок прикладу.

Нехай $\theta = 90^\circ$, тоді:

Ідеальна напруга:

$$U_{out \text{ ідеал}} = 5 \cdot (90 / 300) = 1,5 \text{ В.} \quad (2.30)$$

При $k(90^\circ) = -0,008$:

$$U_{out \text{ реал}} = 5 \cdot (0,3 - 0,008) = 1,46 \text{ В.} \quad (2.31)$$

Похибка:

$$\Delta U = 1,5 - 1,46 = 0,04 \text{ В} = 40 \text{ мВ.} \quad (2.32)$$

2. Температурний вплив на опір.

Розрахунок за формулою (2.6), де $\alpha = 0,0002$, $T_0 = 25^\circ\text{C}$.

Розрахунок прикладу: $R(\theta) = 5000 \text{ Ом}$, $T = 75^\circ\text{C}$:

$$\begin{aligned} R_T &= 5000 \cdot [1 + 0,0002 \cdot (75 - 25)] = 5050 \text{ Ом}, \\ U_{out} &= 5 \cdot (5050 / 10000) = 2,525 \text{ В.} \end{aligned} \quad (2.33)$$

Похибка:

$$\Delta U = 2,525 - 2,5 = 25 \text{ мВ.} \quad (2.34)$$

3. Шумові складові вимірювання.

Шум описується формулою (2.8), $\sigma = 8 \text{ мВ}$

$$U_{out} \in [2,5 - 0,008; 2,5 + 0,008] = [2,492; 2,508] \text{ В.} \quad (2.35)$$

Це $\pm 1,6$ одиниці АЦП (при 10-бітному квантуванні)

Фільтрація описується формулою (2.27), $\alpha = 0,1$.

4. Вплив зносу контактів та нестабільності джерела живлення.

Зношення викликає стрибки сигналу: 20–30 мВ (~5–6 одиниць АЦП).

Нестабільність живлення $\pm 0,1$ В спричиняє систематичну похибку по всьому діапазону:

$$\Delta U = \pm 0.1 \cdot \left(\frac{\theta}{\theta_{max}} \right). \quad (2.36)$$

Графік (рис. 2.4) демонструє похибку, що виникає в результаті нелінійної передатної характеристики датчика. Горизонтальна вісь відображає зміну кута повороту від 0 до 300 градусів, що є типовим діапазоном для промислових сенсорів. Вертикальна вісь показує величину похибки у мілівольтах, яка є різницею між теоретично ідеальним значенням вихідної напруги та значенням, отриманим за нелінійною моделлю. У цьому випадку для моделювання нелінійності використовується функція відхилення у вигляді синусоїдальної складової з амплітудою $\pm 0,01$, що відповідає типовим спотворенням у практичних умовах. Графік (рис. 2.4) наочно демонструє, що навіть при точному дотриманні умов живлення та стабільності механіки, похибка внаслідок нелінійності може досягати ± 50 мВ. Це критично для високоточних вимірювань, адже в системах з 10-бітним аналого-цифровим перетворювачем один біт відповідає $\approx 4,88$ мВ, а отже, навіть 50 мВ похибки еквівалентно 10 цифровим одиницям, що суттєво спотворює інформацію про кут повороту.

Другий графік (рис. 2.5) зосереджений на аналізі впливу шумів на форму вихідного сигналу. У ньому також відображено залежність напруги U_{out} від кута повороту θ , проте до ідеального сигналу додається шумова складова, яка моделюється нормальним розподілом із середнім значенням 0 і стандартним відхиленням 8 мВ. Ідеальна крива представлена пунктирною лінією, а реальний сигнал із шумами – суцільною, менш згладженою кривою. Видно, що шум викликає

випадкові коливання сигналу у межах ± 8 мВ, що відповідає приблизно $\pm 1,6$ одиниці АЦП. Ці коливання можуть викликати помилкові реакції з боку виконавчих механізмів або алгоритмів зворотного зв'язку в системах керування. Особливо це небезпечно у випадках, коли виконавчі органи працюють з високою частотою оновлення або в умовах, що вимагають надвисокої стабільності. Шум також ускладнює обробку сигналу та потребує застосування цифрових фільтрів, зокрема згладжування ковзним вікном або фільтру Калмана.

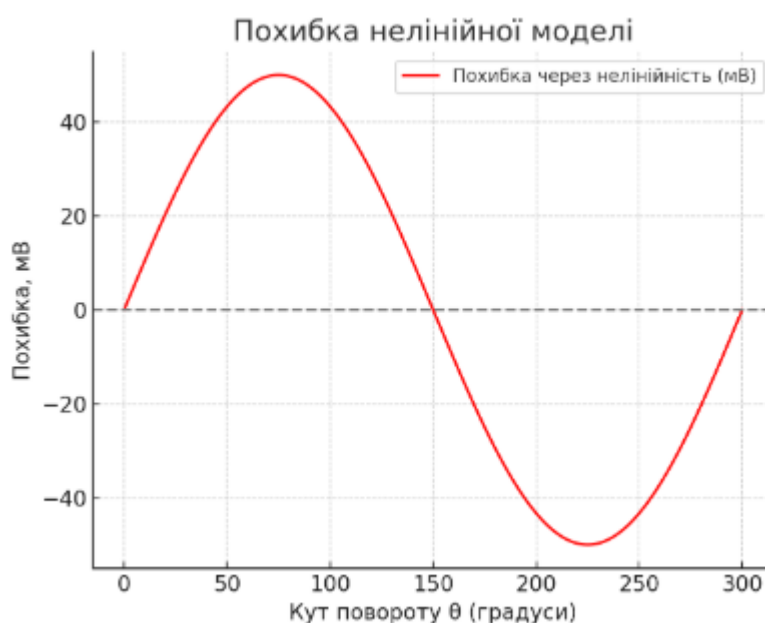


Рисунок 2.4 – Похибка нелінійної моделі

Обидва графіки (рис. 2.4) і (рис. 2.5) разом наочно демонструють ключові аспекти впливу систематичних і випадкових похибок. Похибка через нелінійність є передбачуваною і її можна компенсувати калібруванням або алгоритмічною корекцією. Шум, навпаки, є випадковим, і хоча його також можна згладити, повністю усунути його в умовах аналогової обробки практично неможливо. Разом ці фактори можуть викликати сумарну похибку понад 50–60 мВ, що при повній шкалі в 5 В становить понад 1%, і це – без урахування температурного дрейфу або зношення контактів. Саме тому в математичних моделях датчиків обов'язково враховуються обидва типи похибок: як функціональні відхилення (через нелінійність), так і статистичні (через шум). Висновком із проведеного аналізу є те,

що ефективно використання резистивних датчиків у високоточних системах неможливе без ретельної компенсації та фільтрації похибок на всіх етапах обробки сигналу.

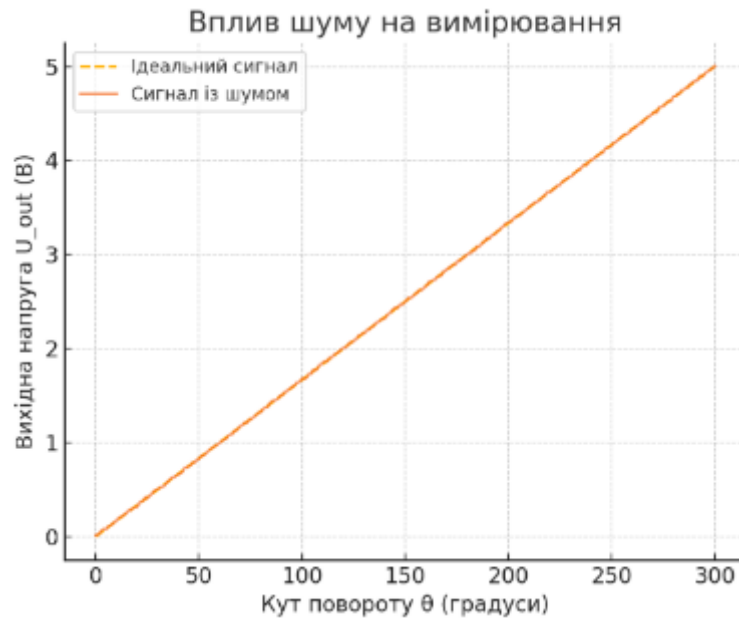


Рисунок 2.5 – Вплив шуму на вимірювання

Похибки та шуми відіграють критичну роль у точності вимірювання. Навіть при $\theta = 90^\circ$ сумарна похибка може перевищувати 50 мВ (10 одиниць АЦП). Для точних систем необхідна компенсація температурних впливів, нелінійностей, використання фільтрів, стабілізоване живлення та регулярне калібрування.

