

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕХНОЛОГІЙ ТА
ДИЗАЙНУ

Факультет мехатроніки та комп'ютерних технологій

Кафедра комп'ютерних наук

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

**Алгоритмічне та програмне забезпечення по дослідженню
поліноміальної функції перетворення сенсора**

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 122 Комп'ютерні науки

Освітня програма Комп'ютерні науки

Виконала: студентка групи МгЗІТ-23

Корогод Г.О.

Науковий керівник к.т.н., доцент Яхно В.М.

Рецензент д.т.н., професор Чупринка В.І.

Київ 2024

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕХНОЛОГІЙ
ТА ДИЗАЙНУ**

Факультет	Мехатроніки та комп'ютерних технологій
Кафедра	Комп'ютерних наук
Рівень вищої освіти	другий (магістерський)
Спеціальність	122 Комп'ютерні науки
Освітня програма	Комп'ютерні науки

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувачка кафедри КН

_____ Наталія ЧУПРИНКА

«_____» _____ 2024 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТЦІ**

Корогод Ганні Олександрівні

1. Тема роботи: Алгоритмічне та програмне забезпечення по дослідженню поліноміальної функції перетворення сенсора.
Науковий керівник роботи: Яхно Володимир Михайлович, к.т.н., доцент, затверджені наказом КНУТД від "03" вересня 2024 року №188-уч.
2. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи: Розробки кафедри комп'ютерних наук. Програмне забезпечення по дослідженню нелінійної функції перетворення.
3. Зміст кваліфікаційної роботи: Вступ; Розділ 1. Дослідження сенсорів з нелінійною функцією перетворення; Розділ 2. Алгоритмічні компоненти та математичне моделювання; Розділ 3. Програмна реалізація; Висновки; Список використаних джерел; Додатки.
4. Дата видачі завдання: _____.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної бакалаврської роботи	Терміни виконання етапів	Примітка про виконання
1	Вступ		
2	Розділ 1. Дослідження сенсорів з нелінійною функцією перетворення		
3	Розділ 2. Алгоритмічні компоненти та математичне моделювання		
4	Розділ 3. Програмна реалізація		
5	Висновки		
6	Оформлення кваліфікаційної магістерської роботи		
7	Подача кваліфікаційної роботи (проєкту) науковому керівнику для відгуку		
8	Подача кваліфікаційної роботи (проєкту) для рецензування (за 12 днів до захисту)		
9	Перевірка кваліфікаційної роботи (проєкту) на наявність ознак плагіату та текстових співпадінь (за 10 днів до захисту)		
10	Подання кваліфікаційної роботи (проєкту) на завідувачу кафедри (за 7 днів до захисту)		

З завданням ознайомлена:

Студентка

Ганна КОРОГОД

Науковий керівник

Володимир ЯХНО

АНОТАЦІЯ

Корогод Ганна Олександрівна. Алгоритмічне та програмне забезпечення по дослідженню поліноміальної функції перетворення сенсора.

Кваліфікаційна магістерська робота за спеціальністю 122 – «Комп’ютерні науки» – Київський національний університет технологій та дизайну, Київ, 2024 рік.

Дослідження спрямоване на аналіз та моделювання поліноміальної функції перетворення сенсору при застосуванні методів надлишкових вимірювань. В роботі запропоновані алгоритм і комп’ютерна програма по визначенню вимірювальної температури. Завдяки обробці результатів вимірювання по запропонованому рівнянню надлишкових вимірювань, значення вимірювальної температури отримують безпосередньо, без застосування методів лінеаризації, ітераційних методів або додаткових схемотехнічних рішень. Крім того, отримане значення температури отримують незалежним від параметрів нелінійної функції перетворення.

Тестування запропонованої програми підтвердило високу точність і ефективність у моделюванні та дослідженні методу надлишкових вимірювань при поліноміальній функції перетворення сенсора.

Ключові слова: підвищення точності, поліноміальна функція перетворення, нестабільність параметрів, JavaScript, HTML.

ABSTRACT

Korohod Hanna Oleksandrivna. Algorithmic and software for the study of the polynomial transformation function of a sensor.

Qualification master's thesis in specialty 122 - "Computer Science" - Kyiv National University of Technology and Design, Kyiv, 2024.

The research is aimed at the analysis and modeling of the polynomial transformation function of a sensor when using redundant measurement methods. The work proposes an algorithm and a computer program for determining the measuring temperature. Due to the processing of measurement results according to the proposed equation of redundant measurements, the value of the measuring temperature is obtained directly, without the use of linearization methods, iteration methods or additional circuit solutions. In addition, the obtained temperature value is obtained independent of the parameters of the nonlinear transformation function.

Testing of the proposed program confirmed the high accuracy and efficiency in modeling and studying the method of redundant measurements when using the polynomial transformation function of a sensor.

Keywords: increasing accuracy, polynomial transformation function, parameter instability, JavaScript, HTML.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1. ДОСЛІДЖЕННЯ СЕНСОРІВ З НЕЛІНІЙНОЮ ФУНКЦІЄЮ ПЕРЕТВОРЕННЯ.....	10
1.1. Основи температурних вимірювань.....	10
1.2. Особливості застосування нелінійних сенсорів при температурних вимірювань	11
1.3. Дослідження поліноміальної функції сенсора	14
1.4. Суть надлишкових методів температури	17
Висновки до розділу 1.....	20
РОЗДІЛ 2. АЛГОРИТМІЧНІ КОМПОНЕНТИ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ	21
2.1. Загальний алгоритм застосування надлишкових методів	21
2.2. Математична модель методів надлишкових вимірювань температури.....	22
2.3. Перевірка адекватності запропонованої математичної моделі при поліноміальній функції перетворення	25
2.4. Алгоритм роботи надлишкових методів при поліноміальних функцій сенсора	29
2.5. Дослідження впливу нормованих за значенням температур на результат вимірювання	33
2.6. Встановлення співвідношення між результатом вимірювання і значенням нормованої температури.....	38
2.7. Аналіз впливу методичної похибки	40
2.8. Порівняння точності надлишкового методу і метода Ньютона.....	41
Висновки до розділу 2.....	47
3. ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ	49
3.1. Вибір платформи	49
3.2. Опис роботи програми	52
3.3. Тестування програми	57
Висновки до розділу 3.....	63
ВИСНОВКИ	64
Список використаних джерел.....	68
ДОДАТКИ	74

ВСТУП

Достовірність даних є найважливішою характеристикою будь-якого технологічного процесу чи сфери діяльності. Це обґрунтовано тим, що отримання достовірної інформації дає правильне розуміння процесу, що відбувається, аналізувати його, виявляти певні ризики (брак продукції, аварії тощо) та є підставою для прийняття правильних рішень та висновків.

Похибка вимірювання є одним із головних факторів який знижує достовірність і, в результаті, може призвести до хибного результату. Тому основна увага науковців і інженерів направлена на підвищення точності вимірювання. В вимірювальному каналі першим елементом, де відбувається перетворення вхідної вимірювальної інформації в вихідний сигнал системи, виступає сенсор і від того, з якою точністю буде проведено це перетворення і залежить точність всього подальшого вимірювального процесу. Навіть незначна похибка, що вноситься сенсором, буде лише підсилена при подальшій обробці в вимірюваному каналі. Тому до сенсорів висуваються вимоги щодо високої точності, чутливості, широкого робочого діапазону, стабільності характеристик у часі та за різних умов навколишнього середовища, а також надійності. При застосуванні сенсорів особливу увагу приділяють виду функції перетворення, оскільки її нелінійність може знижувати точність. Для компенсації нелінійності функції перетворення необхідно застосовувати лінеаризацію, що, в свою чергу, спричиняє додаткові похибки або працювати на кусочно-лінійних ділянках вхідної характеристики, що призводить до звуження діапазону. Також, для зменшення впливу нелінійної складової на результат вимірювання застосовують калібрування. Недоліком цього методу є те, що, по-перше, калібрування проводяться для окремого сенсора і у випадку його заміни, необхідно знов проводити процедуру калібрування, що збільшує матеріальні затрати; по-друге, вплив навколишнього середовища на калібрування датчика, що обумовлює повторне калібрування датчиків у відповідь на дрейф нуля і старіння конструктивних

елементів сенсора. Таким чином, проблеми, пов'язані з нелінійністю датчиків, попитом на високоточні вимірювання в режимі реального часу, необхідністю збільшення терміну служби роботи сенсорів при мінімізації матеріальних затратах, залишається недостатньо вивченими.

Серед всіх сенсорів найрозповсюдженим є сенсори температури, а терморезистор – одним із найпоширеніших завдяки своїй високій чутливості, високому температурному коефіцієнту і ширині діапазону температур. Але, як і багатьом іншим сенсорам, на точність терморезистора впливає нелінійність функції перетворення, вплив оточуючого середовища, систематичні похибки тощо. Тож, на підвищення точності вимірювання спрямовано багато наукових робіт. Отримання безпосереднього значення результату вимірювання без додаткових заходів по лінеаризації функції перетворення сенсора, визначення впливу параметрів функції перетворення сенсора та їх відхилень на результат вимірювання, встановлення значень нормованих величин та їх співвідношень з контрольованою величиною і між собою – все це є цікавим для наукових досліджень, адже моделювання роботи сенсорів з нелінійною функцією перетворення дозволить більш точно адаптувати їх до реальних умов, що забезпечить підвищення точності вимірювань і ефективність роботи систем в цілому.

Таким чином, розробки програмного застосунку з зручним та інтуїтивно-зрозумілим інтерфейсом по дослідженню сенсора з поліноміальною функцією перетворення є актуальною.

Метою роботи є розробка алгоритмів і програмного забезпечення по дослідженню поліноміальних функцій перетворення сенсорів для підвищення точності вимірювань. Дослідження спрямоване на оптимізацію процесів перетворення сигналів сенсорів та забезпечення більш надійної роботи сенсора.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати наступні задачі:

- проаналізувати існуючі методи та підходи по підвищенню точності вимірювання сенсорами з нелінійною функцією перетворення;

- визначити переваги методу надлишкових вимірювань для підвищення точності вимірювань,
- представити математичну модель надлишкових методів для нелінійної функції перетворення сенсора;
- перевірити запропоновану математичну модель на адекватність;
- розробити алгоритм по дослідженню поліноміальних функцій перетворення сенсорів;
- провести порівняльний аналіз запропонованої математичної моделі з відомими методами;
- розробити програмне забезпечення по дослідженню поліноміальних функцій перетворення сенсорів;
- провести тестування програмного забезпечення при різних значеннях параметрів функції перетворення.

Об'єктом дослідження є процес моделювання температурних вимірювань при поліноміальній функції перетворення сенсора.

Предметом дослідження є математична модель методів надлишкових вимірювань.

Методи дослідження. Методи дослідження базуються на загальних положеннях теорії вимірювань, теорії надлишкових вимірювань, теорії похибок, аналітичних методах аналізу процесів перетворення сигналів, математичному моделюванні та застосуванні чисельних методів розв'язання систем нелінійних рівнянь величин як інструментів отримання фактичного матеріалу, методу алгоритмічного програмування для реалізації комп'ютерного застосунку.

Наукова новизна роботи полягає в розробці програмного застосунку, що дозволяє моделювати поліноміальні функції перетворення сенсорів для отримання високоточного значення вимірювальної температури. Також, було запропоновано математичну модель методів надлишкових вимірювань, яка складається з рядів фізичних величин відомого та невідомого розмірів, з системи нелінійних рівнянь величин, що описують стан вимірювального

каналу в дискретні моменти часу, та рівняння надлишкових вимірювань температур.

Практична цінність отриманих результатів полягає: 1) в забезпеченні високої точності температурних вимірювань при невисоких вимогах до стабільності параметрів сенсора; 2) у впровадженні розробленого програмного забезпечення у виробничі процеси та для наукових досліджень поліноміальних функцій перетворення сенсорів.

Апробація. Результати дослідження доповідались на VIII міжнародній науково-практичній конференції «MSIE-2024», опублікована 1 стаття в міжнародній базі Scopus, 1 стаття в фаховому виданні та отримане 1 авторське свідоцтво.

РОЗДІЛ 1. ДОСЛІДЖЕННЯ СЕНСОРІВ З НЕЛІНІЙНОЮ ФУНКЦІЄЮ ПЕРЕТВОРЕННЯ

1.1. Основи температурних вимірювань

Температура – це ключовий параметр будь-якого технологічного процесу. Це обґрунтовано тим, що температура характеризує не тільки кількісну, але й якісну властивість досліджуваного об'єкта. З іншого боку, температура є один із найскладніших параметрів, оскільки її не можливо безпосередньо вимірювати. Наприклад, при скловарінні для забезпечення постійного складу скломаси необхідно контролювати в'язкість скла, яка тісно залежить від температури. Навіть невелике відхилення температури, скажімо на 1% при 1000 °C, може спричинити зміну в'язкості на 10%, що суттєво знижує якість скловиробів. Тому під час виробництва важливо проводити вимірювання температури з високою точністю.

Слід зазначити, що температурні вимірювання є важливими не тільки в промисловості, а і в інших галузях: медицина, енергетика тощо.

Температурні вимірювання базуються на фізичних явищах, які залежать від температури: теплове розширення, випромінювання, тощо. Оскільки під час вимірювання температури використовують різні фізичні властивості, які змінюються пропорційно до температури, то в залежності від цього методи вимірювання температури поділяють на дві великі групи: контактні і безконтактні методи. Контактні методи вимірювання температури засновані на використанні фізичних властивостей матеріалів, що змінюються залежно від температури. До засобів таких методів відносять термопари, терморезистори, біметалеві термометри тощо. В свою чергу, безконтактні методи вимірювання температури засновані на аналізі випромінювання від об'єкта, без необхідності фізичного контакту з ним. До засобів безконтактних методів вимірювання температури відносять оптичні пірометри, радіаційні пірометри, колірні пірометри тощо. Причому, слід зазначити, що кожен з

методів має як свої недоліки, так і переваги, а їх вибір залежить від особливостей проведення технологічного процесу.

Таким чином, правильний вибір методів вимірювання і відповідних сенсорів дозволяє забезпечити високу точність, що необхідно для забезпечення високоточним вимірювань і, як наслідок, для контролю якості.

1.2. Особливості застосування нелінійних сенсорів при температурних вимірювань

З розвитком сучасних технологій, температурні вимірювання стають дедалі точнішими та ефективнішими. Так, наприклад, завдяки нанотехнологія досягається створення високоточних датчики для вимірювання на мікро- та нанорівнях, а завдяки застосуванню інтелектуальним системам – інтеграція сенсорів з інтернетом речей (IoT) для моніторингу в реальному часі.

Спираючись на розуміння термоелектричних матеріалів, в роботі [1] підкреслюється важливість властивостей матеріалу, що залежать від температури, і обмеження одновимірних аналітичних моделей у фіксуванні багатовимірних транспортних явищ. Отримані дані вказують на складності, які пов'язані з високими температурними градієнтами та геометричними факторами, вимагають використання більш надійних тривимірних моделей кінцевих елементів для точного представлення та порівняння.

Подальше дослідження теплових вимірювань в роботі [2] спрямоване на розробку та застосування термометрів опору для матеріалів низької розмірності. Дані дослідження представляють платинові резистори змієподібної форми, які служать подвійним цілям, як гарячі точки та датчики температури. Ця стаття підкреслює важливу роль високій точності термометрів опору в теплових характеристиках наноматеріалів.

Таким чином, увагу науковців приділено підвищенню точності температурних сенсорів.

Як було зазначено вище в розділі 1.1 вибір сенсора залежить від методу вимірювання, заданої точності вимірювання, діапазону вимірювання, матеріальної бази, умов експлуатації тощо. Але, загальним для всіх сенсорів є отримання точної інформації про об'єкт дослідження.

Серед основних похибок, що вносить сенсорів в результат вимірювання, є наступні:

- похибка, що обумовлена нелінійністю функції перетворення (ФП),
- похибка, що виникає через зміну параметрів ФП від їх нормованих значень під дією зовнішніх факторів і старіння матеріалу чутливих елементів сенсора.

Крім того, в залежності особливостей застосування обраного методу вимірювання, завжди наявна така складова систематичної похибки, як методична похибка.

Кожний з цих складових систематичної похибки вимірювання в сукупності призводять для зниження точності вимірювання. Тож, підвищення точності є нагальним завданням, яке повинно врахувати як фізичні властивостей самого сенсора, так і характер обробки сигналу.

Вплив нелінійності ФП сенсорів обумовлений особливостями фізичних явищ, що лежать в основі їхньої роботи. При нелінійній ФП кожна зміна вхідного сигналу призводить до непропорційної зміни вихідного сигналу, що призводить до зниження точності вимірювання. Особливо це важливо у випадках, коли чутливість сенсора змінюється залежно від діапазону вимірювання. Для підвищення точності вимірювання сенсорами з нелінійною ФП використовують різні методи та підходи:

1. Різні види калібрування та апроксимації функції перетворення [3], сплайн-інтерполяція (розбиття нелінійної функцію на кілька ділянок і на кожній з них виконати інтерполяцію).

2. Методи цифрової лінеаризації, де нелінійна функція сенсора розбивається на окремі лінійні ділянки.

3. Використання зворотних моделей, в яких перетворення нелінійного сигналу в лінійний здійснюється на основі математичної моделі сенсора або на основі машинного навчання [4].

Таким чином, застосовування різних методів лінеаризації дозволяє підвищити точність вимірювань. Однак, кожний з цих методів або звужує діапазон або призводить до появи додаткових похибок від лінеаризації.

