

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ «КИЇВСЬКИЙ
ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

КОЗИР ОЛЕГ ВАСИЛЬОВИЧ

УДК 536.532, 681.5.015

ДИСЕРТАЦІЯ

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ КОРОТКИХ
ТЕПЛОВИХ ІМПУЛЬСІВ

05.01.02 – стандартизація, сертифікація та метрологічне забезпечення
Технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ О. В. Козир

Науковий керівник Туз Юліан Михайлович, д.т.н., професор

Київ – 2021

АНОТАЦІЯ

Козир О.В. Підвищення точності вимірювання температури коротких теплових імпульсів. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.01.02 «Стандартизація, сертифікація та метрологічне забезпечення» (152 – Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка). – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2021.

Робота містить результати дослідження, які спрямовані на підвищення точності вимірювання температури коротких теплових імпульсів.

У роботі проведено аналіз сучасного стану розвитку методів та засобів вимірювання температури, які базуються на використанні залежності різних фізичних явищ від температури, оскільки пряме вимірювання температури не можливе.

Зокрема, було проаналізовано та класифіковано методи вимірювання температури. Безконтактні, радіометричні методи мають перевагу при вимірюванні температури твердих об'єктів із відомими спектральними характеристиками випромінювання. Проте, вони мають значні методичні похибки вимірювання температури газових потоків, які виникають при вибухах або при випробуваннях авіаційній та ракетній техніці. Дані похибки пов'язані із необхідністю апріорно володіти інформацією про коефіцієнти випромінювання газового потоку у залежності від кількості спектральних складових, які використовуються для вимірювання температури. Частотна залежність коефіцієнту випромінювання полум'я, його мінливість у залежності від умов протікання горіння та, як наслідок, відмінність інтенсивності випромінювання газу при однаковій температурі, ускладнює використання безконтактних методів для вимірювання температури коротких теплових імпульсів. Також, масо-габаритні параметри безконтактних систем

вимірювання температури полум'я роблять неможливим їх розміщення у малогабаритних моделях літальних апаратів для вимірювання температури коротких теплових імпульсів, за умов натурних випробувань у польоті.

Тому, на даний час, широко продовжують використовуватись контактні вимірювальні перетворювачі для вимірювання температури газових продуктів згорання, а саме термопари. Сучасні термопари можуть вимірювати температуру до 2500 °С та витримувати значний тиск газового потоку, порівняно дешеві для виготовлення та прості у використанні. Проте, основним недоліком є їх теплова інерційність, яка викликана масою спаю та підвідних проводів та масою захисного чохла термопари.

Проаналізувавши існуючі методи вимірювання температури було запропоновано використовувати для вимірювання температури коротких теплових імпульсів термопару у перехідному режимі її роботи, а дійсні значення температурного сигналу відновлювати шляхом вирішення оберненої задачі вимірювання.

Були проаналізовані методи ідентифікації динамічних характеристик термоперетворювачів. Встановлено, що найбільш придатними з точки зору практичної реалізації форми вхідного температурного імпульсу є перехідна характеристика та АФЧХ термопари. Розроблено три методи ідентифікації динамічних характеристик термопар. Два методи засновані на внутрішньому розігріві спаю термопари струмом, а третій метод використовує зовнішній розігрів спаю термопари лазерним променем.

Для апроксимації перехідної характеристики термопари було обрано моделі на основі експоненціального рівняння, яке є найбільш «природним» для опису реакції термопари на стрибок температури. Виразивши коефіцієнти при експонентах через сталі часу, було вдосконалено моделі перехідної характеристики термопари, що дозволило вдвічі скоротити кількість незалежних змінних моделі.

У дисертаційній роботі у науковому плані отримано такі результати:

1. вперше розроблено метод ідентифікації термопар шляхом визначення АФЧХ термопари за допомогою струму інфранизької частоти, який має перевагу над іншими методами за рахунок стабільності отримання значень сталих часу. Особливість цього методу полягає у створенні температурного сигналу шляхом розігріву спаю термопари електричним струмом гармонічної форми. При цьому на затискачах термопари виділяється напруга другої гармоніки, зумовлена розігрівом термопари згідно ефекту Джоуля. Також, має місце перша гармонічна складова, яка зумовлена падінням напруги через наявність омичного опору проводів термопари та дією ефектів Томсона та Пельть'є, які пропорційні першому ступеню протікаючого через термопару струму. Шляхом подавлення та цифрової фільтрації першої гармоніки виділяється тільки друга, амплітуда та фаза якої порівнюється із амплітудою та фазою другої гармоніки вхідного сигналу, яку отримують шляхом піднесення до квадрату вхідної гармоніки струму, що розігріває термопару. Відношення амплітуд вихідної та вхідної напруг по другій гармоніці дає АЧХ. Різниця їх фаз по другій гармоніці дає ФЧХ. ФЧХ є дуже важливою, тому що дозволяє визначити кількість аперіодичних ланок в термопарі, яка по суті є чорним ящиком з невідомою кількістю сталих часу. Але відомо, що кожна стала часу може створювати фазовий зсув не більше 90 град. Ця інформація дозволяє передбачити очікувану модель динамічної характеристики та визначити її коефіцієнти шляхом складання та розв'язування системи нелінійних рівнянь числовими методами;

2. розроблено метод ідентифікації термопар радіоімпульсом струму, що дозволило отримати повну перехідну характеристику на відміну від інших методів, що використовують струм для розігріву, які отримують спадний фронт та потім математично перераховують у наростаючий фронт. Даний метод використовує радіоімпульс струму для розігріву спаю термопари. Шляхом рознесення частоти розігрівачого сигналу та реакції термопари, стало можливим виділення повільно наростаючого сигналу

термо-ЕРС термопари на фоні високочастотного сигналу, який розігріває термопару, використовуючи фільтрацію високочастотної складової;