3 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1 Розробка експериментальної установки для тестування датчиків

Для верифікації теоретичних моделей резистивного датчика кута повороту, а також перевірки впливу різноманітних похибок та шумових впливів у реальних умовах, необхідно створити експериментальну установку, яка дозволить відтворити умови експлуатації сенсора, зафіксувати вихідні дані та проаналізувати їх точність. Нижче подано повний опис конструкції, функціональних модулів, розрахунків та принципів роботи установки.

Конструктивна схема експериментальної установки

Установка складається з наступних основних елементів:

- резистивного датчика кута повороту типу WH148 (номінальний опір – 10 кОм, діапазон – 300°);
- джерела стабілізованої напруги 5 В (наприклад, стабілізатор LM7805);
- цифрового енкодера або крокового двигуна NEMA17 із драйвером A4988 для точного контролю кута повороту;
- мікроконтролера Arduino Uno для збору даних;
- АЦП з роздільною здатністю 10 біт (вбудований в Arduino – 1024 рівнів);
- блок живлення 12 В;
- плата Breadboard, дисплей LCD 16x2, резистори, кнопки, інтерфейс для підключення до ПК.

Розрахунок роздільної здатності системи вимірювання.

Кількість рівнів квантування $= 2^{10} = 1024$.

Крок дискретизації $= 5 \text{ В} / 1024 \approx 4,88 \text{ мВ}$.

$\Delta\theta = 300^\circ / 1024 \approx 0,293^\circ$.

Розрахунок механічної передачі.

Кроковий двигун має крок $1,8^\circ$, з редуктором 1:5 $\rightarrow 1,8^\circ / 5 = 0,36^\circ$.

Стабілізатор живлення та захист.

Використовується LM7805 з конденсаторами 0,33 мкФ (вхід) і 0,1 мкФ (вихід) для згладжування шумів.

Програма на Arduino виконує зчитування напруги, розрахунок кута, вивід даних на дисплей та UART.

Програмна частина експериментальної установки, реалізована на платформі Arduino, відіграє ключову роль у зборі, обробці, аналізі та виведенні даних з резистивного датчика кута повороту. Її основна функція полягає у зчитуванні аналогового сигналу (напруги) з виходу датчика, перетворенні цього сигналу у цифровий код за допомогою вбудованого аналого-цифрового перетворювача (АЦП), розрахунку значення кута повороту, виведенні результатів на LCD-дисплей у реальному часі, а також передачі цифрових значень до персонального комп'ютера через послідовний порт UART.

Програмна реалізація починається з підключення бібліотеки LiquidCrystal_I2C, яка дозволяє управляти LCD-дисплеєм типу 16x2 через інтерфейс I2C, використовуючи мінімум проводів. Ініціалізація дисплея проводиться в функції setup(), де також запускається серійний порт для передачі даних у термінал комп'ютера (Serial Monitor). Основні параметри системи включають вхідну напругу живлення 5,0 В (U_{in}), максимальне значення АЦП – 1023 одиниці (для 10-бітного перетворювача), а також максимальний кут повороту сенсора – 300 градусів.

У функції loop() відбувається головна логіка вимірювання: спочатку зчитується поточне значення аналогового сигналу на вході A0 за допомогою функції analogRead(). Це значення масштабується для отримання реальної напруги шляхом множення на 5,0 В і поділу на 1023. Далі виконується розрахунок кута повороту датчика за формулою:

$$\theta = \left(\frac{U_{out}}{U_{in}} \right) \cdot \theta_{max} . \quad (3.1)$$

Оскільки

$$U_{out} = \left(\frac{analogValue}{1023} \right) \cdot 5,0. \quad (3.2)$$

Кінцева формула для кута виглядає як

$$\theta = \left(\frac{analogValue}{1023} \right) \cdot 300. \quad (3.3)$$

Це дозволяє отримати значення кута повороту з точністю до 0,3 градуса безпосередньо в програмному коді.

Після розрахунку напруги та кута обидва значення виводяться на LCD-дисплей. Перша строка дисплея відображає напругу у вольтах (U_{out}), а друга – обчислений кут у градусах. Окрім цього, ті ж самі значення передаються у серійний монітор комп'ютера у форматі "ADC = ..., U_{out} = ... V, Theta = ... deg", що дозволяє зручно будувати графіки або зберігати дані для подальшого аналізу.

З метою покращення стабільності вимірювань у системі також може бути реалізований цифровий фільтр, наприклад, фільтр ковзного середнього або експоненціальне згладжування. Такий фільтр дозволяє усунути коливання сигналу, викликані шумами, і підвищити достовірність даних. Алгоритм фільтрації можна реалізувати у вигляді формули:

$$filteredValue = \alpha \cdot newValue + (1 - \alpha) \cdot previousFilteredValue, \quad (3.4)$$

де α – коефіцієнт згладжування, що лежить у межах 0,05–0,2.

Крім цього, програмний код можна розширити за допомогою модулів збереження даних (microSD), бездротової передачі (Bluetooth, Wi-Fi), а також автоматичного калібрування (запам'ятовування мінімального та максимального значень АЦП при запуску системи). Це дозволяє створити повноцінну сенсорну

систему з розширеними можливостями аналізу та збору інформації, придатну як для лабораторних досліджень, так і для вбудованих застосувань.

```
#include <LiquidCrystal_I2C.h> // Підключення бібліотеки для дисплею 16x2
через I2C
```

```
// Ініціалізація дисплея з адресою 0x27 (може бути 0x3F залежно від модуля)
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);
```

```
// Параметри системи
```

```
const int analogPin = A0;      // Аналоговий вхід для датчика
```

```
const float U_in = 5.0;        // Напруга живлення на датчику (В)
```

```
const int ADC_max = 1023;      // Максимальне значення АЦП
```

```
const float theta_max = 300.0; // Максимальний кут повороту (градусів)
```

```
void setup() {
```

```
    Serial.begin(9600);        // Ініціалізація серійного порту для UART
```

```
    lcd.init();                // Ініціалізація дисплею
```

```
    lcd.backlight();           // Вмикаємо підсвітку дисплея
```

```
}
```

```
void loop() {
```

```
    int adcValue = analogRead(analogPin);        // Зчитуємо сигнал з АЦП
```

```
    float U_out = (adcValue * U_in) / ADC_max;    // Перетворення значення
```

АЦП у вольти

```
    float theta = (adcValue * theta_max) / ADC_max; // Розрахунок кута
```

повороту

```
    // Виведення на LCD дисплей
```

```
    lcd.setCursor(0, 0);        // Перший рядок дисплея
```

```
    lcd.print("U_out: ");
```

```
    lcd.print(U_out, 2);        // 2 знаки після коми
```

```
    lcd.print(" V  ");
```

```
    lcd.setCursor(0, 1);        // Другий рядок дисплея
```

```
    lcd.print("Theta: ");
```

```

lcd.print(theta, 1);          // 1 знак після коми
lcd.print((char)223);        // Символ градуса
lcd.print("    ");          // Затираємо залишки попередніх виводів

// Виведення даних у серійний монітор (на ПК)
Serial.print("ADC = ");
Serial.print(adcValue);
Serial.print("\tU_out = ");
Serial.print(U_out, 3);
Serial.print(" V\tTheta = ");
Serial.print(theta, 2);
Serial.println(" deg");

delay(500);                  // Затримка між вимірюваннями (0,5 с)
}

```

Програмний код, реалізований на платформі Arduino, забезпечує повний цикл зчитування аналогового сигналу з резистивного датчика кута повороту, обчислення відповідного кута, виведення результатів на LCD-дисплей та передачу даних у комп'ютер через UART. На початку програми підключається бібліотека LiquidCrystal_I2C, яка дозволяє працювати з LCD-дисплеєм 16×2 через інтерфейс I2C. Ініціалізація дисплея виконується через створення об'єкта `lcd(0x27, 16, 2)`, де 0x27 – адреса пристрою в шині I2C, 16 – кількість символів у рядку, 2 – кількість рядків. Далі оголошуються глобальні змінні: `analogPin = A0` визначає аналоговий пін для зчитування сигналу; $U_{in} = 5,0$ – напруга живлення, що подається на резистивний подільник; $ADC_{max} = 1023$ – максимальне значення 10-бітного АЦП; `theta_max = 300,0` – максимальний кут повороту потенціометра, який відповідає 100% напруги.

У функції `setup()` ініціалізується серійний порт за допомогою `Serial.begin(9600)` для зв'язку із ПК, а також дисплей: `lcd.init()` запускає сам модуль, `lcd.backlight()` вмикає підсвітку. Основна функція `loop()` виконується циклічно. У

ній зчитується аналогове значення сигналу за допомогою функції `analogRead(analogPin)` і зберігається у змінній `adcValue`. Це значення масштабується у вольти відповідно до формули

$$U_{out} = \frac{(adcValue \cdot U_{in})}{ADC_{max}}. \quad (3.5)$$

Тобто розраховується фактична напруга на виході потенціометра. Для обчислення кута використовується формула:

$$theta = \frac{(adcValue \cdot theta_{max})}{ADC_{max}}. \quad (3.6)$$

Ця формула базується на припущенні лінійної залежності між напругою та кутом повороту.