З часом, в процесі експлуатації під дією зовнішніх дестабілізуючих факторів параметри ФП сенсора виходять за межі нормованих значень, що може призвести до неприйнятної похибки і, як результат, до браку продукції. Причому, метрологічну відмову, на відміну від звичайної відмови сенсора, важко помітити. Для зниження ризику браку повинно здійснюватися регулярне метрологічне обслуговування, а для підвищення ефективності експлуатації обладнання і зниження матеріальних затрат – якомога швидше і рідше. Щоб знизити такий ризик браку застосовують проводять наступні підходи:

- 1) регулярне метрологічне обслуговування або повірку;
- 2) адаптивні алгоритми корекції або самокалібрування;
- 3) встановлення температурних компенсаторів від впливу зовнішніх температур [5];
- 4) комбінацію різних типів сенсорів з різними характеристиками.

Таким чином, при роботі сенсора з нелінійною ФП виникає ряд проблем по підвищенню точності вимірювання температури, на подолання яких застосовуються різні підходи та їх комбінації. Так, в роботі [6] підвищення точності досягалося за рахунок зменшення похибки від тепловідведення та використанню градуовальної характеристики. Однак, в даній роботі застосування градуовальної характеристики призводить до залежності до кожного конкретного сенсора, що викликає додаткові труднощі при його заміні.

В роботі [7] підвищення точності і чутливості вимірювання відбувалося завдяки компенсації власних шумів шляхом схемотехнічного рішення.

Для розширення діапазону вимірювання в роботі [8] був запропонований покращений алгоритм, який розширює лінійний діапазон вимірювання без зниження точності вимірювання, а в роботі [9] застосування методу фазочутливого виявлення для кремнієвих лавинних фотодіодів дозволило покращити відношення сигнал/шум.

В роботі [10] підвищення точності датчика досягалося за рахунок корекції нелінійної кривизни шляхом вимірювання поправки на нелінійну кривизну при декількох еталонних температурах.

Питання, пов'язані зі зменшенням систематичної похибки вимірювання були розглянуті в роботі [11], де шляхом отримання індивідуальних значень опорів резисторів в масиві датчиків дало можливість зменшити перехресні завади. Таким чином застосування рекурсивних методів дозволило знизити систематичну похибку.

Питання зменшення систематичної похибки вимірювального каналу було також розглянуто в роботі [12]. В даній роботі автори досліджували підвищення точності за рахунок введення відповідних поправок.

Однак, в роботі не було розглянуто питання по отриманню достовірної інформації від датчиків, оскільки результат не давав відповіді на причину змін у показаннях сенсора. Так, в роботі [13] для отримання достовірної інформації від масиву датчиків була застосована апаратна обробка даних, тобто був введений аналоговий інтерфейс. Покращення ефективності обробки отриманих сигналів по запропонованим HD (гіперпросторовим) розрахункам було розглянуто в роботі [14].

Таким чином, активний науковий інтерес до підвищення точності температурних вимірювань при нелінійній ФП сприяє дослідженню в цій області. Це стимулює впровадження нових технологій та підходів, які б дозволили з високою достовірністю контролювати технологічний процес.

1.3. Дослідження поліноміальної функції сенсора

Дослідження спрямоване на аналіз та моделювання поліноміальних функцій перетворення сенсорів температури.

В якості сенсора температури було взято платиновий терморезистор. Даний терморезистор виготовлений з використанням технологій твердотільної електроніки [15], тому характеризуються вищими температурними коефіцієнтами опору. Робота терморезистора заснована на зміні опору від температури: опір терморезистора збільшується із зростанням температури. Платиновий терморезистор широко застосовується не лише завдяки своїй термочутливості і високій точності (в середньому $0,1^{\circ}\text{C}$), а і завдяки тому, що працює в широкому діапазоні температур від -200°C до $+850^{\circ}\text{C}$, що робить його універсальним для широкого використання. Однак, одним з головних недоліків є нелінійність його функції перетворення.

Відомо, що функція перетворення платинового терморезистору, яка визначає залежність між опором терморезистору і вимірювальною температурою в інтервалі від 0 до -200°C , описується формулою Календара-Ван Дусена:

$$R_{T_x} = R_0 \left(1 + A \cdot T_x + B \cdot T_x^2 + C \cdot (T_x - 100) \cdot T_x^3 \right), \quad (1)$$

де T_x – температура, що вимірюється, $^{\circ}\text{C}$;

R_0 – опір терморезистору при температурі 0°C ($R_0 = 100$ Ом для датчика РТ100);

A , B , C – температурні коефіцієнти, які залежать від конкретного типу терморезистору.

Для компенсації нелінійної залежності між його опором і температурою застосовують відомі методи лінеаризації, що дозволяє перетворити вихідну характеристику сенсора з нелінійної в майже лінійну. Для визначення температури за значеннями опору при нелінійній ФП застосовується метод Ньютона або інші ітераційні методи. Як і всім методам,

методу Ньютона притаманні як переваги, так і недоліки. Перевагами даного методу можна вважати швидку збіжність та простоту реалізації. Серед головних недоліків – це його чутливість до початкового наближення T_{00} . Невдалий вибір T_{00} може призвести до отримання неправильного результату або до відсутності збіжності.

Для лінеаризації поліноміальної функції перетворення застосовують і інші методи. Так, наприклад, для отримання лінійного вихідного сигналу необхідно обчислити обернену функцію температури, яка залежить від опору. Для випадку, коли потрібна лінійність в певному вузькому діапазоні, то обирається лише певна ділянка. Але такий підхід не є ефективним для роботи на всьому діапазоні вимірювальних температур. Інші способи лінеаризації – це схемотехнічні рішення, калібрування (для уточнення коефіцієнтів поліномів) та тестування (перевірка точності отриманої лінеаризованої моделі на практиці).

Переваги методів лінеаризації:

- збільшення точності, особливо у вузьких діапазонах температур;
- можливість цифрової реалізації за допомогою мікроконтролера або інших обчислювальних пристроїв.

Недоліки методів лінеаризації:

- звуження діапазону вимірювальних температур;
- потребує ретельного калібрування для точного налаштування поліноміальних коефіцієнтів.

Крім того, всім зазначеним вище методам і підходам також властивий такий недолік як залежність температурних коефіцієнтів A , B , C у виразі (1) від конкретного типу терморезистору. Це призводить до того, що у разі виходу сенсора з ладу, його заміна на ідентичний є складним і не завжди ефективним процесом, оскільки кожний сенсор має свої похибки.

Ще однією з задач вимірювання є те, що через вплив оточуючого середовища та старіння конструктивних елементів, параметри функції перетворення змінюються, що вносить додаткові похибки в результат

вимірювального контролю температури та може вплинути на якість продукції. Для запобігання цього застосовують доволі часті повірки чи калібровку сенсора, що спричиняє матеріальні та часові втрати.

Для комплексно вирішення задачі по підвищенню точності в широкому діапазоні температур при безпосередньому використанні сенсора з нелінійною функцією перетворення доцільно застосування методів надлишкових вимірювань. Це обумовлено використанням запропонованих рівнянь надлишкових вимірювань, яке забезпечує незалежність результату вимірювань від абсолютних значень параметрів функції перетворення та їх відхилень від номінальних значень. Подальший розвиток надлишкові вимірювання при нелінійних функції перетворення отримали в роботі [16–23], де було розглянуті шляхи зменшення впливу як систематичної, так і випадкової складових похибки вимірювання.

1.4. Суть надлишкових методів температури

Сутність методів надлишкових вимірювань полягає у вимірювальному перетворенні температури не лише від досліджуваного об'єкта, а і від джерела з нормованими характеристиками. Таким чином, в основі математичних моделей методів надлишкових вимірювань покладено формування надлишковості (необхідної і достатньої) кількості рядів фізичних величин, розміри яких пов'язані між собою за певними законами (арифметична чи геометрична прогресія), з метою подальшого складання системи нелінійних рівнянь величин для отримання рівняння надлишкових вимірювань. Математичні моделі методів надлишкових вимірювань розрізняються як за видом функції перетворення вимірювального каналу, так і за вибраними рядами перетворюваних фізичних величин. При використанні арифметичної прогресії в надлишкових методах замість терміну «різниця арифметичної прогресії» використовується поняття «нормована фізична величина» ($\pm \Delta x_0$), а при використанні геометричної прогресії в якості «знаменника геометричної

прогресії» – поняття коефіцієнт $k_{\text{л}}$ локальної лінеаризації. Причому, геометричну прогресію застосовують, коли є можливість змінювати параметри ФП сенсора. Зазвичай застосовують арифметичну прогресію, оскільки її фізично легше реалізувати на практиці.

При застосуванні арифметичної прогресії для випадку, коли фізична величина має направлену дію (наприклад, струм), то в цьому випадку шукану величину x_i можна змінювати на нормовану за значенням величину Δx_0 , наприклад, $(x_i + \Delta x_0)$ чи $(x_i - \Delta x_0)$. У випадку, коли шукана величина x_i має ненаправлену дію (наприклад, потік випромінювання) і операцію віднімання провести не можливо, то в цьому випадку застосовується додаткове формування фізичних величин нормованого значення, наприклад, $\{x_2\} = \{x_0\} + \{\Delta x_0\}$ і $\{x_3\} = \{x_0\} - \{\Delta x_0\}$.

В результаті, при створенні математичної моделі, кожний такий такт вимірювання описується відповідним рівнянням величин, яке описує фізичну природу перетворення сигналів в сенсорі. Кількість рівнянь повинна бути більше за кількість параметрів ФП сенсора. Сукупність таких рівнянь величин складають систему, рішення якої дає можливість отримати рівняння надлишкових вимірювань шуканої величини – температури. Така система рівнянь величин і виведене з неї рівняння надлишкових вимірювань становлять математичну модель методів надлишкових вимірювань.

З загальному вигляді, при нелінійній ФП система рівнянь може бути записано в такий спосіб:

$$\begin{cases} y_{\text{н}1} = f(x_1, S'_{\text{н}}, S'_{\text{л}}) + \Delta y; \\ y_{\text{н}2} = f(x_2, S'_{\text{н}}, S'_{\text{л}}) + \Delta y; \\ \dots \\ y_{\text{н}n} = f(x_i, x_2, S'_{\text{н}}, S'_{\text{л}}) + \Delta y, \end{cases} \quad (2)$$

де $y_{\text{н}n}$ – вихідні сигнали сенсора;

x_i – вимірювальна величина;

x_1, x_2 – нормовані за значенням величини;

S'_H, S'_L – крутість перетворення нелінійної і лінійної складової ФП сенсора;

Δy – параметр (зміщення) ФП з врахуванням адитивної складової похибки.

Рішення системи (2) дає можливість вивести рівняння надлишкових вимірювань:

$$x_i = F(y_{H1}, \dots, y_{Hn}, x_1, x_2). \quad (3)$$

Як видно з рівняння (3), результат вимірювального перетворення фізичних величин не залежить від параметрів ФП сенсора та їх відхилення від номінального значення.

Таким чином, методи надлишкових вимірювань забезпечують лінійну залежність результату вимірювання від вхідної величини, а також автоматичне виключення систематичних складових похибки, що обумовлені зміною параметрів ФП під дією дестабілізуючих факторів.

Висновки до розділу 1

Були розглянуті основи температурних вимірювань та їх методи. Акцентовано науковий інтерес до підвищення точності температурних вимірювань при нелінійній функції перетворення сенсора, оскільки від точності вимірювання сенсором буде залежати вся подальша точність вимірювання. В якості сенсора температури було взято платиновий терморезистор завдяки своїй термочутливості, широкому діапазону вимірюваних температур і високій точності.

Оскільки функція перетворення терморезистора має нелінійний характер, то були розглянуті методи для компенсації цієї нелінійної залежності. Також було вказано, що через вплив оточуючого середовища та старіння конструктивних елементів, параметри функції перетворення змінюються, що вносить додаткові похибки в результат вимірювального контролю температури та може вплинути на якість продукції. Для комплексно вирішення задачі по підвищенню точності вимірювання в широкому діапазоні температур при безпосередньому використанні сенсора з нелінійною функцією перетворення запропоновано застосування методів надлишкових вимірювань. Методи надлишкових вимірювань забезпечують лінійну залежність результату вимірювання від вхідної величини, а також автоматичне виключення систематичних складових похибки, що обумовлені зміною параметрів ФП під дією дестабілізуючих факторів.

РОЗДІЛ 2. АЛГОРИТМІЧНІ КОМПОНЕНТИ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

2.1. Загальний алгоритм застосування надлишкових методів

Як відомо, алгоритмом називають систему правил для вирішення певного класу задач. Тож, виходячи з суті методів надлишкових вимірювань, загальний алгоритм їх роботи можна представити наступним чином:

1. Визначається вид ФП і кількість n невідомих параметрів ФП.
2. Виводиться допустимі межі похибок вимірювання.
3. Складається система з $(n+1)$ або більше рівнянь величин.
4. Виводиться рівняння вимірювання шуканої фізичної величини і обчислюється його значення.
5. Отримані значення шуканої фізичної величини порівнюється з встановленими допусками.
6. За результатами, отриманих в п.5, приймається рішення про регулюванню технологічного процесу.

Загальний алгоритм роботи надлишкових методів є універсальним для сенсорів з будь-якими ФП як лінійними, так і нелінійними. Складність реалізації методів надлишкових вимірювань полягає в складанні системи з $(n+1)$ або більше рівнянь величин. Це обґрунтовано порядком степені полінома: чим більша степінь, тим більшу кількість рівнянь в системі необхідно сформулювати.

Загальний алгоритм роботи надлишкових методів наведено на рис.1.

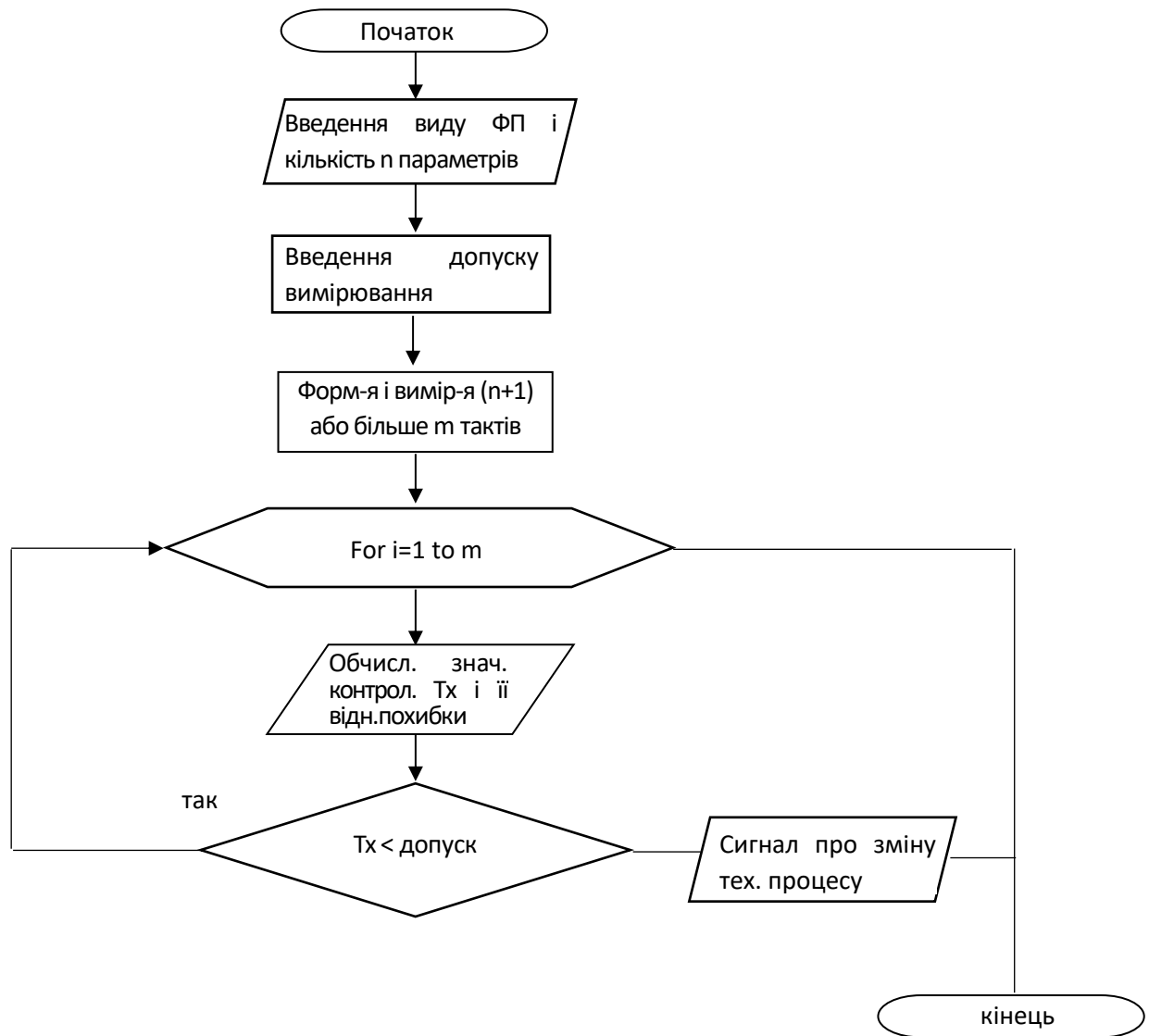


Рис. 1 – загальний алгоритм роботи МНВ

Оскільки, в основі роботи алгоритму лежить математична модель процесу температурних вимірювань, то спочатку необхідно описати і дослідити математичну модель сенсора, що має нелінійну ФП.

2.2. Математична модель методів надлишкових вимірювань температури

Математична модель будується при наявності апріорної інформації про об'єкт контролю і показує вплив факторів, що чинять дію на об'єкт контролю,

а також вид функції перетворення вхідних і вихідних сигналів у сенсорі. Математична модель об'єкту дослідження повинна адекватно описувала реальний стан речей.

Згідно з алгоритмом роботи методів надлишкових вимірювань, першим кроком є визначення виду і кількості параметрів ФП сенсора.

Як було зазначено в розділі 1, ФП терморезистора описується рівнянням (1). Наведена поліноміальна функція сенсора має 5 невідомих параметрів. Оскільки поліном в рівнянні (1) має третю степінь, то для формування надлишковості потрібно більше ніж 5 додаткових вимірювань. Для реалізації додаткових тактів вимірювань необхідно сформувати декілька нормованих за значенням температур.