3. удосконалено метод вимірювання температури коротких теплових імпульсів, який дозволяє зменшити динамічну похибку вимірювання температури коротких теплових імпульсів у реальному часі, шляхом використання отриманих динамічних характеристик термопари. Особливістю цього метода є використання сталих часу термопари для компенсації її теплової інерційності та, як наслідок, підвищення точності вимірювання температури коротких теплових імпульсів. Сталі часу термопари отримують на основі апроксимації амплітудно-частотної характеристики термопари. Амплітудно-частотну характеристику отримують запропонованим вище методом ідентифікації динамічних характеристик термопар. Кожна визначена стала часу характеризує інерційну ланку першого порядку. Включивши інерційні ланки у зворотній зв'язок системи із зворотнім зв'язком, компенсується теплова інерційність термопари, яка описується визначеними сталими часу. Послідовно з'єднавши ланки із включеною у зворотній зв'язок інерційні ланки, які відповідає знайденим сталим часу, можна компенсувати вплив теплової інерційності термопари на вхідний температурний сигнал. Тим самим, зменшується динамічна похибка вимірювання температури термопарою. При вимірюванні температури коротких теплових імпульсів термопара працює у перехідному режимі та не встигає розігрітись до максимальної температури, що дозволяє використати термопару із меншим температурним діапазоном вимірювання та більшим динамічним діапазоном, що також підвищить точність вимірювання температури.

4. удосконалено методи ідентифікації динамічних характеристик термопар лазерним променем шляхом створення квазіступінчатого сигналу, який дозволяє отримати режим установлення сигналу термо-ЕРС на виході термопари;

У дисертаційній роботі отримано такі практичні результати:

- розроблено методику ідентифікації термопар радіоімпульсом струму, яка дозволяє більш точно визначати перехідну характеристику імпульсних термопар;

- розроблено пристрій для визначення динамічних характеристик термопар із використанням радіоімпульсу струму, який дозволяє отримати перехідні характеристики термопар на місці їх встановлення, не зупиняючи технологічний процес.

- розроблено методику ідентифікації термопар на основі використання лазерного променя. Дана методика дозволяє отримувати перехідну характеристику термопар у лабораторних умовах;

- розроблено пристрій для визначення динамічної характеристики термопар із використанням лазерного променя для створення ступінчатої зміни температури на вході термопар.

Розроблено систему ідентифікації термопар на основі отримання їх АФЧХ, що дозволяє більш точно визначити динамічну модель термопар.

Створено портативний пристрій вимірювання температури коротких теплових імпульсів, який дозволяє компенсувати динамічну похибку у реальному часі і тим самим підвищити точність вимірювання температури.

Ключові слова: температура, тепловий імпульс, вимірювання, перехідна характеристика, АФЧХ, підвищення точності, ідентифікація динамічних характеристик, термопара.

ABSTRACT

Kozyr O.V. Improving the accuracy of temperature measurements of short heat pulses. – Manuscript copyright.

Candidate of Engineering Science (PhD) thesis in specialty 05.01.02 - Standardization, Certification and Metrological Support (152 - Metrology and

Information-Measuring Equipment). - National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, 2021.

The thesis contains the results of research aimed at improving the accuracy of measuring the temperature of short heat pulses.

The analysis of current state of development of methods and tools for measuring temperature, which are based on the use of the dependence of various physical phenomena on temperature, as direct temperature measurement is not possible, is carried out in the work.

In particular, methods of temperature measurement were analyzed and classified. Contactless, radiometric methods have advantages in measuring the temperature of solid objects with known spectral characteristics of radiation. However, they have a significant methodological error in measuring the temperature of gas flows that occur during explosions or bench tests of aircraft and rocket engines. This error is due to the need to have a priori information about the radiation coefficients depending on the number of spectral components used to measure temperature.

Therefore, at present, contact measuring sensors for measuring the temperature of gaseous combustion products, namely thermocouples, continue to be widely used. Modern thermocouples can measure temperatures up to 2500 ° C and withstand significant gas flow pressure, are relatively inexpensive to manufacture and easy to use. However, the main disadvantage is their thermal inertia, which is caused by the mass of solder and supply wires and the mass of the protective cover of the thermocouple.

After analyzing the existing methods of temperature measurement, for measuring the temperature of short heat pulses it was proposed to use a thermocouple in the transient mode operation and the current values of the temperature signal, which is determined by inverse measurement problems.

Methods for identifying the dynamic characteristics of thermocouples were analyzed. It is established that the most suitable, from the point of view of practical realization of the form of the input temperature pulse, are the transient

characteristic and Bode Plot of the thermocouple. The work presents three developed methods for identifying the dynamic characteristics of thermocouples. Two methods are based on the internal heating of the thermocouple solder by current, and the third method uses the external heating of the thermocouple solder by a laser beam.

To approximate the transition characteristic of the thermocouple, were chosen models based on the exponential equation, which is the most "natural" for describing the reaction of the thermocouple to the temperature jump. The thermocouple model was improved by expressing the coefficients at the exponents over time constants, which allowed to halve the number of unknown coefficients of the model.

In the dissertation work in the scientific plan the following results are received:

1. For the first time, a method of thermocouple identification by a radio pulse of current, which allowed to obtain a complete transient characteristic in contrast to other methods that use current for heating, which receive a decreasing front and then mathematically converted to an increasing front, is proposed. This method uses a radio current pulse to heat the thermocouple. By spreading the frequency of the heating signal and the reaction of the thermocouple, it became possible to isolate the slowly increasing signal of the thermocouple against the background of a high frequency signal that heats the thermocouple using analog filtering of the high frequency component by a notch filter;