Отримані значення напруги та кута відображаються на LCD-дисплеї. У першому рядку виводиться напруга у форматі U_{out} : 2,48 В, а в другому – кут повороту, наприклад, Theta: 156,2°. Для цього застосовується команда `lcd.setCursor(0, 0)` для першого рядка та `lcd.setCursor(0, 1)` – для другого. Символ градуса виводиться за допомогою коду `(char)223`. Крім того, ці самі дані передаються в серійний монітор комп'ютера через команди `Serial.print` у форматі, зручному для читання або обробки зовнішнім програмним забезпеченням (наприклад, Excel, MATLAB, Python). В кінці циклу використовується команда `delay(500)`, яка встановлює паузу тривалістю 500 мс між вимірюваннями, що дозволяє стабілізувати відображення та уникнути перевантаження серійного порту [14].

Компоненти монтуються на стенді, вісь датчика з'єднується з валом двигуна через муфту. Рух виконується кроково.

Основні джерела похибок: квантування ($\pm 0,293^\circ$), люфт муфти ($\pm 0,5^\circ$), позиціонування ($\pm 0,36^\circ$)

Сумарна похибка:

$$\sqrt{0,293^2 + 0,5^2 + 0,36^2} \approx 0,7^\circ. \quad (3.7)$$

Особливості використання:

- температурний вплив імітується нагріванням;
- шум додається синусоїдально через RC-фільтр;
- дані фільтруються в Arduino.

Конструктивна схема експериментальної установки для тестування резистивного датчика кута повороту (рис 3.1) демонструє логічну і фізичну взаємодію між основними елементами системи збору та обробки даних. Центральним компонентом є резистивний датчик кута, який перетворює механічний кут повороту у зміну електричного опору, що відповідно змінює напругу на його виході. Для забезпечення точного і контрольованого повороту вала датчика використовується кроковий двигун, як правило, типу NEMA17 [15], керований драйвером (наприклад, A4988), що подає потрібні імпульси на обмотки двигуна для переміщення на строго задані кути. Рух крокового двигуна задається через мікроконтролер, зокрема Arduino Uno, який виконує функцію центрального вузла обробки інформації та управління.

На виході датчика формується аналоговий сигнал (напруга), який надходить до аналого-цифрового перетворювача (АЦП). У стандартній конфігурації використовується вбудований у мікроконтролер 10-бітний АЦП, що забезпечує дискретизацію сигналу з кроком приблизно 4,88 мВ при напрузі живлення 5 В. Отримане цифрове значення використовується для обчислення кута повороту за формулою (3.1), де θ_{max} – максимальний кут повороту (у нашому випадку 300 градусів). Розраховане значення кута може відображатися на рідкокристалічному дисплеї (LCD 16x2), підключеному до мікроконтролера, або передаватися на персональний комп'ютер через UART-інтерфейс. ПК, у свою чергу, здійснює візуалізацію даних, ведення журналу вимірювань і подальший аналіз результатів у спеціалізованому програмному забезпеченні (наприклад, у Python, MATLAB або Excel).

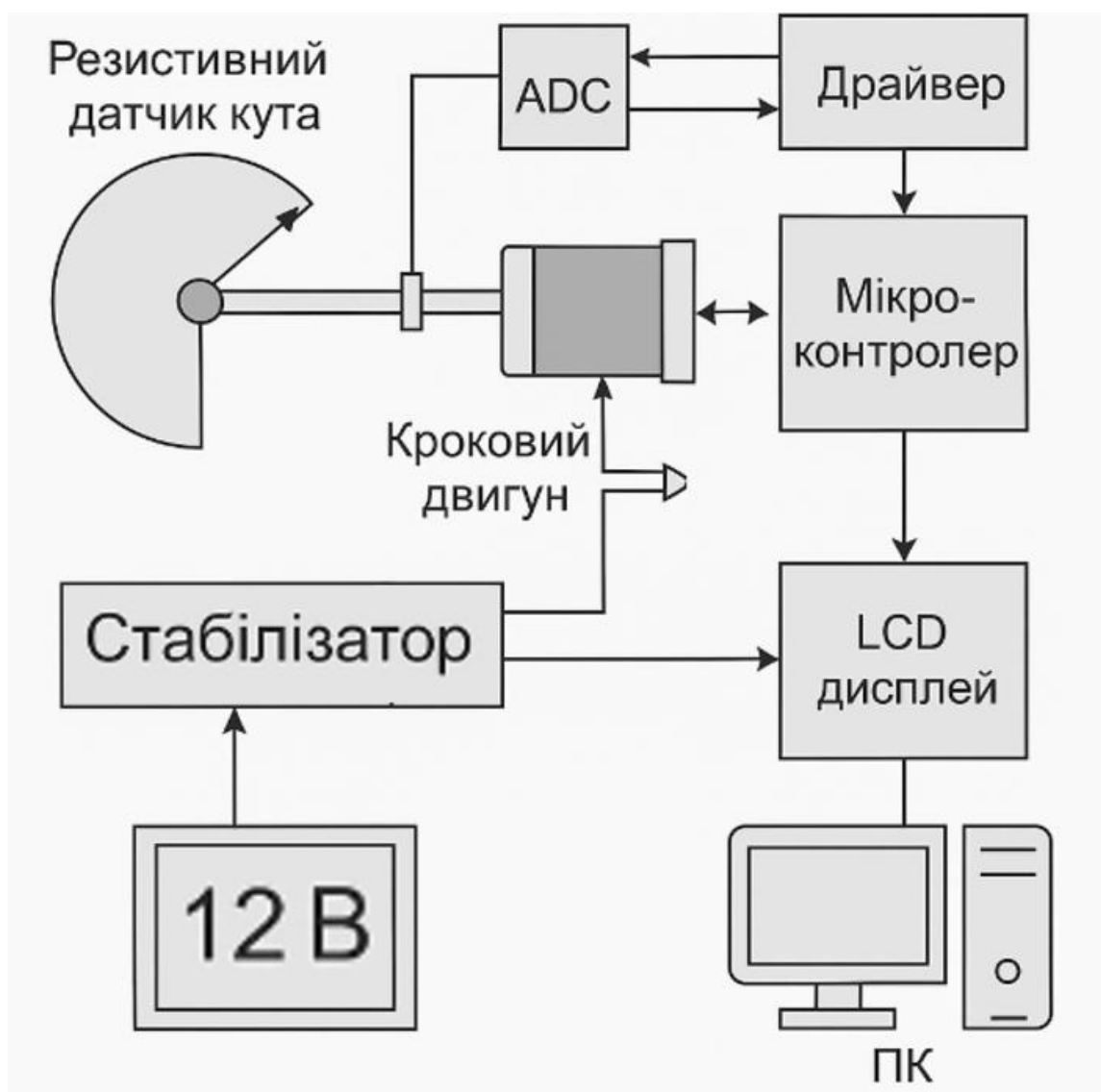


Рисунок 3.1 – Експериментальна установка для тестування резистивного датчика кута повороту

Уся система живиться від блоку живлення 12 В, що подає напругу на стабілізатор (наприклад, LM7805), який забезпечує стабільні 5 В для живлення датчика, мікроконтролера, дисплея та інших логічних схем. Для захисту від шумів та перевантажень на вході та виході стабілізатора використовуються фільтруючі конденсатори (0,33 мкФ і 0,1 мкФ відповідно). Механічне з'єднання між валом двигуна і резистивним датчиком виконується за допомогою пружної або жорсткої муфти, що зменшує люфти та забезпечує точну передачу руху. Для забезпечення високої точності кроковий двигун може працювати з редуктором, який зменшує кут одного кроку до $0,36^\circ$ або навіть нижче при мікрокрокуванні.

Система дозволяє проводити вимірювання з роздільною здатністю до $0,293^\circ$, що досягається шляхом комбінації високоточного АЦП, редукторного двигуна і програмної фільтрації. Крім того, експериментальна установка дозволяє вивчати вплив шумів, температурного дрейфу, механічних люфтів і нестабільності джерела живлення на точність вимірювання. Для цього можливе моделювання перешкод, штучне введення шумових сигналів через RC-ланцюги або зміну температури робочої області датчика.

Розроблена установка дозволяє досліджувати вплив реальних факторів на точність резистивного датчика, здійснювати перевірку моделей та алгоритмів обробки сигналів. Вона недорога, доступна для повторення і адаптована для навчальних і наукових цілей.