При розробці математичної моделі надлишкових вимірювань для терморезистора з поліноміальною ФП було запропоновано формування чотирьох нормованих за значенням додаткових температур $T_1 \div T_4$, причому їх величини можна представити наступним чином: $\{T_1\} = \{T_0\} - \{\Delta T\}$, $\{T_2\} = \{T_0\} - 2\{\Delta T\}$, $\{T_3\} = \{T_0\} + \{\Delta T\}$, $\{T_4\} = \{T_0\} + 2\{\Delta T\}$. Зазначені величини додаткових температур формуються за допомогою стандартних джерел з нормованими характеристиками. Крім того, для формування більш ніж 5 тактів вимірювання додаткових температур в загальний цикл вимірювання були додані такти вимірювання одночасного вимірювання шуканої температури разом з додатковими: $\{T_x\} + \{T_1\}$, $\{T_x\} + \{T_2\}$, $\{T_x\} + \{T_3\}$ та $\{T_x\} + \{T_4\}$. Слід зауважити, що при застосуванні запропонованої математичної моделі вважається було прийняте спрощення, яке полягає в тому, що за час проведення всього циклу вимірювання параметри ФП терморезистора залишаються сталими.

Таким чином, була складена система рівнянь величин, що описує вісім тактів вимірювань:

$$\begin{cases}
R_{Tx1} = R_0 \left(1 + A \cdot (T_0 - \Delta T) + B \cdot (T_0 - \Delta T)^2 + C \cdot (T_0 - \Delta T - 100) \cdot (T_0 - \Delta T)^3 \right); \\
R_{Tx2} = R_0 \left(1 + A \cdot (T_0 - 2\Delta T) + B \cdot (T_0 - 2\Delta T)^2 + C \cdot (T_0 - 2\Delta T - 100) \cdot (T_0 - 2\Delta T)^3 \right); \\
R_{Tx3} = R_0 \left(1 + A \cdot (T_0 + \Delta T) + B \cdot (T_0 + \Delta T)^2 + C \cdot (T_0 + \Delta T - 100) \cdot (T_0 + \Delta T)^3 \right); \\
R_{Tx4} = R_0 \left(1 + A \cdot (T_0 + 2\Delta T) + B \cdot (T_0 + 2\Delta T)^2 + C \cdot (T_0 + 2\Delta T - 100) \cdot (T_0 + 2\Delta T)^3 \right); \\
R_{Tx5} = R_0 \left(1 + A \cdot (T_x + T_0 - \Delta T) + B \cdot (T_x + T_0 - \Delta T)^2 + C \cdot (T_x + T_0 - \Delta T - 100) \cdot (T_x + T_0 - \Delta T)^3 \right); \\
R_{Tx6} = R_0 \left(1 + A \cdot (T_x + T_0 - 2\Delta T) + B \cdot (T_x + T_0 - 2\Delta T)^2 + C \cdot (T_x + T_0 - 2\Delta T - 100) \cdot (T_x + T_0 - 2\Delta T)^3 \right); \\
R_{Tx7} = R_0 \left(1 + A \cdot (T_x + T_0 + \Delta T) + B \cdot (T_x + T_0 + \Delta T)^2 + C \cdot (T_x + T_0 + \Delta T - 100) \cdot (T_x + T_0 + \Delta T)^3 \right); \\
R_{Tx8} = R_0 \left(1 + A \cdot (T_x + T_0 + 2\Delta T) + B \cdot (T_x + T_0 + 2\Delta T)^2 + C \cdot (T_x + T_0 + 2\Delta T - 100) \cdot (T_x + T_0 + 2\Delta T)^3 \right).
\end{cases} \quad (4)$$

де R_{Txi} – значення опору терморезистору в кожному i -му ($i=(1\div 8)$) такті вимірювання;

ΔT і T_0 – нормовані за значеннями температури, які сформовані за допомогою стандартних джерел.

В результаті рішення системи (4) було отримане рівняння надлишкових вимірювань шуканої температури T_x :

$$T_x = \frac{\left((R_{Tx8} - R_{Tx6} - 2(R_{Tx7} - R_{Tx5})) - (R_{Tx4} - R_{Tx2} - 2(R_{Tx3} - R_{Tx1})) \right) (4T_0 - 100)}{4 \left((R_{Tx4} - R_{Tx2} - 2(R_{Tx3} - R_{Tx1})) \right)}. \quad (5)$$

Як видно з рівняння надлишкових вимірювань (5), завдяки операції віднімання вихідних сигналів сенсора у чисельнику та знаменнику виключається адитивна складова похибки вимірювання, а завдяки реалізації операції ділення отриманих різниць вихідних сигналів виключається мультиплікативна складова систематичної похибки. Таким чином, значення

шуканої температури не залежить від значень параметра R_0 , коефіцієнтів A , B , C та їх відхилень від номінальних значень.

Крім того, завдяки обробці результатів вимірювання по запропонованому рівнянню надлишкових вимірювань (5), значення вимірювальної температури отримують безпосередньо, без застосування методів лінеаризації, ітераційних методів або додаткових схемотехнічних рішень.

Для правильного розуміння і інтерпретації математичного опису фізичних перетворень, що відбуваються при температурних надлишкових вимірювань терморезистором з поліноміальною ФП, необхідно перевірити запропоновану модель на адекватність.

2.3. Перевірка адекватності запропонованої математичної моделі при поліноміальній функції перетворення

Оцінка адекватності математичних моделей є важливим аспектом при дослідженнях, оскільки показує ступінь довіри до отриманих даних, тобто наскільки запропонована математична модель відповідає концептуальній. При перевірці моделі перевіряється ступінь збігу моделі і реальної системи, тобто розраховується похибка адекватності. При цьому, чим похибка адекватності менше, тим точнішою (при модулюванні об'єкта) є задана залежність параметру стану від рівня вхідного фактору.

Збільшення похибки адекватності моделі може бути зумовлене різними чинниками, які можна поділити на дві групи. До першої групи відносяться випадкові похибки, які можуть бути спричинені неповнотою вихідних даних, недостатньою інформацією про зовнішні впливи або їх ігнорування. Друга група включає систематичні похибок, які є результатом обмежень, зроблених під час створення математичної моделі.

Для проведення оцінки адекватності спочатку проводять розрахунки результатів моделювання, в результаті чого отримують великий об'єм даних. Зазвичай, при цьому, використовують такі підходи:

- моделювання проводиться для випадку, коли комбінація рівнів параметрів вибирається випадково;
- моделювання проводиться з одним первинним параметром і декількома вторинними.

Таким чином робиться перевірка на наявність залежності між вхідними параметрами і вихідними характеристиками існує. Далі такі залежності представляються у вигляді функцій, графіків, таблиць тощо. У випадку, якщо такої функціональної залежності між вхідними параметрами і вихідними характеристиками відсутні, то отримані дані обробляються незалежно один від одного за правилами математичної статистики по визначенню законів розподілу вихідної характеристики, по обчисленню математичного очікування, дисперсії тощо. З математичної статистики відомо, що при збільшенні кількості результатів вимірювань знижується випадкова складова похибки, що підвищує точність і достовірність.

У разі виявлення неадекватності математичної моделі виникає необхідність у її коригуванні. Для цього спочатку з'ясовуються причини, що викликали таку неадекватність, а потім шукають шляхи їх усунення. Після редагування моделі вона знову перевіряється на адекватність. Процес корегування продовжується до тих пір, поки точність результатів моделювання не буде знаходитися в межах допуску.

В загальному випадку, для визначення похибки адекватності моделі, можуть бути використані середні значення відхилень характеристик, отриманих в системі (експериментальним шляхом) і в моделі:

$$\delta_M = y_{\text{ек}} - y_T, \quad (6)$$

де $y_{\text{ек}}$ – значення вимірюваного параметра, що отримане експериментальним шляхом;

$y_{\text{т}}$ – теоретичне значення вимірюваного параметра.

У випадку, коли функція змінюється в широкому діапазоні, похибка адекватності моделі визначається як відносна:

$$\delta_{\text{м}} = \frac{|y_{\text{ек}} - y_{\text{т}}|}{y_{\text{т}}} \cdot 100\%. \quad (7)$$

Таким чином, для перевірки математичної моделі, що описана рівнянням (5), на адекватність у відповідності до виразу (7) отримаємо похибку адекватності моделі при вимірюванні температури T_x виду:

$$\delta_{\text{м}} = \left| \frac{T_{\text{ек}} - T_{\text{т}}}{T_{\text{т}}} \right| \cdot 100\%, \quad (8)$$

де $T_{\text{ек}}$ – значення температури, що отримане експериментальним шляхом;

$T_{\text{т}}$ – теоретичне значення температури.

Теоретичне значення температури платинового терморезистора, визначається на основі зміни електричного опору платини зі зміною температури виходячи з паспортних даних сенсора [24]. Причому точність складатиме $\pm 0.3 - 0.8$ °C (в діапазоні $0 - 450$ °C), тобто із збільшенням температури значення похибки теж збільшується.

Для визначення значення температури надлишковими методами в якості засобу програмного засобу для математичного моделювання і комп'ютерного аналізу отриманих результатів було обрано програмне забезпечення Mathcad15.0. В якості сенсора з було обрано платиновий терморезистор PT100 з наступними параметрами: коефіцієнт $A=3,9083 \cdot 10^{-3}$

Ом/°С; коефіцієнт $B = -5,775 \cdot 10^{-7}$ Ом/°С², коефіцієнт $C = -4,183 \cdot 10^{-12}$ Ом/°С⁴, діапазон вимірюваних температур $T_x = (-1 \div -200)$ °С.

Для цього були задані значення нормованих величин: $T_0 = -100$ °С та $\Delta T = 5$ °С. При розрахунках були задані відхилення параметрів ФП в межах ± 1 %, а також були задані похибки відтворення нормованих величин $T_1, \dots, T_4$ в межах $\pm 0,02$ °С. Слід зазначити, що така точність відтворення нормованих за значенням величин $T_1, \dots, T_4$ обумовлена тим, що їх формує каліброване джерело з нормованими характеристиками.

В результаті проведених розрахунків було отримано похибку на всьому робочому діапазоні вимірювальних температур T_x від -1 °С до -200 °С, що становить від $\pm 0,0002$ °С до $\pm 0,04$ °С. Тенденція збільшення похибки при збільшенні значення температури залишається як і при теоретичних даних.

В результаті розрахунків похибки адекватності моделі згідно з виразом (8) було отримано значення похибки на початок діапазону:

$$\delta_M = \left| \frac{T_{ек} - T_T}{T_T} \right| \cdot 100\% = \left| \frac{-1,0002 - (-1,0)}{-1,0} \right| \cdot 100\% = 0,02\%$$

і на кінці діапазону:

$$\delta_M = \left| \frac{T_{ек} - T_T}{T_T} \right| \cdot 100\% = \left| \frac{-200,04 - (-200)}{-200} \right| \cdot 100\% = 0,02\%.$$

Таким чином, розрахунки похибки адекватності моделі згідно з виразом (8) показали, що відхилення експериментальних даних методами надлишкових вимірювань від теоретичних становить $\delta_M = 0,02\%$ і не перевищує 3%. Тобто запропонована математична модель методу надлишкових вимірювань може бути визнана адекватною.

Це дає підставу стверджувати про високу точність методів надлишкових вимірювань. Крім того, запропоновану математичну модель можна безпосередньо використовувати при нелінійній ФП без додаткових заходів по її лінеаризації.

Слід зазначити, що навіть при збільшенні похибки відхилення параметрів ФП в межах $\pm 10\%$, значення відносної похибки вимірювання не змінюється і залишається на рівні $0,02\%$ на всьому робочому діапазоні вимірювальних температур. Це підтверджує незалежність результат надлишкових вимірювань від зміни параметрів ФП.

2.4. Алгоритм роботи надлишкових методів при поліноміальних функцій сенсора

На основі запропонованої математичної моделі в розділі 2.2 і загального алгоритму, що представлений на рис. 1, була розроблена блок-схема алгоритму вимірювання температури при поліноміальній ФП терморезистора. Даний алгоритм має більш детальну структуру ніж на рис.1, оскільки описує послідовність виконання кожного кроку такту вимірювань з урахуванням особливостей роботи методу надлишкових вимірювань при поліноміальній функції перетворення терморезистора.

Алгоритм роботи надлишкових методів при поліноміальній функції терморезистора наведено на рис.2.

Першим кроком алгоритму, який працює у відповідності до побудованої математичної моделі, є введення тих параметрів сенсора, які заявлені в його паспортних даних: значень опір R_0 терморезистору при температурі $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($R_0 = 100\text{ Ом}$ для датчика PT100) та температурних коефіцієнтів A, B, C.