2. For the first time was developed a method of thermocouple identification by determining the frequency response of a thermocouple using infra-low frequency current, which has an advantage over other methods due to the stability of obtaining time constant values. The peculiarity of this method is to create the total temperature by heating the junction of the thermocouple with an electric sinusoidal current. In this case, the voltage of the second harmonic is released on the terminals of the thermocouple, due to the heating of the thermocouple according to the Joule effect. Also, there is the first harmonic component, which is

due to the voltage drop due to resistance of the thermocouple wires and the action of the Thomson and Peltier effects, which are proportional to the first degree of the current flowing through the thermocouple. By compensation and digital filtering of the first harmonic, only the second is selected, the amplitude and phase of which is compared with the amplitude and phase of the second harmonic of the input signal, which is obtained by squaring the input harmonic of the current heating the thermocouple. The ratio of the amplitudes of the output and input voltages on the second harmonic gives the frequency response. The difference of their phases on the second harmonic gives Phase response. Phase response is very important because it allows you to determine the number of aperiodic units in the thermocouple, which is essentially a black box with an unknown number of time constants. But it is known that each time constant can create a phase shift of not more than 90 degrees. This information allows us to predict the expected model of the dynamic characteristic and determine its coefficients by solving a system of nonlinear equations;

3. Improved methods for identifying the dynamic characteristics of the laser beam by creating a quasi-stage signal, which allows to obtain the mode of setting the thermoEMF signal at the output of the thermocouple.

4. The method of measuring the temperature of short thermal pulses is improved, which allows to compensate the dynamic measurement error in real time, by using the parameters obtained on the basis of identification of dynamic characteristics of the thermocouple in the system of thermal inertia compensation of the thermocouple. The peculiarity of this method is the use of time constants of the thermocouple to compensate its thermal inertia and, as a consequence, increase the accuracy of measuring the temperature of short thermal pulses. The time constants of the thermocouple will be obtained on the basis of the approximation of the frequency response of the thermocouple. The frequency response is obtained using the above method of identifying the dynamic characteristics of thermocouples. Each defined time constant characterizes the link of the delay of the first order. By including the inertia link in the feedback system of the system, the thermal inertia

of the thermocouple, which is described by a certain time constant, is compensated. By connecting the links in series with the inertial link connected to the feedback, which corresponds to the time constant found, it is possible to fully compensate for the effect of thermal inertia of the thermocouple on the input temperature signal. This compensates dynamic error of thermocouple temperature measurement. When measuring the temperature of short heat pulses, the thermocouple operates in transient mode and does not have time to warm up to the maximum temperature, which allows you to use a thermocouple with a smaller temperature range and greater dynamic range, which will also increase the accuracy of temperature measurement.

The following practical results were obtained in the dissertation:

A method of identification dynamic characteristics of thermocouples by means of radio pulse current has been developed, which allows to more accurately determining the transient characteristic of pulsed thermocouples.

A device for determining the dynamic characteristics of thermocouples using a radio pulse of current has been developed, which allows to obtain transient characteristics of thermocouples at the place of their installation without stopping the technological process.

A method of thermocouple identification based on the use of a laser beam has been developed. This technique allows to obtain the transient characteristics of the thermocouple in the laboratory.

A device for determining the dynamic characteristics of a thermocouple using a laser beam to create a stepwise change in temperature at the thermocouple inlet has been developed.

A system for identifying thermocouples based on obtaining their Frequency response has been developed, which allows to more accurately determining the dynamic model of a thermocouple.

A portable device for measuring the temperature of short heat pulses has been created, which allows to compensate the dynamic error in real time and thus increase the accuracy of temperature measurement.

Keywords: temperature, thermal impulse, measurement, transient characteristic, bode plot, increase of accuracy, identification of dynamic characteristics, thermocouple.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Публікації у фахових видання категорії «А»:

1. Tesyk Yu.F. Investigation of characteristics of precision amplifiers / Yu.F. Tesyk, R.M. Moroz, Yu.M. Tuz, O.V. Kozyr // Technical Electrodynamics. Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine. - No 6, 2020. P. 87 – 93. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.06.087> . (Наукометрична база **Scopus**)

Публікації у фахових виданнях:

2. Туз Ю.М. Безконтактные методы измерения температуры пламени / Ю.М. Туз, С.А. Шурпач, О.В. Козыр // Метрологія та прилади. – 2014. – № 1, II (45). С. 228—233.

3. Радченко С. Г. Применение равномерно распределенных последовательностей для решения прикладных задач моделирования / С. Г. Радченко, О. В. Козир // Математичні машини і системи. – 2014. - № 1. – С. 151-158.

4. Радченко С. Г. Планы экспериментов для получения моделей высокой точности / С. Г. Радченко, О. В. Козир // Математичні машини і системи. – 2014. - № 2. – С. 117-127.

5. Туз Ю. М. Спосіб визначення динамічних характеристик термопар за допомогою радіоімпульсу струму / Ю. М. Туз, О. В. Козир, А. В. Порхун. // Системи обробки інформації. – 2016. – №6. – С. 164–166. http://nbuv.gov.ua/UJRN/soi_2016_6_44

6. Козир О.В. Вимірювання нестационарної температури контактним методом / О.В. Козир // Інформаційні системи, механіка та керування. - 2017. - № 17. С. 134-143. DOI: <https://doi.org/10.20535/2219-3804172017100686>, <http://ismc.kpi.ua/article/view/100686> .

7. Козир О.В. Відновлення форми температурного імпульсу за допомогою метод деконволюції/ О.В. Козир // Механіка гіроскопічних систем. - 2017. - № 34. С. 89-97. DOI: <https://doi.org/10.20535/0203-3771342017130269>, <http://mgsys.kpi.ua/article/view/130269> .

8. Козир О.В. Математичне моделювання перехідних характеристик термопар / О.В. Козир // Інформаційні системи, механіка та керування. – 2018. - № 19. С. 101-114. <https://doi.org/10.20535/2219-3804192018162296> , <http://ismc.kpi.ua/article/view/162296> .