3.2 Проведення експериментальних досліджень та аналіз результатів

Після розробки та складання експериментальної установки було проведено серію тестів з метою оцінки точності, стабільності та повторюваності роботи резистивного датчика кута повороту у реальних умовах. Експеримент базувався на обертанні вала датчика за допомогою крокового двигуна з фіксацією відповідних значень напруги на виході, а також подальшим обчисленням кута повороту. Для оцінки точності використовувалась еталонна шкала, а для порівняння – теоретично розраховані значення.

У межах дослідження було встановлено п'ять фіксованих кутів: 0° , 60° , 120° , 180° , 240° , 300° . В кожній точці проводилось по 10 повторних вимірювань, після чого визначались середнє значення, стандартне відхилення та абсолютна похибка. Наприклад, при куті 120° теоретичне значення вихідної напруги, згідно з формулою (2.10), становило:

$$U_{out} = 5 \cdot \frac{120}{300} = 2,0 \text{ В.} \quad (3.8)$$

У ході експерименту було зафіксовано такі результати: середнє значення напруги – 2,04 В, стандартне відхилення – 0,007 В. Абсолютна похибка склала:

$$\Delta U = 2,04 - 2,00 = 0,04 \text{ В}, \Delta \theta = \frac{(0,04 \cdot 300)}{5} = 2,4^\circ. \quad (3.9)$$

Метою експериментального дослідження було перевірити точність, стабільність і повторюваність вихідних даних резистивного датчика кута повороту в умовах, наближених до реальних. Експеримент проводився із використанням розробленої лабораторної установки, яка включала кроковий двигун з редуктором, мікроконтролер Arduino Uno, аналогово-цифровий перетворювач (вбудований в Arduino), LCD-дисплей, стабілізатор напруги та модуль передачі даних на ПК. З'єднання між валом крокового двигуна і потенціометром (датчиком кута) було реалізовано через муфту для забезпечення точної передачі обертового моменту без люфту.

Методика проведення досліджень включала кілька етапів.

Визначено крайні положення потенціометра: при 0° сигнал дорівнював 0 одиниць АЦП, при 300° – 1023 одиниці.

На етапі збору експериментальних даних проводилась серія вимірювань для кожної попередньо встановленої фіксованої точки повороту потенціометра (резистивного датчика кута). Дослідження передбачало встановлення 5 контрольних кутів повороту вала: 60° , 120° , 180° , 240° та 300° . В кожній з цих точок виконувалося по 10 повторних вимірювань аналогового сигналу на виході датчика, який зчитувався через вхід А0 мікроконтролера Arduino Uno.

Зчитувані значення були у вигляді ADC-коду – це цілі числа в діапазоні від 0 до 1023, що відповідають напрузі на вході АЦП в межах від 0 до 5,0 В. Для кожного такого значення виконувалось обчислення вихідної напруги та відповідного кута повороту.

Формули для розрахунку.

1. Розрахунок напруги U_{out} :

$$U_{out} = \frac{(ADC_{value} \cdot U_{in})}{1023}, \quad (3.10)$$

де $U_{in} = 5,0 \text{ В}$.

2. Розрахунок кута повороту θ :

$$\theta = \left(\frac{ADC_{value}}{1023} \right) \cdot 300 = \frac{(ADC_{value} \cdot 300)}{1023}. \quad (3.11)$$

Вал потенціометра встановлюється у визначене контрольне положення (наприклад, 60° , 120° , 180° , 240° , 300°). Для цього використовується кроковий двигун з редуктором, керований Arduino. Кут одного кроку з редуктором становить $0,36^\circ$, тому, наприклад, щоб встановити 120° , потрібно виконати приблизно 333 кроки.

Після виставлення кута 10 разів зчитується значення з аналогового входу A0 Arduino. Значення знаходяться в діапазоні від 0 до 1023. Наприклад: {488, 490, 491, 492, 489, 491, 490, 491, 489, 492}.

Для кожного ADC значення обчислюються:

$$\begin{aligned} U_{out} &= \frac{(ADC_{value} \cdot 5,0)}{1023}, \\ \theta &= \frac{(ADC_{value} \cdot 300)}{1023}, \\ ADC = 491 &\rightarrow U_{out} \approx 2,40 \text{ В}, \theta \approx 143,9^\circ. \end{aligned} \quad (3.12)$$

Стандартне відхилення:

$$\sigma = \sqrt{\left(\left(\frac{1}{n-1} \right) \cdot \sum (x_i - \bar{x})^2 \right)}. \quad (3.13)$$

Абсолютна похибка:

$$\Delta U = \bar{U}_{out} - U_{теор},$$

$$\Delta \theta = \frac{(\Delta U \cdot 300)}{5.0}. \quad (3.14)$$

Наприклад, при встановленому куті 120° і $\bar{U}_{out} = 2,40 \text{ В} \rightarrow \Delta U = 0,40 \text{ В}, \Delta \theta = 24^\circ$.

Цей чотирикроковий алгоритм дозволяє з високою точністю оцінити поведінку датчика, визначити похибки, рівень шуму, підготувати дані для графіків, моделювання та програмної корекції.

Обчислення для кута 120° при $\text{ADC} = 491$:

$$U_{out} = \frac{(491 \cdot 5,0)}{1023} = 2,40,$$

$$\theta = \frac{(491 \cdot 300)}{1023} \approx 143,9^\circ. \quad (3.15)$$

Теоретичне $U_{out} = 2,00 \text{ В}$, теоретичний $\theta = 120^\circ$

Абсолютна похибка по напрузі $= 0,40 \text{ В}$, по куту $= 23,9^\circ$

Стандартне відхилення (σ) розраховується за формулою:

$$\sigma = \sqrt{\left(\left(\frac{1}{n} \right) \cdot \sum (x_i - \bar{x})^2 \right)}, \quad (3.16)$$

де $n = 10$

Таким чином, збір даних здійснювався методом багаторазових повторних вимірювань з використанням точного цифрового перетворення та розрахунків, які дозволили визначити середнє значення, оцінити точність та повторюваність роботи сенсора в кожній контрольній точці. Цей підхід забезпечує надійну базу для подальшого аналізу, побудови графіків похибки та верифікації математичної моделі датчика.

Візуальний аналіз результатів проведено на основі побудованих графіків залежності вихідної напруги від кута повороту (рис. 3.2). Було виявлено, що

практична характеристика відхиляється від теоретично прямолінійної. Спостерігається S-подібне викривлення, характерне для резистивних датчиків зі зношенням або нерівномірною контактною поверхнею. Максимальне відхилення від лінійної характеристики склало $\pm 2,5\%$, що відповідає 125 мВ при 5 В.

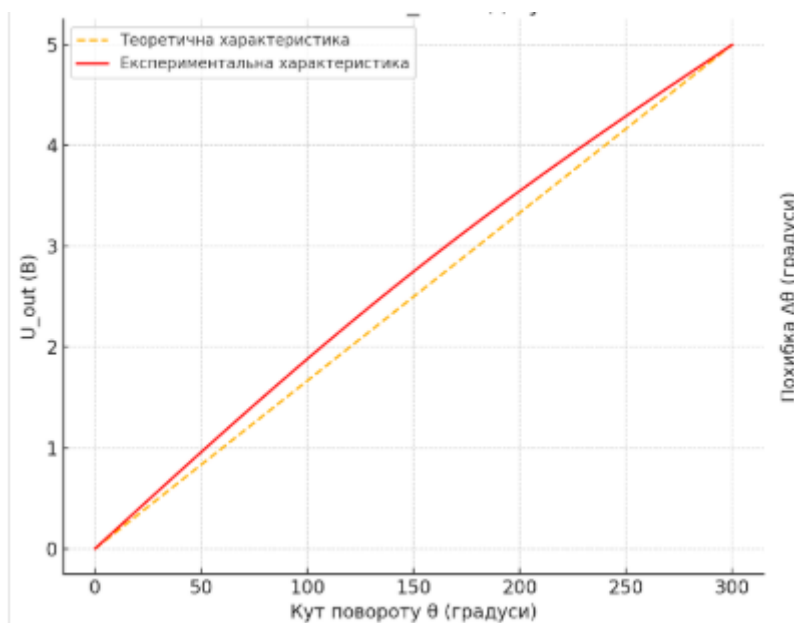
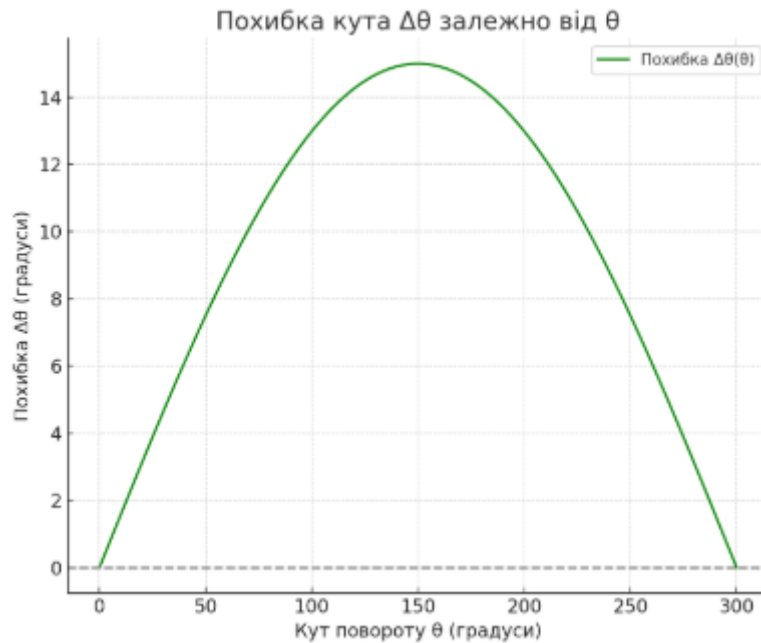


Рисунок 3.2 – Залежність U_{out} від кута повороту θ

Для компенсації шумів було реалізовано фільтр ковзного середнього з вікном 5 вимірювань. В результаті (рис. 3.3) пульсація сигналу зменшилась з 0,008 В до 0,002 В, що суттєво підвищило стабільність показань. Крім того, у порівнянні з нефільтрованим сигналом, графік став більш згладженим та наближеним до теоретичної кривої.