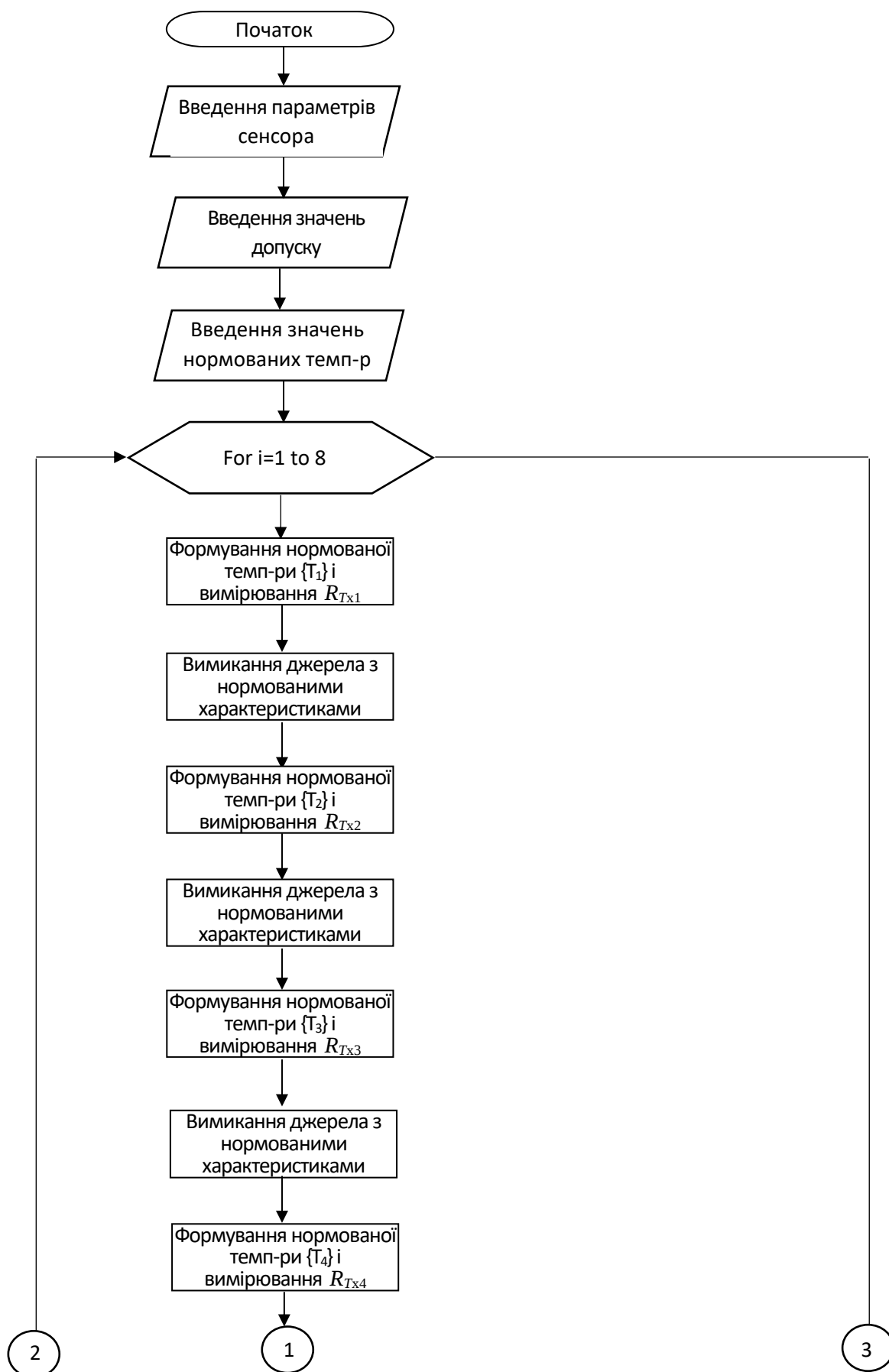


Рис. 2. Алгоритм роботи надлишкових методів при поліноміальний ФП

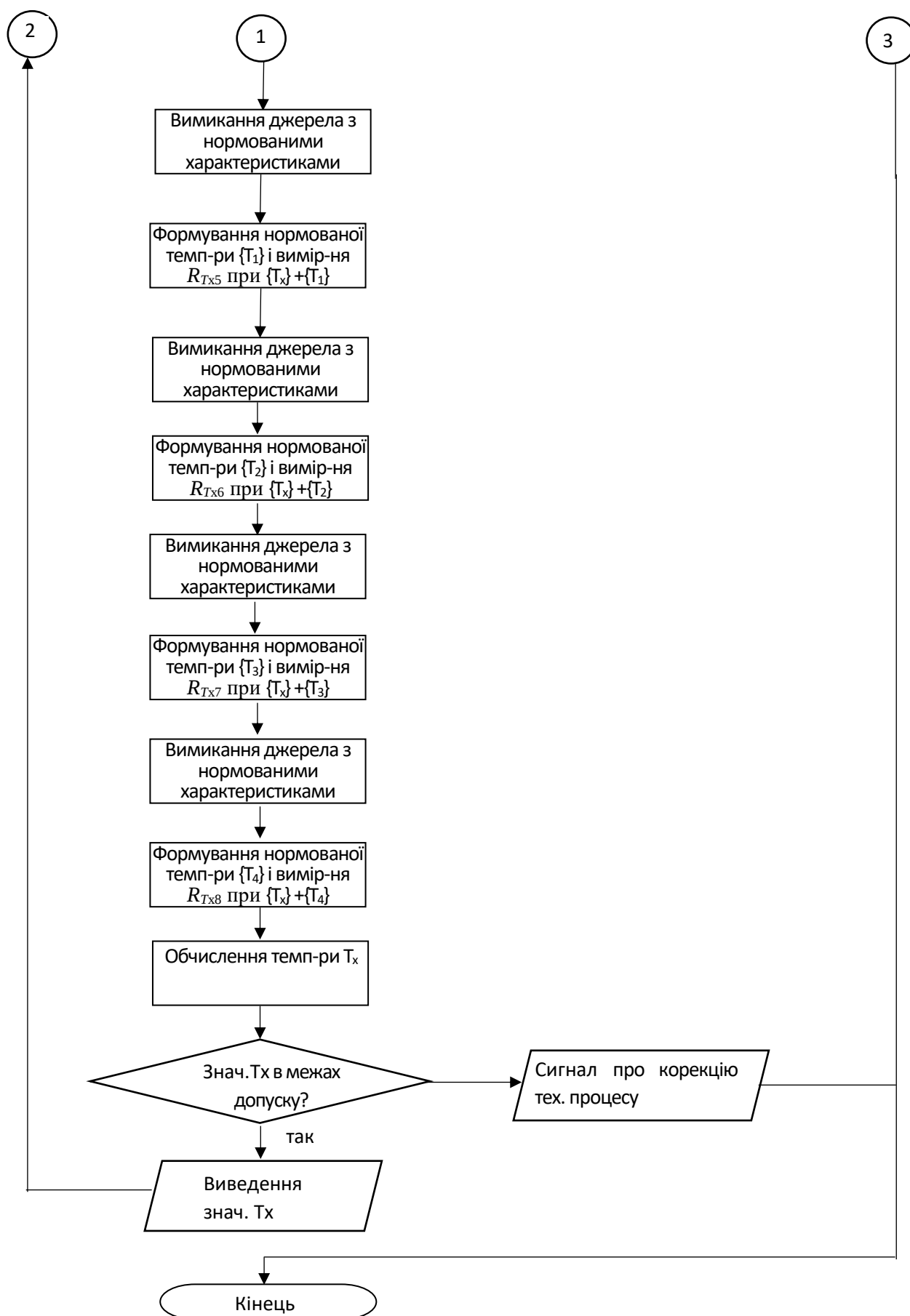


Рис. 2 (продовження). Алгоритм роботи надлишкових методів при поліноміальний ФП

На другому кроці вводиться значення допуску, тобто похибки, з якою необхідно проводити вимірювання і, якщо результат вимірювання вийде за межі цих значень, то таке вимірювання вважається непридатним і свідчить про порушення технологічного процесу.

На третьому кроці алгоритму відбувається введення значень чотирьох нормованих температур $T_1 \div T_4$, значення яких представлені в якості наступним складових: $\{T_1\} = \{T_0\} - \{\Delta T\}$, $\{T_2\} = \{T_0\} - 2\{\Delta T\}$, $\{T_3\} = \{T_0\} + \{\Delta T\}$, $\{T_4\} = \{T_0\} + 2\{\Delta T\}$.

Після блоку введення значень починається цикл вимірювань по запропонованій математичній моделі. Даний цикл складається з 8 тактів вимірювання. В першому такті відбувається формування першої нормованої температури T_1 шляхом вмикання джерела з нормованими характеристиками. Після вимірювання відповідного опору R_{Tx1} терморезистора джерело з нормованими характеристиками вимикається. Наступні три такти вимірювання проходять аналогічним чином шляхом формування нормованих температур T_2 , T_3 та T_4 , в результаті чого отримують три значення опору терморезистору R_{Tx2} , R_{Tx3} та R_{Tx4} . В п'ятому такті циклу знову формується перша нормована температура T_1 шляхом вмикання джерела з нормованими характеристиками, але вимірюється не лише вона, а разом з шуканою температурою T_x , тобто відбувається одночасне вимірювання як шуканої температури T_x так і першої нормованої температури $\{T_1\}$: $\{T_x\} + \{T_1\}$, в результаті чого отримують значення опору терморезистору R_{Tx5} . Після вимірювання відповідного опору R_{Tx5} джерело з нормованими характеристиками вимикається. Наступні три такти вимірювання проходять аналогічним чином, тобто шляхом формування нормованих температур T_2 , T_3 , T_4 та їх вимірювання разом з шуканою температурою T_x . В результаті чого отримують три значення опору терморезистору R_{Tx6} , R_{Tx7} та R_{Tx8} .

Після проведення всіх 8 тактів вимірювання, що складають 1 цикл, за рівнянням (5) відбувається розрахунок шуканої температури T_x .

Наступним кроком алгоритму є перевірка на відповідність отриманого результату встановленим допускам. Якщо значення не перевищує встановленої норми допуску, то результат виводиться на екран користувача і цикл повторюється далі. Якщо ж отримане значення шуканої температури T_x виходить за межі встановлених допусків, то це свідчить про порушення технологічного процесу, і видається сигнал користувачу про корекцію технологічного процесу: зупинку вимірювань або зміну значень нормованих температур.

Запропонований алгоритм спрямований на отримання високоточного значення шуканої температури T_x при нестабільній поліноміальній ФП терморезистору, яке приведено до входу. Таким чином, перевагою даного алгоритму є те, що він дозволяє підвищити точність вимірювання шуканої температури T_x без використання додаткових заходів по її лінеаризації за рахунок обробки результатів вимірювання за запропонованим рівнянням надлишкових вимірювань.

Крім того, отримане значення температури T_x не залежить від параметрів ФП, що, в свою чергу, дозволяє планувати і розробляти організаційно-технічні заходи щодо заміни сенсора.

Таким чином, науковий інтерес представляє вплив на результат вимірювання введених значень нормованих температур $T_1 \div T_4$ та їх складових.

2.5. Дослідження впливу нормованих значень температур на результат вимірювання

Розглянемо вплив на результат надлишкових вимірювання значень нормованих температур $T_1 \div T_4$ та їх складових.

При дослідженні і для математичного моделювання було обрано програмне забезпечення Mathcad15.0.

У першу чергу мета дослідження полягала в тому, щоб визначити вагомість кожної з нормованих температур $T_1 \div T_4$ та їх складових на результат

вимірювання. На початку досліджень були встановлені значення складових нормованих температур $T_0 = -100^\circ\text{C}$ та $\Delta T = 5^\circ\text{C}$, причому були задані похибки відтворення нормованих температур в межах $\pm 0,02^\circ\text{C}$. Також були задані відхилення параметрів ФП в межах $\pm 10\%$. В результаті, на всьому робочому діапазоні температур T_x від -1°C до -200°C було отримано відносну похибку на рівні $0,02\%$ (рис. 3). Це підтверджує твердження про високу точність методів надлишкових вимірювань.

Крім того, встановлено, що при збільшенні похибки відхилення параметрів ФП від їх паспортних даних (з $\pm 1\%$ до $\pm 10\%$), значення результату вимірювання не змінюється, тобто результати надлишкових вимірювань є незалежними від зміни параметрів ФП. Це відкидає необхідність у встановленні точних значень параметрів і коефіцієнтів для кожного конкретного типу терморезистору, що робить застосування надлишкових методів універсальним.

Крім того, запропоноване рівняння надлишкових вимірювань можна використовувати безпосередньо при поліноміальній ФП без додаткової лінеаризації.

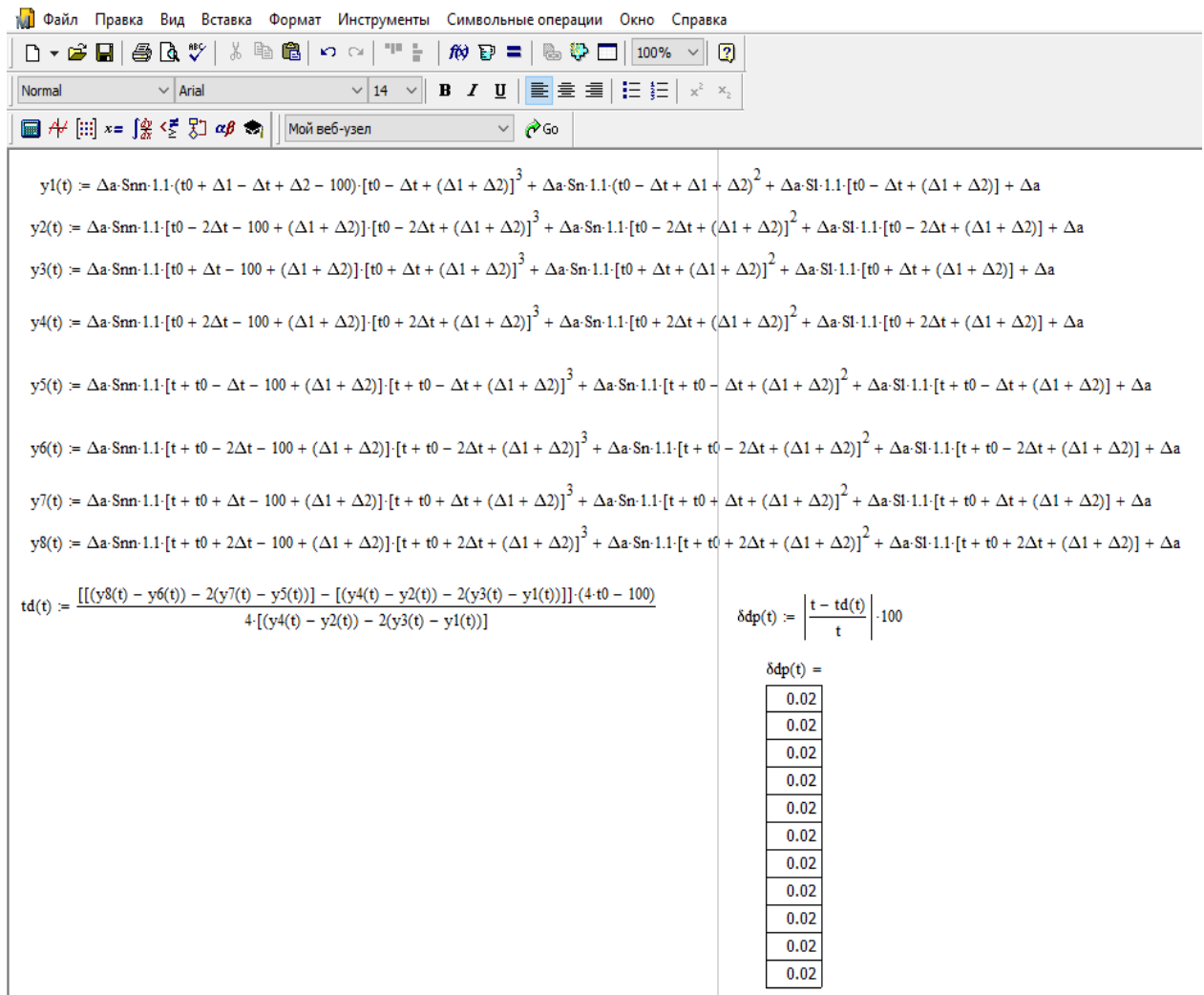


Рис. 3. Моделювання математичної моделі надлишкових методів при поліноміальній ФП терморезистора

Подальші дослідження проводилися при встановленні «перехресних» значень нормованих температур: $T_0 = -5^\circ\text{C}$ і $\Delta T = 100^\circ\text{C}$, причому відхилення параметрів ФП залишалися в межах $\pm 10\%$. В результаті було отримано відносну похибку на рівні $0,07\%$.

В результаті досліджень було встановлено більш вагомий вплив нормованої температури T_0 більше, ніж величина ΔT .

Подальші дослідження були спрямовані на встановлення зв'язку між значеннями нормованої температури T_0 та значення відносної похибки ($\delta\%$) результату вимірювання. Оскільки найкращі результати за точністю були отримані при значенні $T_0 > \Delta T$, то моделювання проводилося при значеннях T_0

і ΔT , що лежать в наступних діапазонах значень: $T_0=(-1\div-100)^\circ\text{C}$ і $\Delta T=(-1\div60)^\circ\text{C}$. Отримані результати залежності відносної похибки ($\delta\%$) від значень нормованих величин T_0 і ΔT на початку робочого діапазону при $T_x=-1^\circ\text{C}$ представлені в табл.1.

Таблиця 1. Характер змін відносної похибки вимірювань ($\delta\%$) від змін значень нормованих температур T_0 і ΔT

$\Delta T, (^\circ\text{C}) \backslash T_0, (^\circ\text{C})$	-1	15	30	45	60
-1	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
-10	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
-21	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
-30	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
-40	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
-50	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
-60	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
-70	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
-80	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
-90	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
-100	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02

Аналогічне моделювання при тих же значеннях параметрів ФП і заданих похибок проводилося не лише на початку, а всередині і на кінці діапазону вимірювальних температур T_x від -1°C до -200°C . Отримані результати показали ідентичні, як і в табл.1, результати значень відносної похибки вимірювання $\delta(\%)$.

Таким чином, можна зробити висновок, що на результат надлишкових вимірювань при поліноміальній ФП більший вплив чинить значення нормованої температури T_0 і майже не впливає величина нормованої температури ΔT на всьому діапазоні вимірюваних температур T_x . Причому, виявляється певна закономірність: при збільшенні значення нормованої температури T_0 значення відносної похибки зменшується. Виходячи з даних,

що наведені в табл.1, найкращі результати по точності були отримані при значенні $|T_0| > -60^\circ\text{C}$.

На основі залежності результату вимірювання від значення нормованої температури T_0 , було проведено подальше моделювання розробленої математичної моделі для з'ясування залежності між значеннями вимірювальної температури і нормованими. Дослідження проводилися на початку діапазону при $T_x = -1^\circ\text{C}$. Для цього було збільшено діапазон значень температур T_0 і ΔT : $T_0 = (-1 \div -251)^\circ\text{C}$ і $\Delta T = (-1 \div 59)^\circ\text{C}$ з похибкою відтворення нормованих температур в межах $\pm 0,1^\circ\text{C}$ і при відхиленні параметрів ФП в межах $\pm 10\%$.

Результати дослідження представлені у вигляді поверхні (рис.4) залежності похибки вимірювання від значень нормованих температур.

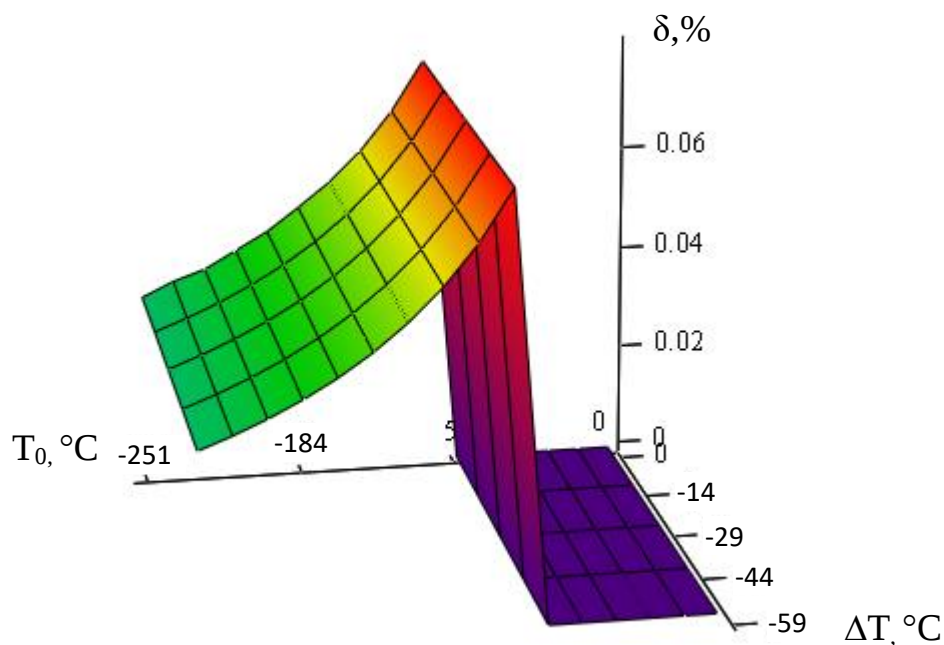


Рис.4. Залежність похибки вимірювання від значень нормованих температур T_0 і ΔT

З наведеного графіку прослідковується також певне співвідношення між результатом вимірювання і значенням нормованої температури T_0 .

Слід зауважити, що такі результати отримують у випадку, коли зміна параметрів ФП та її коефіцієнтів залишаються сталими за час проведення всього циклу вимірювання (восьми тактів).

2.6. Встановлення співвідношення між результатом вимірювання і значенням нормованої температури

Для встановлення співвідношення між результатом вимірювання і значенням нормованої температури T_0 , при якому забезпечується найкращі результати по точності на всьому діапазоні вимірювань, проводилися розрахунки абсолютна похибка вимірювання Δ_T ($^{\circ}\text{C}$) при фіксованому значенні нормованої температури $\Delta T = 5^{\circ}\text{C}$. Для адекватного розуміння стану речей розрахунки проводилися при тих же умовах, що і в попередній випадках при встановленні залежності похибки вимірювання від значень нормованих температур T_0 і ΔT : були задані відхилення параметрів ФП в межах $\pm 10\%$, а також були задані похибки відтворення нормованих величин $T_1, \dots, T_4$ в межах $\pm 0,02^{\circ}\text{C}$.

Результати значень абсолютної похибки вимірювання Δ_T ($^{\circ}\text{C}$) на всьому діапазоні вимірювань в залежності від значень нормованої температури T_0 представлені в табл. 2.