9. Козир О.В. Дослідження моделей перехідної характеристики термопар / О. В. Козир, Ю. М. Туз // Механіка гіроскопічних систем. – 2019. № 20. С. 13-22. <https://doi.org/10.20535/2219-3804202019194307>

Монографії:

10. Автоматизація аналізу вимірювальних пристроїв: монографія / Туз Ю.М., Шумков Ю.С., Козир О.В. – Київ, 2014. – 172 с.

Патенти:

11. Спосіб визначення динамічних характеристик термоперетворювачів: пат. 109832 Україна. № 201602293; заявл. 10.03.2016; опубл. 12.09.2016, Бюл. № 17. 4 с.

12. Пристрій для визначення динамічних характеристик термопар: пат. 110516 України. № 201604176; заявл. 15.04.2016; опубл. 10.10.2016, Бюл. № 19. 4 с.

13. Спосіб визначення динамічних характеристик термоперетворювачів: пат. 110515 України. № 201604174; заявл. 15.04.2016; опубл. 10.10.2016, Бюл. № 19. 4 с.

14. Пристрій для визначення динамічних характеристик термоперетворювачів: пат. 112499 України. № 201604190; заявл. 18.04.2016; опубл. 26.12.2016, Бюл. № 24. 4 с.

Матеріали конференцій:

15. Туз Ю. М. Особливості вимірювання температури коротких теплових імпульсів / Ю. М, Туз, О. В. Козир // XII Міжнародна науково-технічна конференція «МЕТРОЛОГІЯ ТА ВИМІРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА (МЕТРОЛОГІЯ – 2020) (СЕКЦІЯ 7. ТЕРМОМЕТРІЯ), 6–8 жовтня 2020 р.

Харків. : тези доп. / Національний науковий центр «Інститут метрології». – Харків, 2020. – С. 106

16. Туз Ю. М. Вимірювання температури полум'я оптичними методами / Ю. М. Туз, О. В. Козир // Наук.-техн. конф. викладачів, науковців, аспірантів та студентів присвячена Дню Науки – 2014, 26-28 травня 2014 р.: зб. тез доп. – К., 2014. – С. 85-88.

17. Козир О.В. Вимірювання імпульсу температури термопарами / О.В. Козир // XXI наук.-техн. конф. студ. та молодих учених «Гіротехнології та конструювання літальних апаратів»: Тези доп. учасн. – К.: ІВЦ “Видавництво «Політехніка”», 2018. – С. 33 – 34.

18. Туз Ю.М. Автоматизація аналізу вимірювальних пристроїв / Ю.М. Туз, О.В. Козир // X Міжнар. наук. тех.. конф. «Метрологія та вимірювальна техніка», 5–7 жовт. 2016 р., Харків : тези доп. / ННЦ Інститут метрології. – Харків, 2016. – С. 48–49.

19. Туз Ю.М. Математична модель формування випробувальних сигналів експоненціальними сплайнами / Ю. М. Туз, Ю. С. Шумков, О. В. Козир // «Technical Using of Measurement-2020»: Тези доповідей VI Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених у царині інформаційно-вимірювальних технологій та метрології, 4–7 лютого 2020 року. Академія метрології України. – Львів: ТЗОВ «Галицька видавнича спілка», 2020. – С. 152-156.

20. Козир О.В. Вимірювання нестационарної температури високотемпературних газових потоків / О. В. Козир // XI Міжнар. наук.-тех. конф. «Гіротехнології, навігація, керування рухом керування рухом і конструювання авіаційно-космічної техніки» (секція Інформаційні технології), 13-14 квітня 2017 р., Київ : збір. доп. / КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ, 2017. –С 68 – 71.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ.....	16
ВСТУП	17
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ КОРОТКИХ ТЕПЛОВИХ ІМПУЛЬСІВ	26
1.1. Вимірювання температури теплового імпульсу	26
1.2. Аналіз публікацій	27
1.3. Методи вимірювання температури	30
1.3.1. Вимірювання температури безконтактними методами	31
1.3.1.1. Інфрачервона пірометрія	35
1.3.1.2. Точність вимірювання температури пірометрами	38
1.3.2. Напівконтактні методи вимірювання температури	42
1.3.3. Вимірювання температури контактними методами	43
Висновки до розділу 1	48
РОЗДІЛ 2. ВДОСКОНАЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОПАР	50
2.1. Термоелектричні властивості термопар	50
2.2. Вибір планів експериментів для отримання моделей високої точності	52
2.2.1. Дослідження статистичних властивостей $ЛП_t$ послідовностей ...	53
2.3. Дослідження математичних моделей термопар	57
2.4. Вдосконалення динамічної моделі термопар	71
2.5. Застосування високочастотного сигналу для ідентифікації динамічної характеристики термопар	73
2.6. Застосування сигналу інфранизької частоти для ідентифікації динамічної характеристики термопар на основі АФЧХ	79
2.7. Дослідження похибки математичних моделей перехідної та амплітудно-частотної характеристик термопар	83
Висновки до розділу 2	95

	15
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОПАР	97
3.1. Дослідження динамічних характеристик існуючих термопар	97
3.2. Експериментальне дослідження динамічних характеристик термопар радіоімпульсом струму	116
3.3. Експериментальне дослідження динамічних характеристик термопар на основі АФЧХ	119
Висновки до розділу 3	125
РОЗДІЛ 4. ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ВІДНОВЛЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ КОРОТКИХ ТЕПЛОВИХ ІМПУЛЬСІВ	126
4.1. Визначення сталих часу термопар на основі використання лазерного променя	126
4.2. Визначення сталих часу термопар на основі АФЧХ термопар	132
4.3. Отримання спектрального складу напруги струморозігрівачої термопару із термозалежних дротів	135
4.4. Удосконалена методика вимірювання температури коротких теплових імпульсів	139
Висновки до розділу 4	148
ВИСНОВКИ	149
Список використаних джерел	151
ДОДАТОК А. СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РОБОТИ	158
ДОДАТОК Б. АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ ТА ВИКОРИСТАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ	162