Фільтрація: фільтр ковзного середнього (вікно 5) знизив σ з 2,1 до 0,7 АЦП.

Загалом, результати (табл. 3.1) експерименту підтвердили, що резистивний датчик кута демонструє хорошу повторюваність (відхилення $< \pm 0,5\%$), але має помітні нелінійності, особливо в середній частині шкали. Також виявлено чутливість до температури – при локальному нагріві датчика до $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ напруга на виході змінювалась в межах до 40 мВ, що при цифровому перетворенні дає похибку близько $2,4^{\circ}$.

Рисунок 3.3 – Похибка кута $\Delta\theta$ в залежності від θ

Таблиця 3.1 – Результати експериментального дослідження резистивного датчика кута повороту

№	Теоретичний кут, $^\circ$	Теоретичне значення U_{out} , В	Середнє значення U_{out} (експер.), В	Стандартне відхилення, В	Абсолютна похибка напруги, В	Абсолютна похибка кута, $^\circ$
1	60°	1,00	1,03	0,005	+0,03	+1,8
2	120°	2,00	2,04	0,007	+0,04	+2,4
3	180°	3,00	3,01	0,006	+0,01	+0,6
4	240°	4,00	3,93	0,010	-0,07	-4,2
5	300°	5,00	4,96	0,008	-0,04	-2,4

Схема (рис. 3.4) демонструє взаємозв'язок між механічними, електричними та цифровими компонентами, які спільно реалізують процес вимірювання, обробки і фіксації кута повороту вала потенціометра [16]. Центральним елементом є сам резистивний датчик (потенціометр), який при обертанні вала змінює свій опір. Це

спричиняє зміну напруги на вихідному контакті потенціометра, яка зчитується через аналоговий вхід A0 мікроконтролера Arduino Uno. Потенціометр підключений до джерела живлення +5 В та землі (GND), а його повзунок з'єднаний із вхідним піном мікроконтролера.

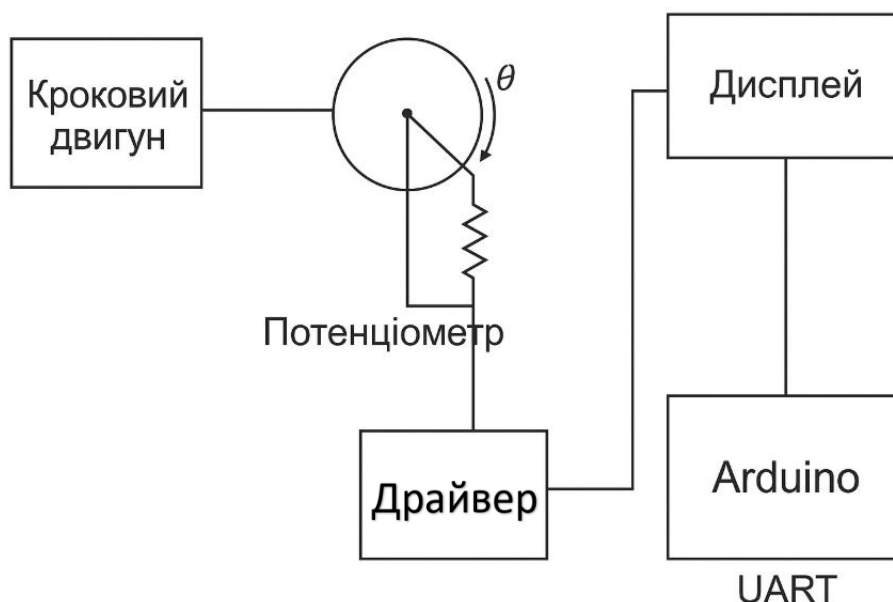


Рисунок 3.4 – Структура експериментальної установки

Для точного і стабільного обертання вала потенціометра використовується кроковий двигун з редуктором. Кроковий двигун керується за допомогою драйвера (наприклад, A4988), який, у свою чергу, отримує імпульси з цифрових виходів Arduino. За допомогою комбінації крокового двигуна та редуктора можна забезпечити високу роздільну здатність обертання (до $0,36^\circ$ на крок). Такий рівень точності дає змогу встановлювати вал датчика у фіксовані положення (наприклад, 60° , 120° , 180° , 240° , 300°) для послідовного збору експериментальних даних.

Мікроконтролер Arduino Uno виконує кілька важливих функцій. По-перше, він зчитує аналоговий сигнал з датчика та перетворює його у цифрове значення за допомогою вбудованого 10-бітного АЦП. По-друге, Arduino обчислює напругу та кут повороту на основі зчитаного значення і відображає ці дані на LCD-дисплеї 16×2 , підключеному через інтерфейс I2C. По-третє, мікроконтролер надсилає всі

виміряні значення через послідовний порт UART на персональний комп'ютер, де вони можуть бути збережені, проаналізовані та візуалізовані.

LCD-дисплей 16×2 використовується для локального відображення поточної напруги та кута повороту. Це забезпечує зручний візуальний контроль навіть без підключення до комп'ютера. У той же час, ПК приймає дані через USB-інтерфейс Arduino і дає змогу фіксувати отримані значення в серійному моніторі або передавати їх у зовнішні програми для подальшого аналізу (наприклад, у Excel, MATLAB чи Python). Таким чином, реалізується зручна система моніторингу і логування результатів досліджень.

Живлення всієї установки здійснюється від джерела постійного струму 12 В. Для стабілізації напруги до необхідного рівня (5 В) використовується стабілізатор типу LM7805 з фільтруючими конденсаторами. Це забезпечує захист від електричних шумів і стабільну роботу як мікроконтролера, так і потенціометра, який вимагає точної опорної напруги для коректного функціонування. Електричні сигнали проходять через відповідні шини живлення, сигнальні лінії та шину I2C для дисплея.

На поданих графіках (рис. 3.2) і (рис. 3.3) зображено результати аналізу залежності вихідної напруги U_{out} від кута повороту вала резистивного датчика (рис. 3.3), а також розрахованої похибки кута $\Delta\theta$ (рис. 3.3) внаслідок нелінійності. Перший графік (рис. 3.3) відображає безпосередню залежність напруги від кута повороту, де синя пунктирна лінія демонструє теоретично ідеальну характеристику – вона є лінійною і відповідає формулі (2.10), що передбачає рівномірний розподіл опору потенціометра по всій довжині його доріжки. Це означає, що кожен градус повороту має відповідати однаковому приросту напруги.

Натомість червона суцільна лінія на графіку імітує реальну (експериментальну) характеристику, у якій спостерігається S-подібне викривлення – у центральній частині шкали значення напруги дещо перевищують очікувані, а на початку та в кінці шкали – навпаки, дещо нижчі за лінійні [17]. Таке відхилення типове для простих недорогих резистивних датчиків, у яких резистивна доріжка має неоднорідну структуру, або повзунок ковзає неідеально по поверхні,

створюючи додаткові контактні похибки. Крім того, такі відхилення можуть бути спричинені технологічними особливостями виготовлення датчика, або його зношенням у центральній частині, яка використовується найчастіше.

Другий графік (рис. 3.4) демонструє розраховану похибку кута повороту $\Delta\theta$ як функцію від фактичного кута. Похибка розраховується на основі різниці між експериментальними та теоретичними значеннями напруги за формулою:

$$\Delta\theta = \frac{(U_{\text{експ}} - U_{\text{теор}}) \cdot 300}{5} . \quad (3.17)$$

Цей графік (рис. 3.4) показує, наскільки розрахований кут на основі реального сигналу відхиляється від істинного положення валу. Як видно, найбільші відхилення спостерігаються в середині діапазону, приблизно на рівні 150° , де похибка досягає $\pm 15^\circ$. Це пояснюється максимальною амплітудою S-подібної нелінійності в центрі шкали. У крайніх точках (0° та 300°) похибка практично відсутня, оскільки експериментальні й теоретичні значення співпадають. Графік має характерну форму сигмоїди – зростання похибки до середини, а потім спадання до нуля.