Таблиця 2. Значення абсолютної похибки Δ_T ($^{\circ}\text{C}$) співвідношення між вимірювальною температурою і значенням нормованої температури T_0

$T_0, ^{\circ}\text{C}$	$T_x, ^{\circ}\text{C}$										
	-1	-20	-40	-60	-80	-100	-120	-140	-160	-180	-200
-200	$8,9 \cdot 10^{-5}$	0,002	0,004	0,005	0,007	0,009	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
-130	0,0001	0,003	0,005	0,008	0,010	0,013	0,015	0,018	0,02	0,023	0,025
-100	0,0002	0,003	0,006	0,009	0,012	0,015	0,019	0,022	0,026	0,029	0,032
-60	0,00023	0,005	0,010	0,014	0,019	0,024	0,028	0,033	0,038	0,043	0,047

В результаті проведеного дослідження було підтверджено, що для забезпечення найнижчої похибки вимірювання рекомендовано обирати значення нормованої температури T_0 нижче за -100 °С. Причому, при збільшенні різниці між нормованою і вимірювальною температурою, значення похибки зменшується.

На рис. 5 представлено вплив залежності на абсолютну похибку вимірювання Δ_T співвідношення значень температур T_x і T_0 .

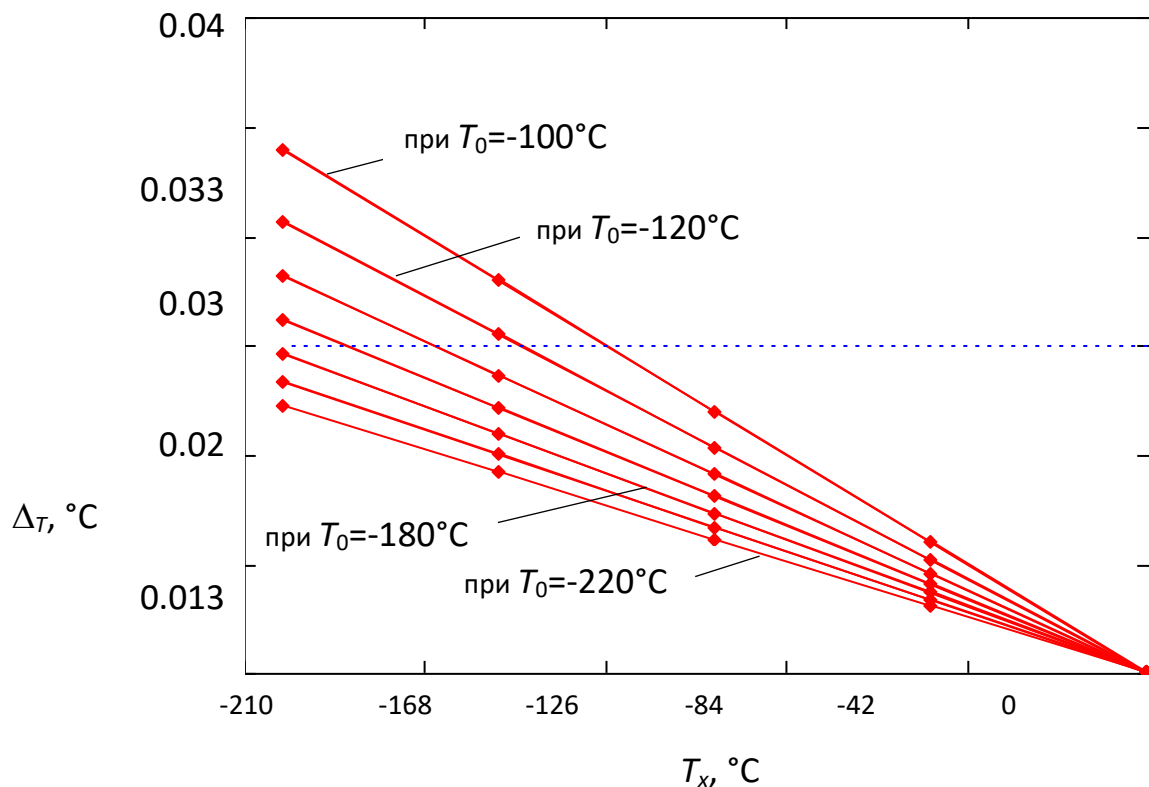


Рис. 5. Графік залежності впливу на значення абсолютної похибки Δ_T співвідношення між температурами T_x і T_0

З наведеного графіку (рис. 5) можна зробити висновок, що рекомендовано обирати значення нормованої температури T_0 нижче за -100 °С. Оптимальне значення, яке було отримано при заданих даних становить -130 °С. Слід зазначити, що збільшення нормованої температури T_0 з -100 °С до -220 °С не суттєво впливає на абсолютну похибку. Значення абсолютної

похибки вимірювання надлишковими методами в даному випадку лежить в діапазоні $(0,08 \cdot 10^{-3} \div 0,03) ^\circ\text{C}$.

2.7. Аналіз впливу методичної похибки

Оскільки всім методам притаманна методична похибка вимірювання, то науковий інтерес представляє міра його впливу на результат вимірювання при застосуванні надлишкових методів.

Однією з вагомих складових методичної похибки надлишкових вимірювань є похибки відтворення нормованих температур, то в роботі було розглянуто їх вплив на результат вимірювання.

Моделювання проводилося при тих же даних, що і попередні розрахунки, але значення похибки відтворення нормованих величин $T_1, \dots, T_4$ було збільшене з $\pm 0,02 ^\circ\text{C}$ до $\pm 0,1 ^\circ\text{C}$ при значеннях нормованих величин $T_0 = (-60 \div -140) ^\circ\text{C}$ та $\Delta T = (-1 \div 60) ^\circ\text{C}$, а також при заданих відхиленнях параметрів ФП в межах $\pm 10\%$. В результаті були отримані значення абсолютної похибки відтворення, що лежать в діапазоні $(0,40 \cdot 10^{-3} \div 0,16) ^\circ\text{C}$.

При дослідженні були також розраховані значення відносної похибки вимірювання $\delta(\%)$ в залежності від значень нормованих величин T_0 і ΔT . Отримані значення відносної похибки вимірювань $\delta(\%)$ при $T_x = -1 ^\circ\text{C}$ (на початку робочого діапазону) наведені в табл. 3.

Таблиця 3. Відносні похибки вимірювань $\delta(\%)$ на початку робочого діапазону при $T_x = -1 ^\circ\text{C}$ при збільшені похибки відтворення нормованих величин до $\pm 0,1 ^\circ\text{C}$

$\Delta T, (^\circ\text{C}) \backslash T_0, (^\circ\text{C})$	-1	15	30	45	60
-60	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
-70	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
-80	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
-90	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
-100	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08

-110	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
-120	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
-130	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
-140	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06

Аналогічні результати, як і в табл. 3, по значенню відносної похибки були отримані на всьому діапазоні вимірюваних температур T_x від $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Аналіз отриманих результатів показав, що при збільшенні значень похибок відтворення нормованих величин $T_1, \dots, T_4$ з $\pm 0,02\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ для забезпечення достатньої похибки вимірювання необхідно збільшувати значення нормованої величини до $|T_0| \geq -130\text{ }^{\circ}\text{C}$. Тобто при збільшенні похибки відтворення нормованих температур необхідно збільшувати значення T_0 .

Таким чином, вплив методичної похибки вимірювання надлишковими методами при поліноміальній ФП терморезистора має несуттєвий вплив на результат вимірювання при виконанні вказаних умов: необхідно відтворювати значення нормованої величини в діапазоні $|T_0| \geq -130\text{ }^{\circ}\text{C}$.

2.8. Порівняння точності надлишкового методу і метода Ньютона

Оскільки ФП платинового терморезистора описується поліноміальною функцією і на пряму визначення температури не можливо, то в цьому випадку, зазвичай, для знаходження температури використовують додаткові методи ітерації. Цей процес визначення температури можна представити наступною послідовністю дій:

1. Вимірювання опору терморезистора R_{Tx} .
2. Підстановка виміряного значення опору терморезистора R_{Tx} в формулу Календара-Ван Дусена (1).
3. Обчислення температури застосовуючи числові методи, такі як метод Ньютона або таблиці калібрування.

Розглянемо метод Ньютона більш детально. Суть методу Ньютона полягає в тому, щоб знайти таке значення T_x , при якому $f(T_x)=0$.

Алгоритм методу Ньютона для визначення температури T_x (при $T_x < 0$ °C) полягає в наступному:

1) обирається початкове наближення температури, яке вибирається як стартова точка для ітераційного процесу. Для поліноміальної функції перетворення платиногового терморезистора, початкове наближення температури T_{00} зазвичай вибирається близьким до очікуваного значення температур, тобто $T_x = T_{00}$;

2) обирається точність обчислень;

3) обчислюється значення функції $f(T_x)$ і її похідної $f'(T_x)$;

4) виконується обчислення ітераційного значення температури:

$$T_{xi} = T_x - \frac{f(T_x)}{f'(T_x)},$$

5) обчислюється модуль різниці між ітераційним значенням температури і очікуваним значенням температури: $|T_{xi} - T_x|$;

6) перевіряється умова $|T_{xi} - T_x| < \text{обрана точність обчислень}$. Якщо зазначена умова виконується, то завершити процес ітерацій, якщо ні – перейти до пункту 3 при значенні $T_x = T_{xi}$.

Застосовуючи метод Ньютона, рівняння (1) можна представити наступним чином:

$$f(T_x) = R_0 \left(1 + A \cdot T_x + B \cdot T_x^2 + C \cdot (T_x - 100) \cdot T_x^3 \right) - R_{Tx} = 0. \quad (9)$$

Початкове наближення температури T_{00} вибирається близьким до очікуваного значення температур. Так, якщо опір R_{Tx} близький до R_0 , то обирається значення $T_{00}=0$ °C. Обираємо значення R_{Tx} , наприклад $R_{Tx}=150$ Ом. Тоді рівняння (9) при $R_0=100$ Ом прийме вид:

$$f(T_x) = 100 \left(1 + A \cdot T_x + B \cdot T_x^2 + C \cdot (T_x - 100) \cdot T_x^3 \right) - 150 = 0.$$

Згідно к кроком 2 алгоритму Ньютона обирається точність обчислень 0,001 °C.

На кроці 3 визначається похідна функції (2):

$$f'(T_x) = R_0 \left(A \cdot 1 + 2B \cdot T_x + C \cdot (4T_x^3 - 300T_x^2 + 3000T_x) \right). \quad (10)$$

Слідуючи наступним крокам алгоритму, отримані значення з рівнянь (9) і (10) підставляються в формулу Ньютона та обчислюється модуль різниці між ітераційним значенням температури і очікуваним значенням температури. Отримане значення модулю різниці перевіряємо з обраною точністю обчислень. У випадку, якщо умова меншості не виконується, то повторюється обчислення T_{xi} до тих пір, поки не буде досягнута задана точність: $|T_{xi} - T_x| < 0,001$ °C.

Програмна реалізація алгоритму метода Ньютона для платиногового терморезуистору, а також графік побудови вихідної характеристики представлені в додатку А. На рис. 6 наведений графік вимірювальної температури за методом Ньютона.

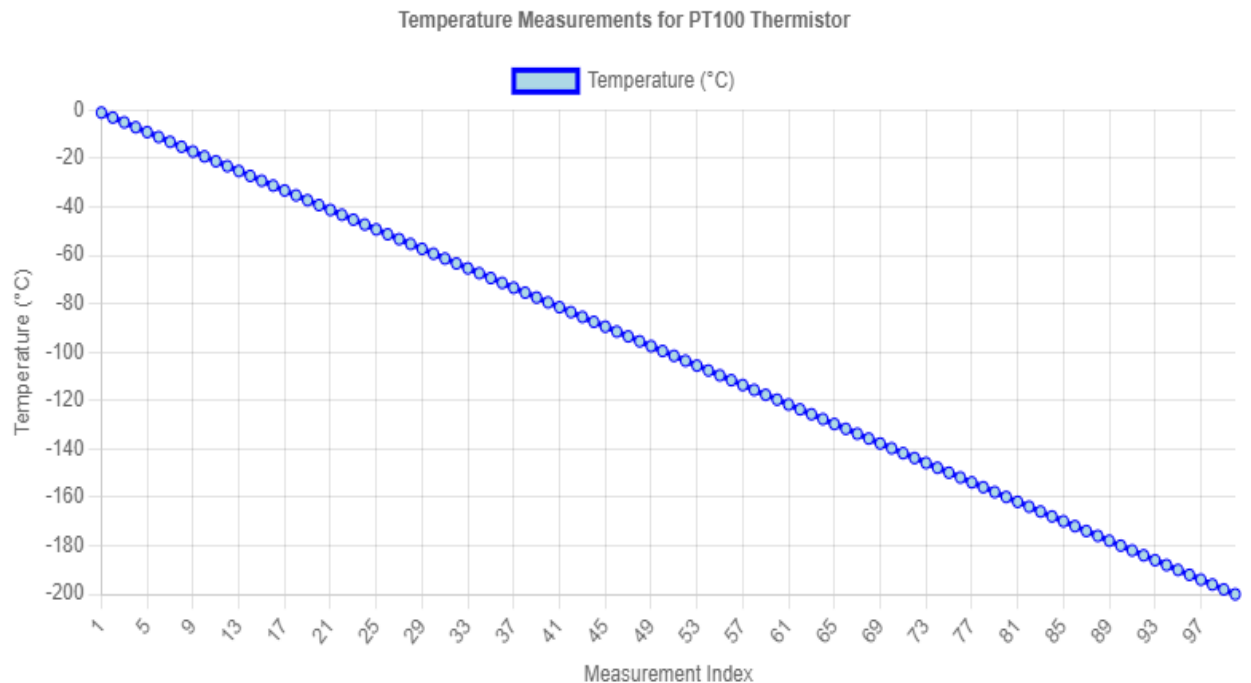


Рис.6. Графік вихідної вимірювальної температури за методом Ньютона

Для адекватного порівняння результатів вимірювання температури методом Ньютона і надлишковим методом при застосуванні поліноміальної ФП терморезистора були задані однакові вхідні дані.

Похибка метода Ньютона, код якого наведено в додатку А, на початку діапазону складає $6,8 \cdot 10^{-6}$ °C, тобто 5 знаків після коми (5 порядків малості) навіть якщо задана точність обчислень задана $1 \cdot 10^{-7}$ °C. Форма, наведена на рис.7, демонструє комп'ютерну реалізацію методу Ньютона за опором терморезистора типу РТ100.

Розрахунок температури за опором терморезистора

Введіть параметри терморезистора:

R_0 (Ом):

A:

B:

C (для $T > 0$):

R (Ом):

Результат:

Температура: -1.000031 °C

Рис.7. Комп'ютерна реалізація методу Ньютона

На кінці діапазону похибка може досягати 3 °C. Така точність обумовлена особливостями метода Ньютона, що робить його придатним для лінійної ділянки характеристики.

У випадку, коли наявні відхилення параметрів ФП в межах $\pm 10\%$, похибка метода Ньютона вже буде складати 0,1 °C на початку діапазону і до 6 °C на кінці діапазону, що є непридатним при застосуванні для поліноміальної терморезистора.

При дослідженні методів надлишкових вимірювань були задані значення нормованих температур $\Delta T = 5\text{ °C}$, $T_0 = -100\text{ °C}$. При розрахунках згідно з рівняння надлишкових вимірювань (5) отримують похибку, що відповідає похибці обчислення самого застосунку, що підтверджує, по-перше, адекватність математичної моделі надлишкових методів, а, по-друге, високу ефективність запропонованого підходу.

У випадку, коли імітуються реальні умови вимірювання, були задані похибки відхилення параметрів ФП в межах $\pm 10\%$, а також задані похибки відтворення нормованих величин $T_1, \dots, T_4$ в межах $\pm 0,02\text{ °C}$. В результаті

комп'ютерного моделювання була отримана відносна похибка вимірювання, що складає 0,02% на всьому діапазоні вимірювань, тобто похибка методів надлишкових вимірювань залежить від похибки відтворення нормованих температур. Причому, абсолютна похибка надлишкових методів буде лежати в діапазоні $(0,00016 \div 0,032)^\circ\text{C}$ на всьому діапазоні вхідних температур (рис. 8).

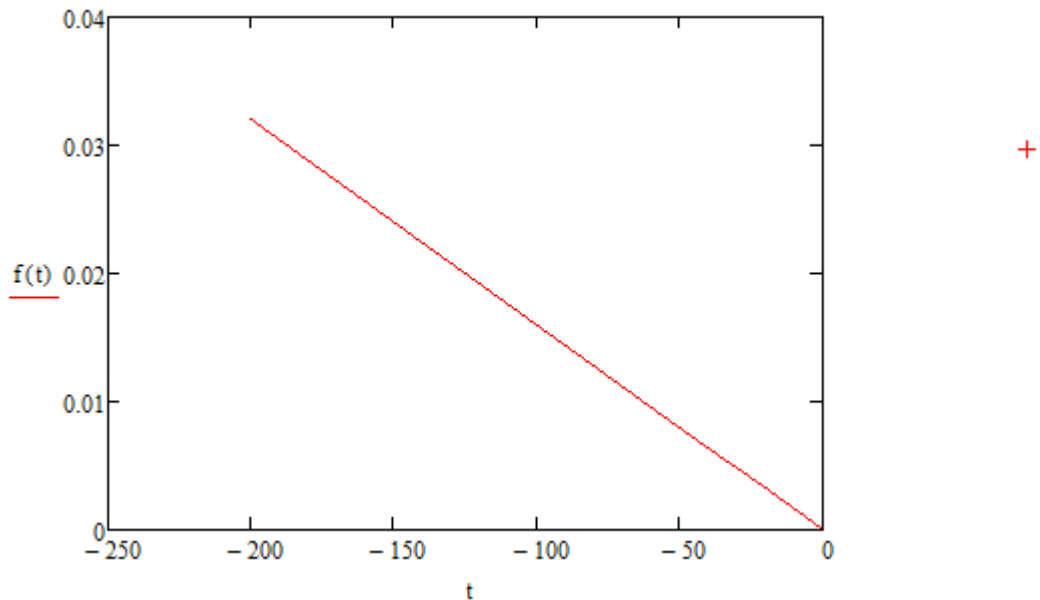


Рис.8. Абсолютна похибка вимірювання

Проведені дослідження підтверджують високу точність і ефективність запропонованої математичної моделі методів надлишкових вимірювань при поліноміальній ФП терморезистора.