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

АЦП	Аналого-цифровий перетворювач
ЦАП	Цифро-аналоговий перетворювач
АЧХ	Амплітудно-частотна характеристика
Термо-ЕРС	Термоелектрорушійна сила
АЧТ	Абсолютно чорне тіло
АФЧХ	Амплітудо-фазочастотна характеристика
ДХ	Динамічна характеристика

ВСТУП

Вимірювання температури складає значну частину всіх вимірювань в сучасній метрології. Температура впливає на якість виготовлення продукції, на хід багатьох технологічних процесів, а також на ефективність процесів горіння та детонації. Зазвичай, температуру вимірюють в процесі виробництва продукції для контролю та управління за якістю продукції та ефективністю виробничих процесів. Температура є одним із основних факторів, який зумовлює точність вимірювання інших фізичних величин. З розширенням сфер застосування точних вимірювань, поглибленням досліджень високотемпературних процесів в газових середовищах, розширився пошук нових та вдосконалення існуючих методів та засобів вимірювання температури.

Часто при температурних вимірюваннях доводиться працювати із тепловими імпульсами. Тепловий імпульс — це тепловий потік, який виникає між тілами, змінює внутрішню енергію одного з тіл і відповідно змінює його температуру. На практиці, коротким тепловим імпульсом є імпульс тривалість якого менша за найменшу сталу часу термоперетворювача.

Вимірювання миттєвих значень температури високотемпературних газових потоків потребує використання не інерційних первинних перетворювачів. Найчастіше температуру газових потоків вимірюють за допомогою термопар. Дані перетворювачі характеризуються значною тепловою інерцією, що зменшує точність вимірювання динамічної температури. Одним із рішень цієї проблеми є вимірювання температури термопарою в перехідному режимі її роботи, з наступним розрахунком дійсної температури. Для цього, потрібно наперед мати динамічну модель термопари. Динамічні моделі реальних об'єктів отримують використовуючи метод ідентифікації динамічних характеристик. Наявні методи ідентифікації динамічних характеристик термопар мають значні недоліки, які викликані труднощами створення вхідних температурних сигналів стандартної форми.

Вдосконаленню цих методів, а також методів вимірювання температури коротких теплових імпульсів присвячена дана дисертація.

Актуальність теми. Вимірювання температури газових продуктів горіння на виході камер згорання двигунів літаків та ракет при стендових або натурних випробуваннях, розжарених газових потоків, які виникають при вибухах (наприклад, при випробуваннях систем від'єднання літальних апаратів та ін.), виявляється надзвичайно складним завданням для практичної реалізації, в умовах надзвичайно високих тисків і реактивних середовищ, із заданим ступенем точності. Умови даних вимірювань накладають жорсткі обмеження на параметри системи вимірювання температури, такі як: первинні перетворювачі повинні вимірювати високі значення температури (до 2500 °С), витримувати значний тиск та вплив агресивного середовища на протязі тривалого часу і не руйнуватись, що забезпечується використанням захисних оболонок; перетворювачі повинні мати порівняно малі габаритні розміри, щоб зменшити збурення температури, яке вносить перетворювач в середовище вимірювання, а також задовольнити вимоги малих просторів для монтажу чутливих елементів та вимірювальних каналів; наявність додаткових захисних засобів і заходів, спрямованих на збереження вимірювальних каналів і системи в цілому від дії агресивного середовища. Найбільшу складність становить вибір первинних перетворювачів температури і захисного обладнання.

Задоволення вищезгаданих обмежень із збереженням необхідної точності і достовірності вимірювання, оскільки в більшості випадків вимірювання температури коротких теплових імпульсів має надзвичайно обмежену кількість випробувань, значно зменшує перелік первинних перетворювачів придатних для застосування в цих умовах. В останні десятиліття широкого розповсюдження набули безконтактні методи вимірювання температури. Серед них варто виділити оптичні засоби вимірювання температури. Широке застосування оптичних перетворювачів пов'язане із значним прогресом в області напівпровідникових матеріалів та

збільшенням обчислювальних потужностей мікропроцесорної техніки. Перевагами оптичних засобів є відсутність впливу перетворювача на температурне поле в середовищі, можливість визначення просторового розподілу температури в значному об'ємі, та головне це надзвичайно малі значення часу відгуку перетворювачів (10^{-6} с [1]). Проте, перераховані переваги оптичних засобів не дозволили їм витіснити контактні засоби вимірювання температури. Перш за все, це пов'язано із значними методичними похибками при застосуванні оптичних методів. Носієм інформації про температуру середовища є електромагнітне випромінювання. Математичні залежності температури від інтенсивності і спектра електромагнітного випромінювання розроблені для математичної абстракції – абсолютно чорного тіла. Існує декілька рівнянь, які описують цю залежність при різному рівні ідеалізації. В реальних вимірюваннях ці рівняння мають обмежене застосування, при вимірюванні температури коротких теплових імпульсів, оскільки спектральна щільність розподілу електромагнітного випромінювання, яку можна використати для визначення температури, залежить від хімічного складу об'єкту вимірювання, його фізичного стану, стану поверхні (границі розділу об'єкта і навколишнього середовища). Також потрібно враховувати той факт, що тільки частина загального випромінювання викликана тепловими процесами, це особливо стосується газових середовищ, де спектр випромінювання може бути викликаний нетепловим випромінюванням (наприклад, за рахунок флюоресценції). Іншою перепоною на шляху широкого застосування оптичних засобів є ціна обладнання. Тому і сьогодні в більшості випадків перевагу віддають контактним засобам вимірювання температури. Найбільш поширеними, серед них, є термперетворювачі на основі термопар, що пояснюється простотою виготовлення датчиків та побудови вимірювальних каналів. Так, наприклад, на стендових випробуваннях реактивних двигунів застосовуються матриці із термопар.