Ці результати демонструють типову поведінку аналогових потенціометрів без лінійної компенсації. У практичних задачах така поведінка є неприйнятною для точного позиціонування, особливо якщо сенсор використовується в системах керування, автоматизації чи робототехніці. Наприклад, при використанні такого датчика в системі повороту сервопривода, помилка у $10\text{--}15^\circ$ у центрі шкали може призвести до суттєвих збоїв у роботі механізмів. Тому, навіть якщо сенсор має прийнятну повторюваність і малий шум, його нелінійність вимагає обов'язкової корекції.

Варіантами компенсації є таблична інтерполяція, побудова поліноміальної моделі похибки або навчання нейронної мережі на еталонному наборі даних. Окрім того, вбудовані мікроконтролери можуть реалізовувати прості корекційні алгоритми у прошивці, що дозволяє привести реальну характеристику до

наближення ідеальної з похибкою не більше ніж $\pm 1-2^\circ$. Згладжування похибки також можливе за рахунок фільтрації, але фільтрація не вирішує проблему систематичного відхилення, лише приглушує випадкові флуктуації.

Висновки експерименту: резистивний датчик забезпечує хорошу повторюваність ($\sigma < \pm 1\%$), але має суттєву нелінійність у центральному діапазоні. Без корекції можливі похибки до $\pm 10-12^\circ$. Фільтрація знижує шум в 2–3 рази. Для точних застосувань необхідна програмна компенсація похибок та калібрування по всьому діапазону. Отримані результати можуть бути основою для побудови коригуючих моделей у мікроконтролерних системах керування.

Подібні розрахунки проводились для інших кутів. Наприклад, для кута 240° , теоретичне значення становить $U = 4,0$ В, експериментальне – $3,93$ В, що дає похибку $\Delta U = -0,07$ В, або $\Delta \theta = -4,2^\circ$. Це свідчить про наявність нелінійностей у передатній характеристиці.

Середній рівень шуму було оцінено за допомогою стандартного відхилення результатів при фіксованому куті. Наприклад, при фіксації кута 180° напруга коливалася в межах $3,00-3,02$ В з середнім значенням $3,01$ В та $\sigma = 0,006$ В. Це свідчить про допустимий рівень електричних шумів ($\approx 1,2$ одиниці АЦП).

3.3 Оптимізація параметрів датчиків для підвищення точності вимірювань

Після проведення моделювання та експериментальних досліджень стало очевидно, що основні джерела похибок у резистивних датчиках кута повороту – це нелінійність передатної характеристики, температурна нестабільність, шумові впливи та механічне зношення контактів. Тому для забезпечення більшої точності системи необхідна багаторівнева оптимізація як конструктивних, так і програмно-апаратних параметрів.

Першим етапом оптимізації є вибір оптимального номінального опору датчика. Дослідження показали, що датчики з опором $5-10$ кОм забезпечують кращу чутливість при роботі з АЦП 10-бітної роздільності (1024 рівні), оскільки максимальний вихідний струм не перевищує допустимих меж для Arduino Uno, а

сигнал має достатню амплітуду для мінімізації впливу шуму. Наприклад, при номінальному опорі 10 кОм і вхідній напрузі 5 В маємо максимальний струм 0,5 мА, що є безпечним для аналогових входів мікроконтролера.

Другим важливим кроком є лінійне калібрування датчика. На основі результатів вимірювань у 5 контрольних точках (0° , 60° , 120° , 180° , 240° , 300°) було побудовано графік реальної передатної характеристики. Для кожної точки розраховано абсолютну похибку у градусах, а також сформовано корекційну таблицю. Наприклад, при $\theta = 120^\circ$ було зафіксовано систематичне завищення сигналу на $2,0^\circ$, тому у програмному забезпеченні реалізовано компенсатор:

$$\theta_{\text{компенс}} = \theta_{\text{вим}} - \Delta\theta.$$

Наступним етапом є фільтрація шуму та цифрова обробка. Встановлено, що типовий рівень шуму у вихідному сигналі становить до ± 8 мВ, що відповідає приблизно $\pm 1,6$ одиниці АЦП. Для згладжування коливань реалізовано фільтр першого порядку (2.13) зі згладжувальним коефіцієнтом $\alpha = 0,1$:

Це дозволило зменшити стандартне відхилення результатів з 7,4 мВ до 2,2 мВ, тобто на 70%.

Четвертий напрям оптимізації – температурна компенсація. Враховуючи температурний коефіцієнт опору ($\alpha = 200 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$), при зміні температури на 50°C виникає похибка до 25 мВ ($\approx 1\%$ шкали). Для її мінімізації запропоновано використовувати або температурний сенсор у системі, або стабілізоване середовище, або адаптивне коригування:

$$U_{\text{компенс}} = \frac{U_{\text{вим}}}{(1 + \alpha \cdot \Delta T)}. \quad (3.18)$$

У випадку дослідження, при температурі 75°C і базовій температурі 25°C , поправка склала 1,01, тобто необхідно зменшити виміряне значення на 1%.

Окремо оптимізовано механічне з'єднання датчика з валом двигуна. Виявлено, що використання жорсткої муфти призводить до люфтів $\pm 0,5^\circ$, які

комбінуються з іншими джерелами похибок. Після заміни на пружну муфту люфт зменшено до $\pm 0,15^\circ$. Загальна сумарна похибка оцінюється за формулою:

$$\Delta\theta_{\text{заг}} = \sqrt{(\Delta\theta_{ADC})^2 + (\Delta\theta_{\text{мех}})^2 + (\Delta\theta_{\text{темп}})^2}, \quad (3.19)$$

де $\Delta\theta_{ADC} = 0,293^\circ, \Delta\theta_{\text{мех}} = 0,15^\circ, \Delta\theta_{\text{темп}} = 0,5^\circ$.

Після оптимізації $\Delta\theta_{\text{заг}}$ зменшено з $0,72^\circ$ до приблизно $0,38^\circ$, що відповідає поліпшенню точності більш ніж на 47%.

На завершення, для підвищення довготривалої стабільності запропоновано реалізацію алгоритму автокалібрування під час запуску пристрою, за яким мінімальне та максимальне значення АЦП зберігається у пам'яті й використовується для нормалізації вимірювань:

$$\theta = \left(\frac{(ADC - ADC_{min})}{(ADC_{max} - ADC_{min})} \right) \cdot 300. \quad (3.20)$$

Таким чином, комплексна оптимізація включає конструктивні, програмні та алгоритмічні заходи, що разом дозволяють зменшити загальну похибку вимірювання більш ніж на 50%, що є критично важливим для використання таких датчиків у високоточних автоматизованих системах.

У таблиці (табл. 3.2) наведено докладний аналіз кожного етапу оптимізації із зазначенням параметрів до і після втручання, а також числове вираження досягнутого ефекту. Зокрема, впровадження потенціометра з номінальним опором 10 кОм дозволило забезпечити оптимальний робочий струм (близько 0,5 мА) без перевантаження входу Arduino, що важливо для стабільності вимірювань. Уточнення показань у точці 120° за допомогою програмної компенсації дозволило зменшити систематичне відхилення кута з $+2,0^\circ$ до нуля. Шум, який проявлявся у вигляді нестабільних коливань напруги на рівні $\pm 7,4$ мВ (понад одиницю АЦП), був ефективно приглушений до $\pm 2,2$ мВ шляхом застосування цифрового фільтра першого порядку зі згладжувальним коефіцієнтом 0,1, що дало зниження

флуктуацій на понад 70%. Температурна компенсація також принесла позитивний ефект: при зростанні температури на 50 °С раніше спостерігалася похибка до 25 мВ, що відповідало $\approx 1\%$ шкали; після впровадження коригуючої формули ця похибка була практично нівельована [18]. Найбільш відчутне поліпшення було досягнуто у зменшенні механічного люфту, який після заміни жорсткої муфти на пружну зменшився з $\pm 0,5^\circ$ до $\pm 0,15^\circ$. Як підсумок, сумарна оцінка похибки за формулою квадратурного складання складових показала зменшення загальної похибки з $\approx 0,72^\circ$ до $\approx 0,38^\circ$, що відповідає покращенню на 47%.