Висновки до розділу 2

Було представлено загальний алгоритм роботи надлишкових методів, на основі якого була розроблена математична модель процесу температурних вимірювань при поліноміальній ФП терморезистору. Запропонована математична модель показує вид функції перетворення вхідних і вихідних сигналів у сенсорі та описує кожний такт вимірювання. Таким чином, математична модель представляє собою систему рівнянь величин. Рішення даної системи дає можливість отримати рівняння надлишкових вимірювань, в якому завдяки операції віднімання та ділення виключається, відповідно, адитивна і мультиплікативна складова похибки вимірювання. Це дає можливість безпосередньо застосовувати запропоновану математичну модель при температурних вимірюваннях терморезистором без додаткових заходів по лінеаризації функції перетворення. Також, встановлено, що на результат вимірювання не чинять вплив зміна параметрів функції перетворення ($\pm 1\%$ до $\pm 10\%$), що дає можливість застосовувати запропоновану математичну модель для будь-якого терморезистора без додаткового його калібрування.

Представлена математична модель була перевірена на адекватність, в результаті чого було встановлено високий ступінь довіри до отриманих даних, тобто підтверджена її концептуальність.

На основі запропонованої математичної моделі була розроблена блок-схема алгоритму вимірювання температури при поліноміальній ФП терморезистора, яка описує послідовність виконання кожного кроку такту вимірювань.

Розглянуто вплив на результат надлишкових вимірювання значень нормованих температур $T_1 \div T_4$ та їх складових. В результаті досліджень було встановлено більш вагомий вплив нормованої температури T_0 більше, ніж величина ΔT . Причому, найкращі результати по точності були отримані при значенні $|T_0| > -60^\circ\text{C}$.

Було проведено подальше моделювання розробленої математичної моделі для з'ясування залежності між значеннями вимірювальної температури і нормованими. Рекомендоване оптимальне значення T_0 становить -130°C .

Проведено аналіз методичної похибки вимірювання – похибки відтворення нормованих температур. Встановлено, збільшення похибки відтворення нормованих температур з $\pm 0,02^{\circ}\text{C}$ до $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ призводить до збільшення абсолютної похибки вимірювання з $(8,9 \cdot 10^{-5} \div 0,047)^{\circ}\text{C}$ до $(0,40 \cdot 10^{-3} \div 0,16)^{\circ}\text{C}$ на всьому діапазоні температур. Встановлено, що методична похибка вимірювання надлишковими методами при поліноміальній ФП терморезистора має несуттєвий вплив на результат вимірювання при виконанні вказаних умови, що $|T_0| \geq -130^{\circ}\text{C}$.

Було проведене порівняння результатів вимірювання температури методом Ньютона і надлишковим методом при застосуванні поліноміальної ФП терморезистора. Проведені дослідження підтверджують високу точність і ефективність запропонованої математичної моделі методів надлишкових вимірювань.

3. ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ

3.1. Вибір платформи

Програма написана об'єктно-орієнтованою мовою програмування сценаріїв з синтаксисом – JavaScript з використанням гіпертекстового процесору HTML.

JavaScript – це мова програмування, що використовується для створення інтерактивних елементів на вебсторінках. У поєднанні з HTML (мова розмітки гіпертексту) і CSS (каскадні таблиці стилів), JavaScript допомагає перетворити статичні вебсторінки на динамічні та функціональні.

JavaScript є потужним інструментом для покращення функціональності HTML-документів.

Основними перевагами використання JavaScript у поєднанні з HTML є наступні:

1. JavaScript дозволяє створювати інтерактивні елементи на вебсторінці:

- реакція на дії користувача (натискання кнопок, переміщення курсора).
- динамічне оновлення сторінки без перезавантаження (завдяки використанню технології AJAX).

2. Гнучкість і динамічність JavaScript дозволяє змінювати вміст HTML-сторінки – це текст, зображення та стилі, а також додавати або видаляти елементи.

3. Легкість інтеграції JavaScript в HTML через вбудовані скрипти (`<script>`) та/або через зовнішні файли JavaScript (`<script src="file.js">`). Це спрощує роботу над великими проектами та дозволяє використовувати JavaScript з різними бібліотеками й фреймворками.

4. Кросбраузерна підтримка. Більшість сучасних браузерів підтримують JavaScript без додаткових налаштувань, що робить його універсальним інструментом для веброзробки.

5. Підтримка сучасних технологій. JavaScript дозволяє використовувати передові функції:

- анімації;
- робота з відео та аудіо без плагінів;
- інтеграція з API (наприклад, Google Maps або OpenWeather).

6. Швидкість виконання. JavaScript виконується безпосередньо у браузері користувача, що забезпечує високу швидкість роботи скриптів і зменшує навантаження на сервер.

7. Широкий вибір бібліотек і фреймворків. Існують популярні бібліотеки та фреймворки, які спрощують роботу з JavaScript:

- jQuery для простішої взаємодії з HTML;
- React та Vue.js для створення динамічних інтерфейсів.

Таким чином, JavaScript відкриває широкі можливості для створення сучасних, інтерактивних і функціональних вебсторінок. Його універсальність і легкість використання роблять його незамінним інструментом для розробників.

HTML формує структуру сторінки, тоді як JavaScript додає до цієї структури інтерактивність, наприклад, кнопки, що реагують на натискання, динамічне оновлення вмісту сторінки без перезавантаження, валідація форм перед відправленням даних.

Є кілька способів підключення JavaScript до HTML:

1. Інлайн-скрипти (всередині HTML-елементів).
2. Скрипти у `<script>`.
3. Зовнішні файли JavaScript.

Зі свого боку, HTML залишається базисом для створення вебсайтів завдяки своїй простоті, гнучкості та можливості працювати з іншими технологіями.

Мова HTML має наступні переваги, які роблять її популярною серед розробників:

1. Простота використання. HTML легко освоїти, оскільки має простий синтаксис. Крім того, структура документа інтуїтивно зрозуміла.

2. Широка підтримка. Підтримується всіма сучасними веб-браузерами. HTML працює однаково незалежно від платформи (Windows, macOS, Linux),.

3. Гнучкість і масштабованість. HTML Легко інтегрується з іншими мовами, такими як CSS і JavaScript. Також, можна додавати нові елементи або оновлювати структуру без значних змін коду.

4. Кросплатформеність. HTML створює документи, які працюють на будь-якому пристрої: комп'ютерах, смартфонах, планшетах. HTML підтримує адаптивний дизайн.

5. SEO-оптимізація:

- HTML дозволяє створювати структуру веб-сторінки, яка сприяє ефективному просуванню в пошукових системах (SEO).
- використання семантичних тегів покращує доступність і розуміння контенту пошуковими роботами.

6. HTML – це повністю безкоштовна технологія.

7. Сумісність з мультимедіа:

- легко інтегрує мультимедійний контент (зображення, відео, аудіо).
- підтримує вбудовані інструменти для відтворення медіа без необхідності сторонніх плагінів.

8. Активна спільнота, тобто наявна велика кількість навчальних матеріалів, прикладів і підтримка від розробників по всьому світу.

3.2. Опис роботи програми

Для представлення можливості моделювання запропонованої математичної моделі надлишкових методів була розроблена комп'ютерна програма по визначення шуканої температури терморезистором при поліноміальній ФП.

Програма призначена для визначення високоточного значення температури T_x , яке не залежить від параметрів ФП терморезистора та їх відхилень від нормованих значень. Таким чином, для визначення температури не потрібно знати коефіцієнти ФП, оскільки завдяки вбудованому рівнянню надлишкових вимірювань ці коефіцієнти не впливають на результат вимірювання.

Також, завдяки обробці даних по запропонованому алгоритму надлишкових вимірювань, отримане значення температури T_x одержують приведенням до входу вхідної характеристики, що забезпечує лінійну залежність результату вимірювання. Ця особливість також сприяє підвищенню точності вимірювання.

Програма дозволяє проводити моделювання результатів вимірювання температури (в діапазоні від'ємних температур) платиновим терморезистором шляхом варіації завдання різних значень нормованих температур. Це дає можливість досліджувати вплив значень нормованих температур на точність вимірювання.

Для запуску комп'ютерної програми потрібно відкрити відповідну папку (назва папки «Програма») на комп'ютері і запустити файл js.html. В результаті чого з'явиться вебсторінка із назвою «Початок обчислення температури», що містить інформацію щодо назви програми, зауваження щодо вводу інформації та кнопку – «Почати обробку результатів вимірювання» (рис. 9).

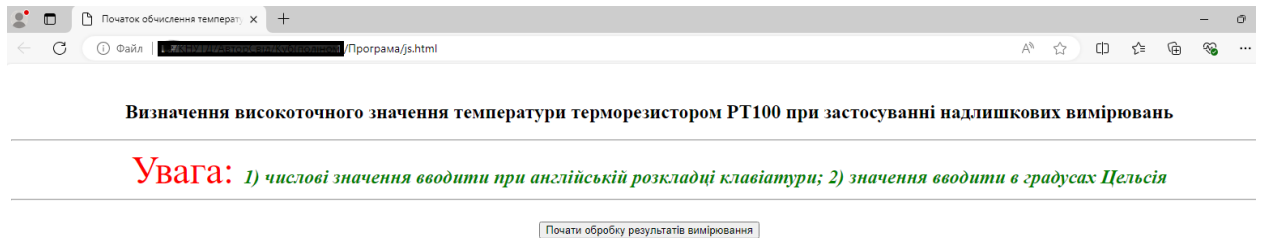


Рис.9. Вхід до програми

В програмі передбачена наявність примітки, в якій наголошено про необхідність вводити дані при англійській розкладці клавіатури, а також інформація про те, що значення температур вводяться в градусах Цельсія.

При натисканні на кнопку «Почати обробку результатів вимірювання» (рис.9) з'являється сторінка із назвою «Обчислення поліноміальної ФП» (рис. 10) для внесення даних і проведення подальших розрахунків.

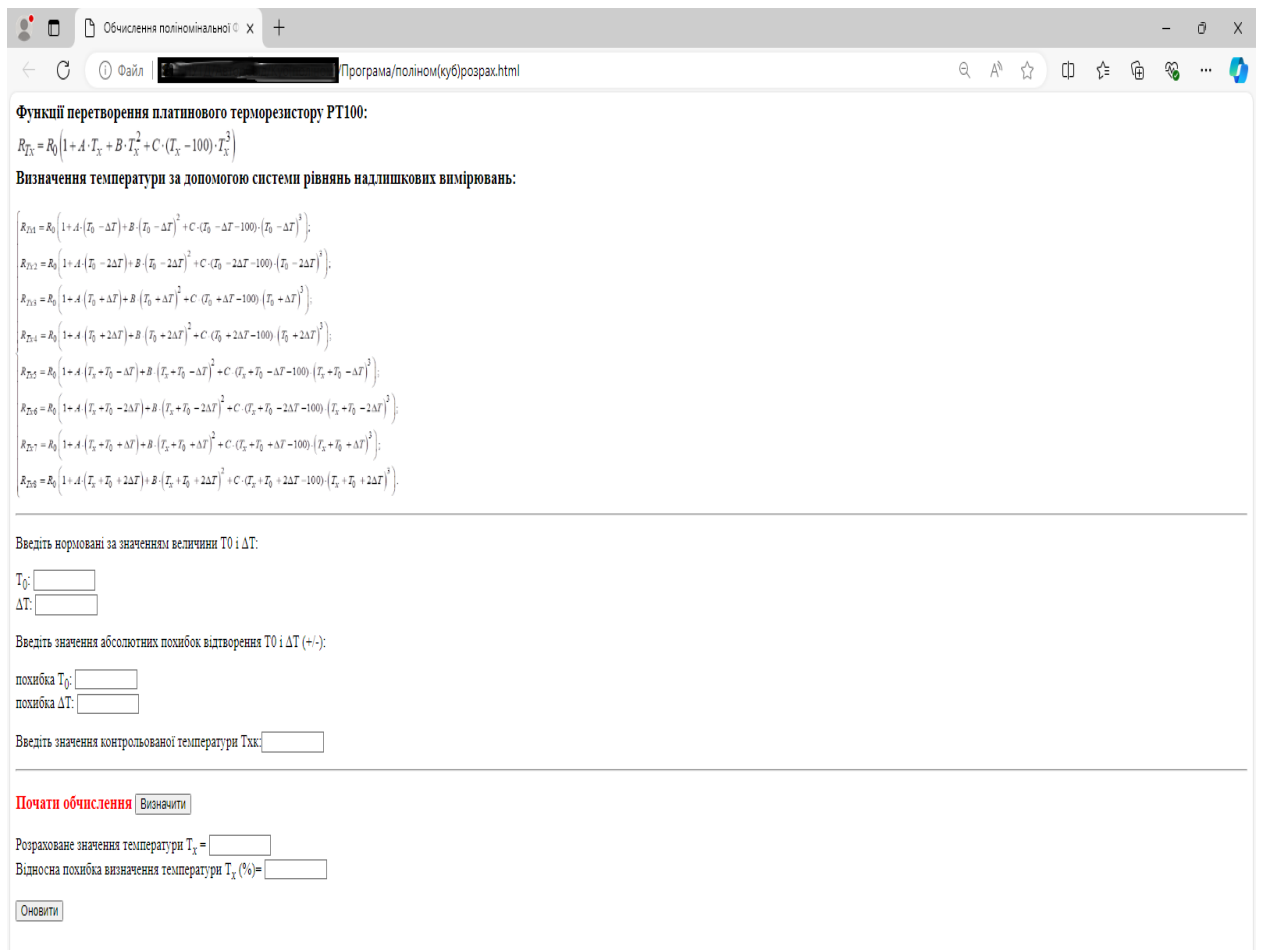


Рис.10. Вікно для обчислень

Для створення нової сторінки був використаний зовнішній файл JavaScript. Фрагмент коду такого застосування виглядає наступним чином:

```
...
<input type="button" value= "Почати обробку результатів вимірювання"
onClick='location.href="поліном(куб)розрах.html"'>
...
```

В даному фрагменті коду зазначено посилання на основний файл з назвою «поліном(куб)розрах.html», який реалізує застосування надлишкових вимірювань при поліноміальній ФП терморезистору.

Для наглядного розуміння виду поліноміальної ФП терморезистору і математичної моделі надлишкових методів, що описує 8 тактів вимірювання, на форму було виведено їх вид за допомогою тегів HTML:

```
...
<H3> Функції перетворення платиногового терморезистору PT100: <br>
 <br>
Визначення температури за допомогою системи рівнянь надлишкових
вимірювань: </H3>

<br><hr>
...
```

Оскільки для реалізації методів надлишкових вимірювань температури необхідно сформувати нормовані за значенням величин, то користувачу у вікні програми потрібно занести значення нормованих температур T_0 і ΔT , а також значення абсолютних похибок відтворення T_0 і ΔT . Далі необхідно ввести значення температури T_x , яку необхідно визначити.

В програмі для контролю користувача передбачено перевірку на введення непустих даних у вигляді відповідних повідомлень. Наприклад, якщо не було введено значення ΔT , то з'явиться відповідне вікно «Введіть значення ΔT » (рис. 11).

Функції перетворення платинового терморезистору PT100:

$$R_{Tx} = R_0 \left(1 + A \cdot T_x + B \cdot T_x^2 + C \cdot (T_x - 100) \cdot T_x^3 \right)$$

Визначення температури за допомогою системи рівнянь надлишкових ви:

$$\begin{cases} R_{Tx1} = R_0 \left(1 + A \cdot (T_0 - \Delta T) + B \cdot (T_0 - \Delta T)^2 + C \cdot (T_0 - \Delta T - 100) \cdot (T_0 - \Delta T)^3 \right); \\ R_{Tx2} = R_0 \left(1 + A \cdot (T_0 - 2\Delta T) + B \cdot (T_0 - 2\Delta T)^2 + C \cdot (T_0 - 2\Delta T - 100) \cdot (T_0 - 2\Delta T)^3 \right); \\ R_{Tx3} = R_0 \left(1 + A \cdot (T_0 + \Delta T) + B \cdot (T_0 + \Delta T)^2 + C \cdot (T_0 + \Delta T - 100) \cdot (T_0 + \Delta T)^3 \right); \\ R_{Tx4} = R_0 \left(1 + A \cdot (T_0 + 2\Delta T) + B \cdot (T_0 + 2\Delta T)^2 + C \cdot (T_0 + 2\Delta T - 100) \cdot (T_0 + 2\Delta T)^3 \right); \\ R_{Tx5} = R_0 \left(1 + A \cdot (T_x + T_0 - \Delta T) + B \cdot (T_x + T_0 - \Delta T)^2 + C \cdot (T_x + T_0 - \Delta T - 100) \cdot (T_x + T_0 - \Delta T)^3 \right); \\ R_{Tx6} = R_0 \left(1 + A \cdot (T_x + T_0 - 2\Delta T) + B \cdot (T_x + T_0 - 2\Delta T)^2 + C \cdot (T_x + T_0 - 2\Delta T - 100) \cdot (T_x + T_0 - 2\Delta T)^3 \right); \\ R_{Tx7} = R_0 \left(1 + A \cdot (T_x + T_0 + \Delta T) + B \cdot (T_x + T_0 + \Delta T)^2 + C \cdot (T_x + T_0 + \Delta T - 100) \cdot (T_x + T_0 + \Delta T)^3 \right); \\ R_{Tx8} = R_0 \left(1 + A \cdot (T_x + T_0 + 2\Delta T) + B \cdot (T_x + T_0 + 2\Delta T)^2 + C \cdot (T_x + T_0 + 2\Delta T - 100) \cdot (T_x + T_0 + 2\Delta T)^3 \right). \end{cases}$$

Введіть нормовані за значенням величини T0 і ΔT:

T0:

ΔT:

Введіть значення абсолютних похибок відтворення T0 і ΔT (+/-):

похибка T0:

похибка ΔT:

Введіть значення контрольованої температури T_x:

Рис.11. Вікно повідомлення

Фрагмент коду такої перевірки на введення не пустого значення ΔT виглядає наступним чином:

```
...
if (!l) {alert ("Введіть значення ΔT");return l};
...
```

Після заповнення всіх необхідних даних потрібно натиснути на кнопку «Визначити» (рис. 10).