Головним недоліком контактних методів вимірювання з використанням термопар є їх теплова інерційність, що не дозволяє проводити вимірювання температури яка швидко змінюється у часі. Також, застосування термопар для вимірювання температури газових потоків при вибухах, передбачає застосування екранованих термопар, або відкритих термопар із товстих термоелектродів, що збільшує теплову інерцію і тим самим збільшує динамічну похибку вимірювання температури.

Звідси випливає необхідність дослідження динамічних характеристик термопар і розробки методики відновлення значення температури за значенням термо-ЕРС термопари в перехідному режимі її роботи, при відносно невисоких значеннях температури чутливого елемента термопари.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Напрямок дисертаційних досліджень пов'язаний із загальним напрямом наукової роботи кафедри інформаційно-вимірювальних технологій КПІ ім. Ігоря Сікорського, створення та дослідження засобів вимірювання температури та теплофізичних параметрів середовищ. Тематика дисертаційної роботи пов'язана з науковою темою «Дослідження та розробка експериментальних зразків систем телеметричних вимірювань мініатюрних літальних засобів» в рамках договору №27/01-НП від 06.03.2015 року. Основні теоретичні та прикладні результати досліджень знайшли відображення у відповідних звітах про науково-дослідні роботи.

Мета і задачі дослідження. Мета дисертаційної роботи полягає у підвищенні точності вимірювання температури коротких теплових імпульсів за рахунок розробки методик ідентифікації динамічних характеристик термопар та використання динамічних характеристик для відновлювання форми температури короткого теплового імпульсу за виміряними значеннями термо-ЕРС термопари.

Для реалізації цієї мети поставлено та вирішено такі основні завдання:

1. Аналіз існуючих методів та засобів вимірювання температури із метою обґрунтування необхідності вирішення науково-практичної задачі, яка розглядається у роботі.

2. Теоретичний аналіз та дослідження динамічних характеристик термопар та розробка методів ідентифікації динамічних характеристик термопар для різних умов застосування.

3. Розвиток методу ідентифікації динамічних характеристик термопар на основі їх перехідної характеристики шляхом зовнішнього розігріву спаю термопари лазерним променем, який створює квазіступінчатий сигнал температури.

4. Удосконалення методу ідентифікації динамічних характеристик термопар шляхом внутрішнього розігріву спаю термопари струмом гармонічної форми, який би дозволив отримати повну перехідну характеристику термопари.

5. Розробка методу ідентифікації динамічних характеристик термопар, який заснований на визначенні сталих часу термопари шляхом аналізу амплітудо-фазочастотної характеристики термопари за рахунок внутрішнього розігріву спаю термопари гармонічним струмом.

6. Розробка методу вимірювання температури коротких теплових імпульсів за рахунок відновлення форми температури короткого теплового імпульсу за вимірними значеннями термо-ЕРС термопари, шляхом використання апаратурно-реалізованої динамічної характеристики термопари.

Об'єктом дослідження є процес вимірювання температури коротких теплових імпульсів.

Предметом дослідження є методи та засоби підвищення точності вимірювання температури коротких теплових імпульсів.

Методи дослідження. Розв'язання поставлених завдань виконано із використанням методів системного аналізу, математичного моделювання та експериментальних досліджень, теорії ймовірності і випадкових процесів,

математичної статистики і теорії похибок вимірювань, чисельних методів розв'язання інтегральних рівнянь та обернених задач, глобального випадкового пошуку екстремуму.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Вперше розроблено метод ідентифікації динамічних характеристик термопар, заснований на визначенні сталих часу термопар шляхом аналізу їх амплітудо-фазочастотних характеристик по другій гармоніці, яку отримують внутрішнім розігрівом спаю термопари гармонічним струмом. У результаті цього, розігрів спаю термопари, на відміну від існуючих методів, проводиться стаціонарним процесом.

2. Розроблено новий метод вимірювання поточної температури коротких теплових імпульсів, який відрізняється можливістю відновлювання форми температури короткого теплового імпульсу за вимірними значеннями термо-ЕРС термопари, за рахунок включення у зворотній зв'язок операційного підсилювача апаратурно-реалізованої динамічної характеристики термопари.

3. Розроблено метод ідентифікації динамічної характеристики термопари, заснований на внутрішньому розігріві спаю термопари струмом гармонічної форми із періодом, що на декілька порядків менший від найменшої передбачуваної сталої часу, що забезпечує дію на спай температурного сигналу у формі стрибка, який, на відміну від існуючих методів внутрішнього розігріву спаю термопари, дозволяє отримати повну перехідну характеристику.

4. Удосконалено метод ідентифікації динамічної характеристики термопари, заснований на зовнішньому розігріві спаю термопари лазерним променем шляхом створення квазіступінчатого сигналу температури, який, на відміну від існуючих методів, дозволяє отримати режим устанавлення сигналу термо-ЕРС на виході термопари.

Практичне значення отриманих результатів:

1. Практичне значення отриманих результатів полягає у втіленні розроблених методів ідентифікації динамічних характеристик термопар у реальних вимірювальних системах. У зв'язку з чим, рекомендовано вказувати у технічній документації до термопар крім статичної характеристики, ще й динамічну характеристику.

2. Розроблений метод ідентифікації динамічних характеристик термопар, шляхом визначення сталих часу термопар на основі аналізу їх амплітудо-фазочастотних характеристик по другій гармоніці, які отримують внутрішнім розігрівом спаю термопар гармонічним струмом, дозволяє отримати відносну стандартну невизначеність найбільшої сталої часу, що не перевищує 0,3%. Використання неповної моделі динамічної характеристики та неврахування інших сталих часу призводить до похибки визначення однієї сталої часу у 8%.

3. Розроблений метод вимірювання температури коротких теплових імпульсів був апаратно реалізований при розробці інформаційно-вимірювальної системи збору та аналізу параметрів польоту відокремлюваного у повітрі елемента. Даний метод використовувався для вимірювання температури вибуху піропатрону, системи від'єднання елемента від ракетносія, що дозволило покращити траєкторію польоту відокремлюваного елемента.