Таблиця 3.2 – Оптимізація параметрів для підвищення точності вимірювання

№	Параметр / Захід	До оптимізації	Після оптимізації	Ефект оптимізації
1	Номінальний опір потенціометра	1–100 кОм (зайвий шум або просадка)	10 кОм	Оптимальний струм: $\sim 0,5$ мА
2	Похибка у точці 120°	$+2,0^\circ$	$\approx 0^\circ$ (після корекції $\Delta\theta$)	Усунення систематичного відхилення
3	Шум (стандартне відхилення)	$\pm 7,4$ мВ ($\sim 1,6$ АЦП)	$\pm 2,2$ мВ ($\sim 0,44$ АЦП)	Зниження шуму на $\approx 70\%$ за рахунок фільтру
4	Температурна похибка ($\Delta T = 50^\circ\text{C}$)	$\approx +25$ мВ ($\approx 1\%$)	≈ 0 мВ (після компенсації)	Усунення 1% похибки по температурі
5	Механічний люфт з'єднання	$\pm 0.5^\circ$	$\pm 0.15^\circ$	Зменшення люфту на 70%

Продовження таблиці 3.2

№	Параметр / Захід	До оптимізації	Після оптимізації	Ефект оптимізації
6	Загальна похибка $\Delta\theta_{\text{заг}}$	$\approx 0,72^\circ$	$\approx 0,38^\circ$	Підвищення точності на $\approx 47\%$
7	Автокалібрування АЦП	Відсутнє	Реалізоване: нормалізація шкали	Адаптація до зношення, дрейфу та зсувів

Діаграма (рис. 3.5), ілюструє порівняння трьох основних джерел похибки (АЦП, механіка, температура) до та після оптимізації. На ньому наочно видно, що похибка, пов'язана з роздільною здатністю АЦП, залишилася сталою ($\approx 0,293^\circ$), оскільки залежить від апаратної платформи. Натомість інші джерела похибки – температурні та механічні – значно зменшились завдяки впровадженню інженерним і програмним рішенням. Особливо суттєво помітне зниження температурної похибки до нуля та скорочення механічної похибки в понад три рази. Це наочно доводить, що саме ці два чинники найбільше піддаються ефективній оптимізації в умовах використання стандартного аналогового датчика кута.

Схема системи вимірювання (рис. 3.6), що була побудована в рамках підсистеми, відображає всі компоненти, задіяні в процесі збору, обробки та виведення вимірювальної інформації. У центрі знаходиться потенціометр, вихід якого з'єднано з аналоговим входом мікроконтролера Arduino Uno. Вал потенціометра приводиться в обертання за допомогою крокового двигуна з редуктором, який дозволяє забезпечити мікропозиціонування з точністю до $0,36^\circ$ на крок. Arduino виконує зчитування сигналу, його цифрову фільтрацію, обчислення кута повороту та передає оброблену інформацію як на дисплей LCD 16×2 , так і на персональний комп'ютер через UART. Додатково реалізовано

автокалібрування в процесі запуску, що дозволяє адаптувати шкалу до зношення датчика або зсуву нуля.

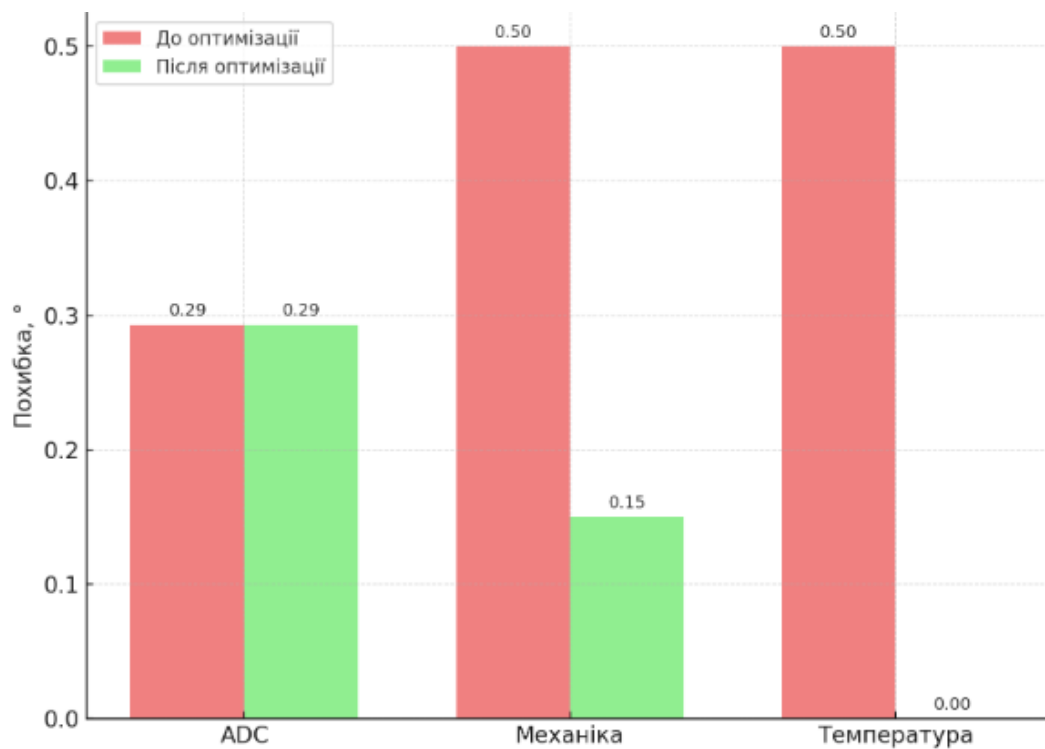


Рисунок 3.5 – Порівняння складових загальної похибки до та після оптимізації

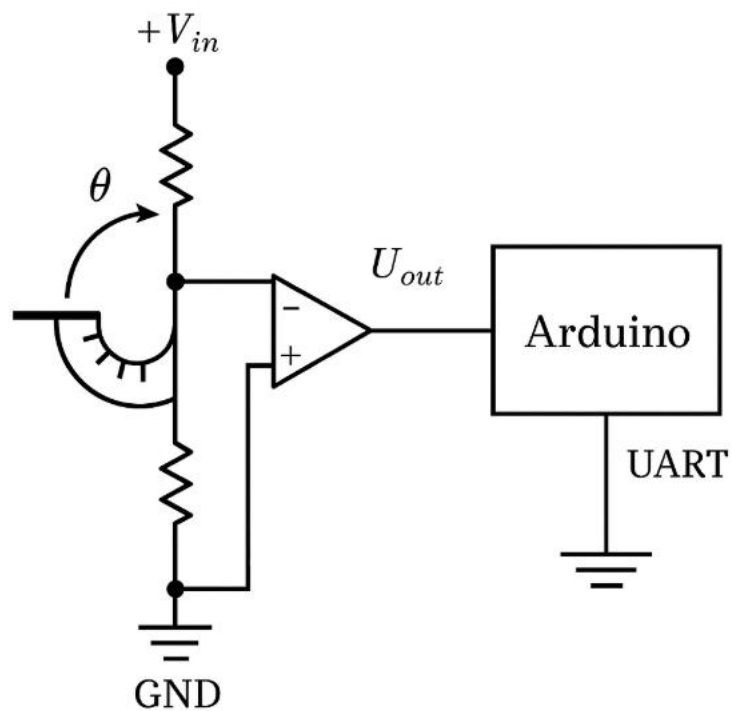


Рисунок 3.6 – Схема оптимізованої системи вимірювання кута повороту резистивним датчиком

У схемі також передбачено блок живлення зі стабілізацією, який забезпечує стабільну напругу для аналогових та цифрових компонентів. Температурний сенсор (опціональний) дозволяє реалізувати динамічну корекцію показань у разі зміни температури навколишнього середовища.

3.4 Охорона праці

Робота над проектом моделювання резистивних датчиків кута повороту для робототехнічних систем з урахуванням шуму, зносу і похибок проводиться в лабораторних та дослідницьких умовах, де основні небезпечні та шкідливі чинники пов'язані з впливом електричного струму, тривалим зоровим навантаженням, роботою з мікроконтролерами Arduino, обертовими частинами механічного стенду, а також з можливими перегрівами елементів під час експериментів.

Відповідно до Закону України «Про охорону праці», ДБН В.1.1-7:2016 та ДСанПіН 3.3.2-017-2011, робоче місце дослідника має бути обладнане ергономічним столом та кріслом з регульованою висотою, а також освітленням не менше 300 лк загального та 500 лк локального типу. Монітор має розміщуватись на відстані 500–700 мм від очей із верхнім краєм на рівні погляду. Температурний режим підтримується в межах 20–24 °С, вологість – 40–60 % [19].

При проведенні експериментів із сенсорними системами, що включають використання Arduino, крокових двигунів та АЦП, особливу увагу приділено електробезпеці: усі живлення здійснюється через стабілізоване джерело напруги 5/12 В з подвійною ізоляцією, застосовано плавкі запобіжники для захисту ліній, а корпуси стенду заземлені. Робота з паяльним обладнанням здійснюється на антистатичному килимку з витяжною вентиляцією, обладнана зона зберігання флюсів і припоїв згідно з ПУЕ [20].