В програмі передбачена можливість редагування і внесення даних, до тих пір поки не натиснута кнопка «Визначити».

За результатами обчислення програми буде отримано:

1) значення температури T_x , яке не залежить від змін параметрів функції перетворення і її нелінійності;

2) відносна похибка визначення температури T_x (%).

Фрагмент коду програми по визначенню шуканої температури за запропонованим рівнянням надлишкових вимірювань, наведено нижче:

...

$$a=100*S_{nn}*(k-l-100)*(k-l)**3+100*S_n*(k-l)**2+100*S_l*(k-l)+100;$$

$$b=100*S_{nn}*(k-2*l-100)*(k-2*l)**3+100*S_n*(k-2*l)**2+100*S_l*(k-2*l)+100;$$

$$c=100*S_{nn}*(k+l-100)*(k+l)**3+100*S_n*(k+l)**2+100*S_l*(k+l)+100;$$

$$d=100*S_{nn}*(k+2*l-100)*(k+2*l)**3+100*S_n*(k+2*l)**2+100*S_l*(k+2*l)+100;$$

$$e=100*S_{nn}*(m+k-l-100)*(m+k-l)**3+100*S_n*(m+k-l)**2+100*S_l*(m+k-l)+100;$$

$$f=100*S_{nn}*(m+k-2*l-100)*(m+k-2*l)**3+100*S_n*(m+k-2*l)**2+100*S_l*(m+k-2*l)+100;$$

$$g=100*S_{nn}*(m+k+l-100)*(m+k+l)**3+100*S_n*(m+k+l)**2+100*S_l*(m+k+l)+100;$$

$$h=100*S_{nn}*(m+k+2*l-100)*(m+k+2*l)**3+100*S_n*(m+k+2*l)**2+100*S_l*(m+k+2*l)+100;$$

$$p=d-b-2*(c-a);$$

$$x=((h-f-2*(g-e))-p)*(4*k-100)/(4*p);$$

$$a_p=100*S_{nn}*(k-l-100+k_p+l_p)*(k-l+k_p+l_p)**3+100*S_n*(k-l+k_p+l_p)**2+100*S_l*(k-l+k_p+l_p)+100;$$

$$b_p=100*S_{nn}*(k-2*l-100+k_p+l_p)*(k-2*l+k_p+l_p)**3+100*S_n*(k-2*l+k_p+l_p)**2+100*S_l*(k-2*l+k_p+l_p)+100;$$

$$c_p=100*S_{nn}*(k+l-100+k_p+l_p)*(k+l+k_p+l_p)**3+100*S_n*(k+l+k_p+l_p)**2+100*S_l*(k+l+k_p+l_p)+100;$$

$$d_p=100*S_{nn}*(k+2*l-100+k_p+l_p)*(k+2*l+k_p+l_p)**3+100*S_n*(k+2*l+k_p+l_p)**2+100*S_l*(k+2*l+k_p+l_p)+100;$$

```

ep=100*Snn*(m+k-l-100+kp+lp)*(m+k-l+kp+lp)**3+100*Sn*(m+k-
l+kp+lp)**2+100*Sl*(m+k-l+kp+lp)+100;

fp=100*Snn*(m+k-2*l-100+kp+lp)*(m+k-2*l+kp+lp)**3+100*Sn*(m+k-
2*l+kp+lp)**2+100*Sl*(m+k-2*l+kp+lp)+100;

gp=100*Snn*(m+k+l-
100+kp+lp)*(m+k+l+kp+lp)**3+100*Sn*(m+k+l+kp+lp)**2+100*Sl*(m+k+l+kp
+lp)+100;

hp=100*Snn*(m+k+2*l-
100+kp+lp)*(m+k+2*l+kp+lp)**3+100*Sn*(m+k+2*l+kp+lp)**2+100*Sl*(m+k
+2*l+kp+lp)+100;

pp=dp-bp-2*(cp-ap);
xp=((hp-fp-2*(gp-ep))-pp)*(4*k-100)/(4*pp);

dT=(Math.abs((m-xp)/m))*100;

obj.resm.value=xp;
obj.resp.value=dT;
obj.res.value=x;
}
//-->
</script>
...

```

Повний код програми наведено в додатку В.

3.3. Тестування програми

Як відомо, тестування – це процес перевірки програмного забезпечення для виявлення помилок, забезпечення його якості та відповідності вимогам. Воно є важливим етапом у розробці програм, адже допомагає уникнути проблем у роботі додатку.

Тестування бувають декілька типів, серед яких можна виділити наступні:

1. Функціональне тестування – перевірка, чи відповідає програма функціональним вимогам.
2. Нефункціональне тестування – перевірка продуктивності, безпеки, зручності використання та інших параметрів.
3. Тестування користувацького інтерфейсу (UI) – оцінюється зовнішній вигляд і поведінка інтерфейсу.

Основними етапами тестування є:

1. Планування тестування, що включає:
 - визначення, що потрібно протестувати (функції, модулі, весь продукт);
 - складання тестового плану із зазначенням цілей і обсягу тестування.
2. Перевірка конкретної функції. Він включає:
 - опис функціоналу, який перевіряється;
 - вхідні дані;
 - очікуваний результат.
3. Виконання тестів. На цьому етапі необхідно запустити програму і перевірити кожен сценарій, фіксувати, чи відповідає отриманий результат очікуваному.
4. Перевірити на наявність помилок. Якщо виявлено помилку, то необхідно її проаналізувати і відкоригувати код програми.
5. Після виправлення помилок необхідно перевірити, чи вони дійсно усунуті, і чи не спричинили ці зміни нових проблем (регресійне тестування).

При тестуванні розробленої комп'ютерної програми були застосовані як функціональний (користувач повинен заповнити всі поля, які є обов'язковими), так і нефункціональний типи (зручність та простота використання, надійність отриманої інформація про шукане значення).

Слідуючи основним етапам тестування, опишемо планування тестування розробленого програмного продукту. Ціль даного тестового плану – визначення якості роботи комп'ютерної програми по розрахунку шуканого значення температури. Першим кроком плану є перевірка на запуск самої програми, відображення виду ФП терморезистора і системи рівнянь надлишкових вимірювань, а також роботу всіх кнопок і наявність всіх необхідних полів для вводу даних: значення нормованих температур T_0 і ΔT , значення абсолютних похибок вимірювання температур T_0 і ΔT , а також значення шуканої температури, якого потрібно дотримуватися при контролі температури. Наступним кроком в плані є перевірка на визначення шуканого значення температури і відносної похибки імітаційного вимірювання.

Після складання тестового плану наступним етапом тестування є перевірка функції по визначенню контрольованого значення температури при виконанні набору певних умов та параметрів. Для цього, задають в якості вхідної інформації паспортні дані параметрів терморезистору без похибок, імітуючи ідеальні умови технологічного процесу, щоб отримати очікуваний результат – табличне значення шуканої температури. Виходячи з вже проведених розрахунків і рекомендацій, визначаються вхідні дані значень нормованих температур T_0 і ΔT , а також значення абсолютних похибок вимірювання температур T_0 і ΔT . На основі проведених в роботі досліджень поліноміальної ФП терморезистора РТ100 для отримання очікуваного результат вимірювання температури $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ були взяті наступні рекомендовані значення нормованих температур $T_0 = -100\text{ }^{\circ}\text{C}$ і $\Delta T = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, а також значення абсолютних похибок відтворення нормованих температур $\Delta_{T_0} = 0,001\text{ }^{\circ}\text{C}$ і $\Delta_{\Delta T} = 0,001\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Наступним етапом тестування є безпосереднє виконання тестів. На цьому етапі проводяться застосування як позитивних, так і негативних тест-кейсів [26]. Спочатку, для перевірки правильності роботи програми застосовується позитивний тест-кейс. На цьому етапі необхідно запустити

програму і перевірити на відповідність отриманого результату очікуваному. Результат обчислення наведено на (рис. 12).

Обчислення поліноміальної

Файл | /Програма/поліном(куб)розрах.html

Функції перетворення платинового терморезистору РТ100:

$$R_{Tx} = R_0 \left(1 + A \cdot T_x + B \cdot T_x^2 + C \cdot (T_x - 100) \cdot T_x^3 \right)$$

Визначення температури за допомогою системи рівнянь надлишкових вимірювань:

$$\begin{cases} R_{Tx1} = R_0 \left(1 + A \cdot (T_0 - \Delta T) + B \cdot (T_0 - \Delta T)^2 + C \cdot (T_0 - \Delta T - 100) \cdot (T_0 - \Delta T)^3 \right); \\ R_{Tx2} = R_0 \left(1 + A \cdot (T_0 - 2\Delta T) + B \cdot (T_0 - 2\Delta T)^2 + C \cdot (T_0 - 2\Delta T - 100) \cdot (T_0 - 2\Delta T)^3 \right); \\ R_{Tx3} = R_0 \left(1 + A \cdot (T_0 + \Delta T) + B \cdot (T_0 + \Delta T)^2 + C \cdot (T_0 + \Delta T - 100) \cdot (T_0 + \Delta T)^3 \right); \\ R_{Tx4} = R_0 \left(1 + A \cdot (T_0 + 2\Delta T) + B \cdot (T_0 + 2\Delta T)^2 + C \cdot (T_0 + 2\Delta T - 100) \cdot (T_0 + 2\Delta T)^3 \right); \\ R_{Tx5} = R_0 \left(1 + A \cdot (T_x + T_0 - \Delta T) + B \cdot (T_x + T_0 - \Delta T)^2 + C \cdot (T_x + T_0 - \Delta T - 100) \cdot (T_x + T_0 - \Delta T)^3 \right); \\ R_{Tx6} = R_0 \left(1 + A \cdot (T_x + T_0 - 2\Delta T) + B \cdot (T_x + T_0 - 2\Delta T)^2 + C \cdot (T_x + T_0 - 2\Delta T - 100) \cdot (T_x + T_0 - 2\Delta T)^3 \right); \\ R_{Tx7} = R_0 \left(1 + A \cdot (T_x + T_0 + \Delta T) + B \cdot (T_x + T_0 + \Delta T)^2 + C \cdot (T_x + T_0 + \Delta T - 100) \cdot (T_x + T_0 + \Delta T)^3 \right); \\ R_{Tx8} = R_0 \left(1 + A \cdot (T_x + T_0 + 2\Delta T) + B \cdot (T_x + T_0 + 2\Delta T)^2 + C \cdot (T_x + T_0 + 2\Delta T - 100) \cdot (T_x + T_0 + 2\Delta T)^3 \right). \end{cases}$$

Введіть нормовані за значенням величини T_0 і ΔT :

T_0 :

ΔT :

Введіть значення абсолютних похибок відтворення T_0 і ΔT (+/-):

похибка T_0 :

похибка ΔT :

Введіть значення контрольованої температури T_{Tx} :

Почати обчислення

Розраховане значення температури $T_x =$

Відносна похибка визначення температури T_x (%) =

Рис.12. Результат обчислення

В прикладі розрахунку при заданих значеннях було отримано:

1) значення температури T_x при поліноміальній ФП терморезистора, яке становить $(-200,0032) ^\circ\text{C}$;

2) відносна похибка визначення температури T_x (%), яке дорівнює $0,0016\%$.

Таким чином, було отримано достовірний результат, що свідчить про програма правильно відпрацювала позитивні сценарії. За результатами розрахунку було отримано високоточне значення температури T_x , яке не залежить від параметрів функції перетворення (ФП) терморезистора та їх відхилень від нормованих значень, а також від похибки лінеаризації поліноміальної ФП терморезистора.

В програмі передбачено також оновлення форми, що відбувається після натискання на кнопку «Оновити», що знаходиться внизу сторінки (рис. 12).

Після того, як програма правильно відпрацювала і показала високоточний результат, необхідно перейти до негативних тест-кейсів, наприклад, перевірити, як відреагує програма, якщо ввести данні не на англійській розкладці клавіатури, або, якщо залишити поле для вводу інформації пустим, тобто необхідно створити нестандартні ситуації. Наприклад, для випадку, коли було введено значення абсолютної похибки нормованої температури T_0 не на англійській розкладці клавіатури, то програма видала відповідне зауваження (рис.12).

Шляхом варіації завдання різних значень нормованих температур стає можливим дослідження їх впливу на відносну похибку вимірювання.

Функція перетворення платинового терморезистору R_{TX} і T₁₀₀:

$$R_{TX} = R_0 \left(1 + A \cdot T_X + B \cdot T_X^2 + C \cdot (T_X - 100) \cdot T_X^3 \right)$$

Визначення температури за допомогою системи рівнянь надлишків

$$\begin{cases} R_{TX1} = R_0 \left(1 + A \cdot (T_0 - \Delta T) + B \cdot (T_0 - \Delta T)^2 + C \cdot (T_0 - \Delta T - 100) \cdot (T_0 - \Delta T)^3 \right); \\ R_{TX2} = R_0 \left(1 + A \cdot (T_0 - 2\Delta T) + B \cdot (T_0 - 2\Delta T)^2 + C \cdot (T_0 - 2\Delta T - 100) \cdot (T_0 - 2\Delta T)^3 \right); \\ R_{TX3} = R_0 \left(1 + A \cdot (T_0 + \Delta T) + B \cdot (T_0 + \Delta T)^2 + C \cdot (T_0 + \Delta T - 100) \cdot (T_0 + \Delta T)^3 \right); \\ R_{TX4} = R_0 \left(1 + A \cdot (T_0 + 2\Delta T) + B \cdot (T_0 + 2\Delta T)^2 + C \cdot (T_0 + 2\Delta T - 100) \cdot (T_0 + 2\Delta T)^3 \right); \\ R_{TX5} = R_0 \left(1 + A \cdot (T_X + T_0 - \Delta T) + B \cdot (T_X + T_0 - \Delta T)^2 + C \cdot (T_X + T_0 - \Delta T - 100) \cdot (T_X + T_0 - \Delta T)^3 \right); \\ R_{TX6} = R_0 \left(1 + A \cdot (T_X + T_0 - 2\Delta T) + B \cdot (T_X + T_0 - 2\Delta T)^2 + C \cdot (T_X + T_0 - 2\Delta T - 100) \cdot (T_X + T_0 - 2\Delta T)^3 \right); \\ R_{TX7} = R_0 \left(1 + A \cdot (T_X + T_0 + \Delta T) + B \cdot (T_X + T_0 + \Delta T)^2 + C \cdot (T_X + T_0 + \Delta T - 100) \cdot (T_X + T_0 + \Delta T)^3 \right); \\ R_{TX8} = R_0 \left(1 + A \cdot (T_X + T_0 + 2\Delta T) + B \cdot (T_X + T_0 + 2\Delta T)^2 + C \cdot (T_X + T_0 + 2\Delta T - 100) \cdot (T_X + T_0 + 2\Delta T)^3 \right). \end{cases}$$

На цій сторінці повідомляється

Введіть значення абсолютної похибки задання T₀ (+/-)

OK

Введіть нормовані за значенням величини T₀ і ΔT:

T₀:

ΔT:

Введіть значення абсолютних похибок відтворення T₀ і ΔT (+/-):

похибка T₀:

Рис. 12. Зауваження системи на нестандартне введення даних

Таким чином, на підставі успішного проведення всіх етапів тестування наявних помилок як в реалізації самої функції по визначенню контрольованого значення температури, так і самій програми не було виявлено.

Висновки до розділу 3.

Запропонована в роботі комп'ютерна програма дозволяє отримати значення контрольованого значення температури, яке не залежить від параметрів поліноміальної функції перетворення терморезистора без додаткових заходів по її лінеаризації. Програма написана об'єктно-орієнтованою мовою програмування сценаріїв з синтаксисом – JavaScript з використанням гіпертекстового процесору HTML.

За результатами обчислення програми буде отримано:

- 1) значення температури T_x , яке не залежить від змін параметрів функції перетворення і її нелінійності;
- 2) відносна похибка визначення температури T_x (%).

Шляхом варіації завдання різних значень нормованих температур стає можливим дослідження їх впливу на відносну похибку вимірювання. Таким чином, комп'ютерна програма продемонстрували високу ефективність у моделюванні та дослідженні методу надлишкових вимірювань при поліноміальної функції перетворення сенсора.

При тестуванні наявних помилок як в реалізації самої функції по визначенню контрольованого значення температури, так і самій програми не було виявлено.

ВИСНОВКИ

В представлений роботі за мету ставилася розробка алгоритмів і програмного забезпечення, які досліджують поліноміальну функцію перетворення сенсорів для підвищення точності вимірювань температури. Тож, були розглянуті основи температурних вимірювань та особливості методів їх застосування. Науковий інтерес був зосереджений на підвищенні точності температурних вимірювань при нелінійній функції перетворення сенсора, оскільки вся подальша точність вимірювань залежить від точності вимірювань, отриманих сенсором. Платиновий терморезистор був обраний в якості сенсора температури через свою термочутливість, широкий діапазон температур і високу точність. Були розглянуті методи для компенсації нелінійності функції перетворення терморезистора. Крім того, було зазначено, що параметри функції перетворення змінюються через вплив навколишнього середовища та старіння конструктивних елементів. Це може призвести до додаткових помилок вимірювального контролю температури та вплинути на якість продукції. Запропоновано використовувати методи надлишкових вимірювань для комплексного вирішення проблеми підвищення точності вимірювання в широкому діапазоні температур при безпосередньому використанні сенсора з нелінійною функцією перетворення. Методи надлишкових вимірювань не тільки забезпечують лінійну залежність результату вимірювання від вхідної величини, але й автоматично виключають систематичні складові похибки, які викликані зміною параметрів ФП під дією дестабілізуючих факторів.