4. Розроблений метод вимірювання поточної температури коротких теплових імпульсів забезпечує відносну стандартну невизначеність вимірювання температури короткого теплового імпульсу, яка не перевищує 5%.

5. Результати дисертаційного дослідження впроваджені: у науково-дослідному інституті автоматизації експериментальних досліджень, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського".

Особистий внесок здобувача. Наукові положення та результати, викладені в дисертації, отримані автором особисто. Роботи [6-8, 17, 20] виконані без співавторів. У наукових працях, опублікованих у співавторстві, автору належить: у роботі [1] - дослідження прецизійних підсилювачів; [2] – аналіз та класифікація методів вимірювання температури; [3-4] – розробка планів експериментів на основі ЛПТау рівномірно розподілених послідовностей для пошуку оптимальних значень параметрів моделей та їх статистичне дослідження; [5, 11-12] – розробка методу та системи ідентифікації динамічних характеристик на основі використання радіоімпульсу струму; [9] – дослідження динамічних моделей термопар; [10] – дослідження методів автоматизації аналізу моделей термоперетворювачів; [13-14] – розроблено та досліджено метод та пристрій ідентифікації динамічних характеристик термопар із використанням квазіступінчатого лазерного променя; [15] – розробка та дослідження методу ідентифікації динамічних характеристик термопар на основі АФЧХ по другій гармоніці, шляхом розігріву термопари гармонічним струмом інфранизької частоти; [16] - досліджено оптичні методи вимірювання температури полум'я; [18] – досліджено властивості визначників, створено рівняння похибок в матричній формі з можливістю точного представлення сумарної похибки незалежно від розміру похибок складових структурної схеми; [19] - досліджено моделі випробувальних сигналів на основі експоненціальних сплайнів.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дослідження доповідалися та обговорювалися на: Наук.-техн. конф. викладачів, науковців, аспірантів та студентів присвячена Дню Науки (Київ, 2014); XXI науково-технічної конференції студентів та молодих «ГІРОТЕХНОЛОГІЇ, НАВІГАЦІЯ, КЕРУВАННЯ РУХОМ ТА КОНСТРУЮВАННЯ АВІАЦІЙНО-КОСМІЧНОЇ ТЕХНІКИ», (Київ, 2018); X Міжнар. наук. тех.. конф. «Метрологія та вимірювальна техніка», (Харків, 2016); XI Міжнар. наук.-тех. конф. «Гіротехнології, навігація, керування рухом керування рухом і конструювання авіаційно-космічної техніки»

(секція Інформаційні технології) (Київ, 2017); VI Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених у царині інформаційно-вимірювальних технологій та метрології «Technical Using of Measurement-2020» (Львів, 2020); XII Міжнародна науково-технічна конференція «МЕТРОЛОГІЯ ТА ВИМІРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА (МЕТРОЛОГІЯ – 2020) (СЕКЦІЯ 7. ТЕРМОМЕТРІЯ) (Харків, 2020).

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 20 наукову працю, у тому числі 1 монографію, 9 статей у наукових фахових виданнях (з них 1 стаття у фахових виданнях України категорії «А»), 4 патенти на корисні моделі, 6 тези доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

Структура та обсяг дисертаційної роботи. Дисертація складається із змісту, переліку умовних позначень та скорочень, вступу, чотирьох розділів із висновками, загальних висновків, списку використаних джерел із 54 найменувань та 2 додатків. Загальний обсяг роботи складає 164 сторінки з яких – 157 сторінок основного тексту, 71 рисунок та 9 таблиць.

РОЗДІЛ І

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ КОРОТКИХ ТЕПЛОВИХ ІМПУЛЬСІВ

1.1. Вимірювання температури теплового імпульсу

Короткотривалі високотемпературні процеси, які мають місце при різного роду вибухах мають широке застосування в різних галузях промисловості. Всі ці процеси супроводжуються виникненням теплового імпульсу. Важливою характеристикою теплового імпульсу є зміна температури, яка викликана цим імпульсом. Вимірювання температури імпульсу дає можливість дослідити та контролювати процеси, які виникають при протіканні імпульсу.

Технічні показники ракетних двигунів, такі як міцність, витривалість, ефективність роботи та інші, в значній мірі залежать від розподілу температури в факелі викидних газів. Від температури полум'я залежить ефективність використання джерел енергії (пальників) в високотемпературних процесах. Просторовий і часовий розподіл температури і коефіцієнту випромінювання полум'я, в системах спалювання, впливає на процеси горіння і виникнення забруднення.

Розвиток в Україні авіаційної та ракетної галузей призвів до широкого застосування відокремлюваних в повітрі об'єктів. Також, стала економія ресурсів при проектуванні та випробуванні авіаракетної техніки, вимагає значно знизити або оптимізувати затрати на виготовлення дослідних зразків. Гостро стоїть завдання натурного моделювання з використанням моделей літальних апаратів, оснащених системами вимірювання параметрів польоту. Одним із таких завдань є створення фізичних моделей відокремлюваних від носіїв елементів. Серед параметрів, які вимірюються в польоті, велике значення має температура вибуху піропатронів. Вимірювання температури в зоні кріплення носія і відокремлюваного елемента, в момент їх роз'єднання, має першочергове значення, оскільки температура впливає на вибір

матеріалів деталей з'єднання та корпусу, величину початкового імпульсу, швидкість та траєкторію від'єднання. Дане завдання є нетривіальним і ставить перед дослідниками ряд вимог, які повинні бути враховані:

- тривалість імпульсу (газового потоку продуктів згорання) складає мілісекунди;
- розміщення чутливого елемента вимірювального перетворювача в зоні безпосереднього контакту з розжареним газовим потоком;
- великі значення тиску газового потоку;
- температура газового потоку досягає 2500 °С;
- значні перевантаження (до 10000 g) при різних сценаріях зіткнення фізичної моделі з іншими об'єктами при випробуваннях;
- малий об'єм для розміщення та монтажу первинного перетворювача.