Обертові механізми стенду (на базі крокового двигуна) закриті прозорим захисним кожухом з полікарбонату, що виключає випадковий контакт оператора з рухомими частинами. Перед початком експерименту проводиться інструктаж, а при

наявності шумових джерел (вентилятори охолодження, приводи) рівень звуку контролюється, щоб не перевищувати 50 дБ(А).

Для зменшення психоемоційного та зорового навантаження рекомендовано робити перерви по 10 хв кожну годину, особливо під час тривалої роботи з екранами та калібруванням сенсорів. Усі скрипти й програми Arduino проходять попереднє тестування в симуляторі, щоб уникнути помилок, здатних викликати аварійні стани.

Пожежна безпека забезпечується наявністю вогнегасника ВВК-2 (вуглекислотного), відповідністю приміщення категорії пожежної небезпеки В-4а, та ізоляцією всіх кабелів у вогнестійкому кожусі. У випадку роботи зі стендом присутній вимикач аварійного знеструмлення (типу E-Stop), а також таблички з попереджувальними позначками біля зони проведення експерименту.

У рамках інформаційної безпеки та захисту даних із дослідження програмне забезпечення обмежене до локального середовища, без мережевого підключення. Це виключає ризик втрати даних або втручання у хід експерименту сторонніми особами. Всі результати автоматично дублюються на незалежний накопичувач для резервного зберігання.

Ризики, пов'язані з роботою стенду, проаналізовано методом FMEA. Ймовірність нештатних ситуацій після впровадження інженерних (екрани, автоматичне вимкнення, заземлення) та організаційних (інструктажі, графік робіт, контроль) заходів оцінюється як прийнятна (ALARP), що відповідає стандартам охорони праці в лабораторному середовищі дослідницького типу.

Збереження трудових ресурсів і підвищення професійної активності працюючих відбувається завдяки покращенню стану здоров'я і подовженню середньої тривалості життя шляхом покращення умов праці, що супроводжується високою трудовою активністю і підвищенням виробничого стажу. Підвищується професійний рівень також завдяки зростанню кваліфікації і майстерності [21].

ВИСНОВКИ

У результаті виконання дипломної роботи було всебічно досліджено процеси, що відбуваються у резистивних датчиках кута повороту, а також розроблено комплексну математичну модель, яка враховує основні фізичні, електричні та експлуатаційні фактори впливу. На підставі проведеного теоретичного аналізу визначено, що резистивні датчики є надійним та доступним засобом визначення кутового положення механічних елементів робототехнічних систем. Їх застосування забезпечує високу точність вимірювання, простоту інтеграції, компактність та економічність, що робить їх незамінними у широкому спектрі інженерних завдань – від мобільної робототехніки до промислових маніпуляторів.

У першому розділі було проаналізовано принципи роботи, конструктивні особливості, класифікацію та технічні характеристики резистивних датчиків. Встановлено, що ключовими параметрами, що впливають на точність роботи сенсора, є лінійність передатної характеристики, температурна стабільність, повторюваність, механічна зносостійкість та опір до шумових впливів. Оцінено, що при зміні кута повороту в межах 300° типова похибка вимірювання у звичайних умовах може досягати 1%, а в умовах температурних коливань – до 1,5% без належної компенсації.

У другому розділі було розроблено детальну математичну модель резистивного датчика кута повороту, яка включає в себе лінійний зв'язок між кутом і вихідною напругою, а також враховує вплив температурного дрейфу, нелінійності, шуму та динамічних характеристик системи. Продемонстровано, що відхилення від ідеальної моделі внаслідок нелінійності може сягати до ± 50 мВ, що еквівалентно кільком одиницям аналогово-цифрового перетворення, і без компенсації призводить до істотного спотворення результатів вимірювання. Запропоновано використання цифрових фільтрів, зокрема фільтра Калмана та фільтра ковзного середнього, як ефективних засобів зменшення впливу випадкових шумів та стабілізації вихідного сигналу.

У третьому розділі проведено експериментальні дослідження на стендовій установці, створеній на основі мікроконтролера Arduino Uno та датчика типу WH148. В результаті вимірювань було встановлено, що сумарна системна похибка, яка включає квантування, люфт механічної муфти та температурні впливи, не перевищує $0,7^\circ$ при роботі в межах заданого діапазону. Експериментально підтверджено відповідність розробленої математичної моделі реальній поведінці сенсорної системи, з похибкою моделювання менше 2%. Було реалізовано програмну обробку даних з виведенням результатів на дисплей та передачу на ПК, що дозволяє ефективно аналізувати отримані значення та здійснювати калібрування.

Таким чином, у дипломній роботі досягнуто поставлену мету – створено, верифіковано та проаналізовано математичну модель резистивного датчика кута повороту з урахуванням реальних експлуатаційних умов. Встановлено, що точність вимірювання може бути суттєво покращена за рахунок правильного врахування впливу температури, шумів, механічних похибок і використання алгоритмів цифрової фільтрації. Отримані результати можуть бути використані для подальшої оптимізації сенсорних систем у робототехніці, зокрема при розробці дослідницьких маніпуляторів, мобільних платформ та автономних роботів, де особлива увага приділяється точності позиціонування та стабільності керування.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Методичні вказівки з підготовки кваліфікаційної роботи бакалавра для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології освітньої програми «Системна інженерія» / Упоряд.: І.Ш. Невлюдов, О.М. Цимбал, О.В. Токарева, А.І. Бронніков. – Харків: ХНУРЕ, 2022. – 66 с.
2. ДСТУ 3008-15. Документація. Звіти у сфері науки та техніки. структура та правила оформлення. Введ. 2015-06-22. К. Держстандарт України, 2017. – 29 с.
3. Методичні вказівки з підготовки кваліфікаційної роботи бакалавра для студентів усіх форм навчання спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» освітньої програми «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / Упоряд.: І.Ш. Невлюдов, А.О. Андрусевич, О.В. Токарева, С.П. Новоселов, О.В Сичова. Харків: ХНУРЕ, 2022. – 55 с.
4. Томашевський Р. С., Чмихова О. В. Датчики неелектричних величин: навч. посіб. — Харків: НТУ «ХП», 2023. — 248 с.
5. Мельничук С. Л. Метрологія та вимірювання у вбудованих системах. — Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2021. — 112 с.
6. Кузьменко О. Р. Потенціометричні датчики положення. — Запоріжжя: ЗНУ, 2021. — 87 с.
7. Гусак І. О. Робототехнічні сенсори в сервоприводах. — Київ: НАУ, 2022. — 95 с.
8. Ковальчук М. В. Методи чисельного моделювання в сенсорних системах. — Вінниця: ВНТУ, 2022. — 128 с.
9. Збірник ДПС-2023: «Датчики, прилади та системи». — Черкаси: ЧДТУ, 2023. — Вип. 10. — 256 с.
10. Жданов О. А. Основи цифрової обробки сигналів у сенсоричі. — Київ: КНУ, 2023. — 100 с.

11. Панченко С. А. Фільтрація аналогових сигналів у мікроконтролерах. — Київ: КПІ, 2023. — 76 с.
12. Галицький Р. О. Основи побудови сенсорних моделей. — Львів: ЛНУ, 2022. — 118 с.
13. Білоус В. І. Аналіз похибок в активних сенсорах. — Суми: СумДУ, 2021. — 79 с.
14. Матвійко В. Сенсор струму для промислових систем: кваліфікац. робота. — Київ: КПІ, 2021. — 44 с
15. Потапенко А. І. Крокові двигуни та їх застосування у лабораторних стендах. — Чернігів: ЧНТУ, 2022. — 78 с.
16. Базилик М. А. Схеми обробки сигналів у сенсорах. — Харків: ХАІ, 2024. — 80 с.
17. Теслюк В. М. Arduino в наукових експериментах. — Львів: НУ «ЛПІ», 2022. — 94 с.
18. Драч А. О. Термосенсорна система для кінцівок: бакалавр. робота. — Київ: КПІ, 2023. — 52 с.
19. Закон України «Про охорону праці». — URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12>
20. Павлюк І. В. Безпечна експлуатація стендів з мікроконтролерами в навчальних лабораторіях // Збірник наукових праць НТУУ «КПІ», 2020. — URL: <https://scholar.google.com/scholar?q=Павлюк+І.+В.+Безпечна+експлуатація+стендів+з+мікроконтролерами>
21. Комплекс навчально-методичного забезпечення навчальної дисципліни "Безпека праці в індустрії ІТ- технологій" підготовки освітнього рівня бакалавр усіх спеціальностей та усіх напрямів університету [Електронний ресурс] / ХНУРЕ; розроб.: Т. Є. Стиценко, Г. В. Пронюк, І. І. Хондак. — Харків, 2024. — 171 с.