Було запропоновано загальний алгоритм роботи надлишкових методів. На основі цього алгоритму була створена математична модель процесу вимірювання температури при поліноміальній ФП терморезистору. Особливістю запропонованої математичної моделі є те, що вона описує кожен з восьми тактів вимірювання як нормованих за значенням температур, так і їх комбінації з контрольованою температурою. Математична модель представляє

собою систему рівнянь величин. Рішення даної системи дозволяє вивести рівняння надлишкових вимірювань, яке виключає адитивну (вільний член ФП) та мультиплікативну складові (коефіцієнти при параметрах ФП) похибки вимірювання. Це дозволяє використовувати запропоновану математичну модель безпосередньо для вимірювання температури терморезистором без використання додаткових заходів по лінеаризації функції перетворення. Крім того, було встановлено, що зміна параметрів функції перетворення (від $\pm 1\%$ до $\pm 10\%$) не впливає на результати вимірювання. Це означає, що запропонована математична модель може бути застосована до будь-якого терморезистора без додаткового калібрування, що свідчить про універсальність і гнучкість надлишкових вимірювань.

Представлена математична модель була перевірена на адекватність. Розрахунки похибки адекватності моделі показали, що відхилення експериментальних даних методами надлишкових вимірювань від теоретичних становить $\delta_m = 0,02\%$, що підтверджує високий ступінь довіри до отриманих даних. Тобто запропонована математична модель методу надлишкових вимірювань може бути визнана адекватною, що підтверджує її концептуальність.

На основі запропонованої математичної моделі була розроблена блок-схема алгоритму надлишкових вимірювань температури при поліноміальній ФП терморезистора. Представлений алгоритм описує послідовність виконання кожного кроку такту вимірювань.

Розглянуто вплив значень нормованих температур T_0 і ΔT на результат вимірювання на всьому діапазоні вимірюваних температур. В результаті чого було встановлено, що значення відносної похибки зменшується при збільшенні значення нормованої температури T_0 та залишається сталим при зміні значень нормованої температури ΔT . Таким чином, на результат надлишкових вимірювань більший вплив має значення нормованої величини T_0 і майже не впливає величина ΔT . Встановлено, що найкращі результати по точності були отримані при значеннях T_0 нижче за $-60\text{ }^\circ\text{C}$.

Були проведені подальші дослідження розробленої математичної моделі для встановлення співвідношення між значеннями вимірювальної температури і нормованими. В результаті чого, було рекомендоване оптимальне значення T_0 , що становить нижче за -130°C .

Проведено аналіз впливу на результат вимірювання похибок відтворення нормованих температур T_0 і ΔT , що є головною складовою методичної похибки надлишкових методів. Встановлено, що збільшення похибки відтворення нормованих температур з $\pm 0,02^{\circ}\text{C}$ до $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ призводить до збільшення абсолютної похибки вимірювання з $0,047^{\circ}\text{C}$ до $0,16^{\circ}\text{C}$ на кінці діапазону вимірювання температури. Встановлено, що при виконанні вказаних умови $|T_0| \geq -130^{\circ}\text{C}$, методична похибка вимірювання надлишковими методами при поліноміальній ФП терморезистора матиме несуттєвий вплив на результат вимірювання. Таким чином, при збільшенні похибки відтворення нормованих температур необхідно збільшувати значення T_0 за модулем до -130°C . Така особливість робить надлишкові методи чутливими до точності відтворення нормованих температур, але, водночас, дають можливість зменшити цей вплив за рахунок збільшення значення нормованої величини T_0 . Оскільки сучасні технології дозволяють використовувати високоточні джерела нормованих температур, то задача зменшення методичної похибки надлишкових методів не є критичною.

Було проведено порівняння результатів вимірювання температури і надлишковим методом і при застосуванні метода Ньютона. Встановлено, що абсолютна похибка вимірювання температури сенсором з поліноміальною ФП за методом Ньютона складає 6°C на кінці діапазону, а надлишковими методами – $0,032^{\circ}\text{C}$. Така висока точність надлишкових методів обґрунтовується незалежністю результату вимірювання від похибки відтворення нормованих температур. В результаті порівняльного аналізу було підтверджено високу точність і ефективність методів надлишкових вимірювань.

Для демонстрації можливостей моделювання запропонованої математичної моделі надлишкових методів була створена комп'ютерна програма, яка визначає температуру, виміряну терморезистором з поліноміальною ФП без необхідності додаткової її лінеаризації. Це істотно підвищує точність вимірювань. Зазначено, що завдяки обробці результатів вимірювального перетворення вхідних сигналів сенсора за вбудованим рівнянням надлишкових вимірювань, забезпечується незалежність результату вимірювання температури від змін параметрів поліноміальної ФП.

Програма реалізована на об'єктно-орієнтованій мові програмування сценаріїв із синтаксисом JavaScript та використовує гіпертекстовий процесор HTML. За результатами роботи програми було отримано значення контрольованої температури T_x та відносну похибку вимірювання.

Варіювання значень нормованих температур в програмі дозволило дослідити їх вплив на відносну похибку вимірювання. Таким чином, комп'ютерна програма продемонструвала високу ефективність у моделюванні та аналізі методу надлишкових вимірювань для поліноміальної ФП сенсора.

Тестування не виявило жодних помилок ні в реалізації функції визначення контрольованого значення температури, ні в роботі програми загалом.

Таким чином, розроблена програма підтвердила високу точність і ефективність у моделюванні та аналізі методу надлишкових вимірювань для поліноміальної ФП сенсора.

Список використаних джерел

1. E. Sandoz-Rosado, RJ Stevens, (2009), Experimental characterization of thermoelectric modules and comparison with theoretical models for power generation, - Journal of electronic materials, 2009, P. 1239-1244.
2. Yifeng Fu, Guofeng Cui, Kjell Jeppson, (2019), Thermal Characterization of Low-Dimensional Materials by Resistance Thermometers, Materials 2019, 12, 1740, p.1-15, DOI: [10.3390/ma12111740](https://doi.org/10.3390/ma12111740).
3. Beeby, S. P., & White, N. M. (2014). *Instrumentation and Sensors for Engineering Measurements and Process Control*. Artech House.
4. Astrom, K. J., & Murray, R. M. (2010). *Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers*. Princeton University Press.
5. Li, Z., & Zhang, Z. (2016). *Temperature Compensation Techniques for Sensors*. Sensor Review, 36(1), 34–40.
6. М.М. Степаняк, В.Р. Скальський, М.В. Степаняк (2010). Дослідження можливості підвищення точності вимірювання температури обертових об'єктів. Вісник Національного університету "Львівська політехніка", № 686 : Комп'ютерні науки та інформаційні технології. – С. 13–23. URL: ena.lp.edu.ua:8080/bitstream/ntb/34026/1/02.pdf.
7. Яненко О. П., Михайленко С. В., Ліснічук А. С. (2014). Радіометричний модуляційний вимірювач інтенсивності оптичного випромінювання / Вісник Національного технічного університету України «КПІ» Серія – Радіотехніка. Радіоапаратобудування. №56: С. 96 – 101. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VKPI_rr_2014_56_11.
8. Gareth D. Lewis, Patrick Merken, Marijke Vandewal. (2018). Enhanced Accuracy of CMOS Smart Temperature Sensors by Nonlinear Curvature Correction // *Sensors* 2018. 18(12), 4087. DOI:10.3390/s18124087.
9. Chun-Chi Chen, Chao-Lieh Chen, Yi Lin. (2016). All-Digital Time-Domain CMOS Smart Temperature Sensor with On-Chip Linearity Enhancement. *Sensors (Basel)*;16(2):176. DOI: 10.3390/s16020176.

10. Jun Zhang, Weixian Qian, Guohua Gu, Chen Mao, Kan Ren, Chunhong Wu, Xiaoyu Peng, and Qian Chen. (2019). Improved algorithm for expanding the measurement linear range of a four-quadrant detector. *Applied Optics*, Vol. 58, Issue 28, pp. 7741-7748. <https://doi.org/10.1364/AO.58.007741>.
11. José A. Hidalgo-López, Raquel Fernández-Ramos, Jorge Romero-Sánchez, José F. Martín-Canales and Francisco J. Ríos-Gómez. (2018) Improving Accuracy in the Readout of Resistive Sensor Arrays. *Journal of Sensors* , vol. 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/9735741>.
12. Танкевич Є. М., Яковлєва І. В., Варський Г. М. (2016). Підвищення точності вимірювальних каналів напруги систем керування електроенергетичних об'єктів. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. № 1, с. 79–83. URL: <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/download/1880/1880/>.
13. Abbas Rahimi, Pentti Kanerva, Luca Benini, Jan M. Rabaey. (2019) Efficient Biosignal Processing Using Hyperdimensional Computing: Network Templates for Combined Learning and Classification of ExG Signals. *Proceedings of the IEEE*, vol. 107, no. 1, pp. 123-143, 2019.
14. Huang P.-C., Rabaey J. M. (2017) A Bio-Inspired Analog Gas Sensing Front End // *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*. 2017. Vol. 64, Issue 9. P. 2611–2623. doi: <https://doi.org/10.1109/tcsi.2017.2697945>.
15. Lebedev, V., Laukhina, E., Laukhin, V., Somov, A., Baranov, A. M., Rovira, C., & Veciana, J. (2017). Investigation of sensing capabilities of organic bi-layer 329 thermistor in wearable e-textile and wireless sensing devices. *Organic Electronics*, 42, 146-152. https://www.semanticscholar.org/paper/Investigation-of-sensing-capabilities-of-organic-in-Lebedev-Laukhina/90208ff9f222bbf450160467010e0f2ecbe5989e?utm_source=direct_link.
16. Shcherban' V., Korogod G., Chaban V., Kolysko O., Shcherban' Yu., Shchutska G. (2019). Computer simulation methods of redundant measurements with the nonlinear transformation function. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 98, №2/5, 16-22. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.160830>.

17. Shcherban' V., Korogod G., Kolysko O., Kolysko M., Shcherban' Yu., Shchutska G. (2020). Computer simulation of multiple measurements of logarithmic transformation function by two approaches. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 6(4(108), 6–13. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.218517>.

18. Shcherban' V., Korogod G., Kolysko O., Kolysko M., Shcherban' Yu., Shchutska G. Computer simulation of logarithmic transformation function to expand the range of high-precision measurements // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. - 2021. - volume 2. - №9 (110). – pp. 27-36. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.227984>.

19. Shcherban' V., Korogod G., Kolysko O., Volivach A., Shcherban' Yu., Shchutska G. Computer modeling in the study of the effect of normalized quantities on the measurement accuracy of the quadratic transformation function / V. Shcherban', G. Korogod, O. Kolysko, A. Volivach, Yu. Shcherban', G. Shchutska // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. - 2022. - volume 2. - № 5 (116). – pp. 6-16. DOI: <http://journals.urau.ua/eejet/issue/view/15351>.

20. Корогод Г. О., Волівач А. П. (2022) Алгоритм і комп'ютерна програма визначення високоточного значення фізичної величини та параметрів нестабільної функції перетворення, «Технології та інжиніринг», 6(11), 2022, с.20-32. DOI: 10.30857/2786-5371.2022.6.2.

21. Shcherban', V., Korohod, H., Chuprynka, N., Kolysko, O., Shcherban', Y., & Shchutska, G. (2023). Computer analysis of multiple measurements with the sensor's quadratic transformation function. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(5 (121), 17–25. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.273299>.

22. Shcherban', V., Korohod, H., Kolysko, O., Kyrychenko, A., Shcherban', Y., & Shchutska, G. (2024). Determining features in the application of redundancy for the thermistor cubic transformation function using computer simulation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(5 (127), 33–40. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.297619>.

23. Корогод Г. О., Яхно В. М. (2024). Алгоритм та комп'ютерна програма для визначення високоточного значення вимірювальної величини та

метрологічного контролю. Технології та інжиніринг, № 4(21), 2024, с.48-58.
DOI: 10.30857/2786-5371.2024.4.4

24. PT100 Resistance Table. https://www.mini-tech.com.ua/download/datasheet/sensors/pt100_resistance_table.pdf.

25. IT-професії. Знайомство. <https://intro.beetroot.academy/lesson/itit-qa-lesson-2>.

26. Лаппо І.М., Червотока О.В., Геращенко М.О., Приходько С.М. (2022). Основні засади підвищення точності вимірювання температури безконтактними методами». Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки, 14(4), с. 110-117. doi: 10.37701/dndivsovt.14.2022.12.

27. Дорожинська Г. В. (2020) Оцінка ефективності чисельних методів для обробки результатів вимірювання вдосконаленим ППР-сенсором. *Вісник ВПІ*, вип. 2, с. 7–13, Квіт. 2020. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2020-149-2-7-13>.

28. Вдовиченко А. В., Туз Ю. М. (2018). Підвищення точності вимірювання активної потужності при значній реактивній складовій навантаження шляхом створення середньої точки шунта. *Вимірювальна техніка та метрологія*, № 79 (1) – pp. 76-81. <https://doi.org/10.23939/istcmmtm2018.01.076>.

29. Dong Pan, Zhaohui Jiang, Weihua Gui, Chunhua Yang, Yongfang Xie, Ke Jiang. (2018). A method for improving the accuracy of infrared thermometry under the influence of dust. *IFAC PapersOnLine* 51-21 PP. 246–250 <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.09.426>.

30. Мельник В.Г., Борщов П.І., Беляєв В.К., Василенко О.Д., Ламеко О.Л., Сліцький О.В. (2020) Базовий вимірювальний модуль для реалізації високоточних засобів визначення параметрів імпедансу в широкому діапазоні частот. *Праці ІЕД НАН України*. 2020. Вип. 56, с.20-23. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2020.56.020>.

31. Boyko O., Barylo G., Holyaka R., Hotra Z., Ilkanych K. (2018). Development of signal converter of thermal sensors based on combination of

thermal and capacity research methods. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* 4/9 (94), 36. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.139763.

32. Пішан О.Й., Андріюк І.В. (2018) Спосіб лінеаризації аналогових сигналів первинних вимірювальних перетворювачів з синусоїдальними або косинусоїдальними характеристиками перетворення. *Наука, технології, інновації* 2018, № 2. С.54-60. https://nti.ukrintei.ua/?page_id=1256

33. Koritsoglou, K.; Christou, V.; Ntritsos, G.; Tsoumanis, G.; Tsipouras, M.G.; Giannakeas, N.; Tzallas, A.T. (2020) Improving the Accuracy of Low-Cost Sensor Measurements for Freezer Automation. *Sensors* 2020, 20, 6389. <https://doi.org/10.3390/s20216389>

34. G. Bedenik, M. Souza, E. A. N. Carvalho, L. Molina, J. Montalvão and R. Freire. (2022). Analysis of Parameters Influence in a MOX Gas Sensor Model. *2022 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, 2022, pp. 1–6, doi: 10.1109/I2MTC48687.2022.9806695.

35. Koestoer, R.A.; Saleh, Y.A.; Roihan, I.; Harinaldi. (2019). A simple method for calibration of temperature sensor DS18B20 waterproof in oil bath based on Arduino data acquisition system. In *Proceedings of the AIP Conference Proceedings*, Kuta, Indonesia, 25 January 2019. <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.5086553>.

36. Rajesh R. J., Yuri Shtessel, Chris Edwards. (2020) Accuracy improvement of dynamic sensors using sliding mode observers with dynamic extension. *Sensors and Actuators A: Physical*, ISSN: 0924-4247, Vol: 316, Page: 112396. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.112396>

37. Квашук Д.М., Ліпков О.Є. (2023). Метод автоматичної корекції систематичних похибок перетворювачів напруги. *ВІСНИК ХНТУ* № 2(85), 2023 р. с. 29-36. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2023.2.3>

38. Francisco Antônio Belo, Manoel Brasileiro Soares, Abel Cavalcante Lima Filho, Thyago Leite de Vasconcelos Lima, Marceu Oliveira Adissi. (2022) Accuracy and Precision Improvement of Temperature Measurement Using

Statistical Analysis/Central Limit Theorem *Sensors* 2023, 23(6), 3210.
<https://doi.org/10.3390/s23063210>

39. Трофименко О. Г. Веб-технології та веб-дизайн : навч. посібник / О. Г. Трофименко, О. Б. Козін, О. В. Задерейко, О. Є. Плачінда .// – Одеса : Фенікс, 2019. – 284 с.

40. Пасічник О.Г, Основи веб-дизайну /О.Г Пасічник, О.В. Пасічник, І.В. Стеценко // - Київ ВНУ -2019р.

41. Трофименко О.Г., Веб-дизайн та HTML-програмування: навч.-метод. посібник./ О. Г. Трофименко, О. Б. Козін // - Одеса: Фенікс, 2017. 194 с.

42. Веб-дизайн сайту і користувацькі помилки. URL: <http://webstudio2u.net/ua/designweb/852-veb-dizain-saita-i-polzovatelskie-oshibki.html> (дата звернення 28.06.2018).

43. HTML: Вікіпідручник. URL: <http://uk.wikipedia.org/wiki/HTML> (дата звернення 14.10.2018).

44. Ерік Фрімен, Елізабет Робсон. (2022). Head First. Програмування на JavaScript. Фабула, 972 с.

45. Marc Myers. (2014). A Smarter Way to Learn JavaScript. The new tech-assisted approach that requires half the effort. CreateSpace Independent Publishing Platform. 254 с.

ДОДАТКИ