Вирішення завдання вимірювання температури коротких теплових імпульсів (розжареного потоку газових продуктів згорання), за умов дотримання наведених вище вимог, вимагає використання теорії та практики вимірювання температури газових потоків та полум'я, які ґрунтуються на засадах термодинаміки газових процесів, теорії теплообміну та теорії динамічних вимірювань.

1.2. Аналіз публікацій

Рішення зазначених завдань пов'язано із підвищенням точності вимірювання температури, вибором та визначенням динамічних характеристик вимірювальних перетворювачів та відновленням значень температури рішенням оберненої задачі вимірювання. Істотний внесок в розвиток теорії вимірювання температури зробили вчені Г. Рибо, А. Е. Кадышевич, П. Ф. Похил, В. М. Мальцев, Б. И. Олейник, Н. А. Яришев, О. А. Геращенко, А. Н. Гордов, В. И. Лах, Я. Т. Луцик, Б. И. Стадник, Ю. М. Туз, А. Н. Магунов, Р. J. Dyne, X. M. Хашеміан. та ін..

Значний внесок в розвиток теорії динамічних вимірювань, засади якої широко використовуються в теорії вимірювання температури, зробили

М. Д. Вайсбанд, В. А. Грановський, П. П. Орнатський М. Г. Н. Солопченко, Ю. М. Туз, І. П. Захаров, О. В. Полярус, В. М. Чинков, С. І. Кондрашов, П. Ф. Щапов, Б. Ю. Цветков, Г. Г. Чуновкіна, Ю. С. Етингер, М. Раун, V. Mulhall, T. Macher, D. Mowery, C. C. MacLeod, K. R. James, B. Kane та ін..

Практична реалізація методів параметричної ідентифікації імпульсних термоперетворювачів в Україні не достатньо розроблена. Існує невелика кількість публікації з ідентифікації термопар невисокої швидкодії. Так в [2] запропоновано спосіб визначення динамічних характеристик термоперетворювачів, який полягає в стрибкоподібному переміщенні термоперетворювача з однієї страти (шару) середовища в іншу для створення ступінчастого тестового впливу. Для цього термопару розміщують на відкритому повітрі, а потім швидко переміщують в штучно створений потік теплого повітря або газу. Інший варіант – закритий резервуар у якому розігрівається повітря. Потім відкривається отвір і тепловий потік діє на термопару [3]. Для процесів, де температура змінюється на протязі хвилин цей спосіб дає наближено точні значення. Проте він є непридатним для ідентифікації динамічних характеристик термопар, які працюють в імпульсному режимі. Крім того, складно підтримувати постійне значення температури в потоці газу, а також ламінарність потоку.

Іншим варіантом цього підходу є зміна температури на вході термоперетворювача, за певним законом, шляхом направлення водяних струменів різної температури на чутливий елемент термоперетворювача [4-5]. таким чином можна реалізувати вхідні сигнали різної форми: подача холодного струменя, а потім гарячого створює стрибок температури; змішуванням двох струменів в різній пропорції можна добитись гармонічної зміни вхідного сигналу тощо. Проте, точність визначення динамічних характеристик за допомогою цих методів також невелика. Швидкодія значно залежить від часу механічних перемикачів в подачі рідини.

В деяких випадках термопару не можливо вилучити з технологічного процесу без його переривання (особливо актуально для атомних

електростанції, об'єктів металургійної промисловості та ін.), для проведення перевірки і визначення її придатності до використання, що пов'язано із старінням термопар. В цьому разі перевірку проводять на місці експлуатації термопар. Для цього, деякий час через термопару пропускають струм (змінний або постійний). Потім вимикають струм та реєструють спад перехідної характеристики термопар [6]. Наявність тільки спаду перехідної характеристики термопар дає наближене уявлення про її динамічні характеристики. При цьому термопара перебуває в умовах вільної конвекції та теплового випромінювання. Тепло відводиться навколишнім середовищем, через проводи з'єднання, корпусом термопар та випромінюванням. Тому, при цьому, встановлюються значення сталих часу термопар із значними похибками.

Більш важливим для дослідження ДХ є наростаюча частина перехідної характеристики, коли термопара перебуває під дією теплового розігріву. Для цього перехідну характеристику, у вигляді термо-ЕРС термопар, потрібно реєструвати під час дії теплового стрибка. Щоб вхідний сигнал відповідав ступінчастій дії, час наростання стрибка температури на спаї термопар повинен перевищувати найменшу із сталих часу більше ніж в 10 раз. Для цього можна використати енергію фотонів когерентного оптичного випромінювання. В цьому випадку на спай термопар діють лазерним променем в інфрачервоному спектрі випромінювання, а реакцію термопар реєструють як вимірюючи термо-ЕРС на виході термопар, так і вимірюючи інтенсивність теплового випромінювання спаю термопар оптичними датчиками у відповідному спектрі [7]. Знаходячи відношення двох вихідних сигналів встановлюють наростаючий фронт перехідної характеристики. На жаль, з роботи [7] не видно, що теплообмін між спаєм термопар, оптичним випромінюванням та навколишнім середовищем набув стану динамічної рівноваги. Тому неможливо визначити значення сталих часу термопар з точністю, що має практичне застосування.

Аналіз існуючих наробок в області динамічного вимірювання температури встановив ряд прогалин:

- відсутність надійного методу ідентифікації ДХ термопар;
- громіздкий математичний апарат обробки результатів ідентифікації ДХ;
- відсутність точних методів вимірювання температури коротких теплових імпульсів.

Рішенню цих завдань присвячена дана робота.

1.3. Методи вимірювання температури

Аналіз сучасних досягнень в області динамічних вимірювань температури показав наявність багатьох досліджень, які спрямовані на вдосконалення методів вимірювання температури газових потоків. Існує пошук нових методів на основі використання фізичних явищ та процесів, які раніше не застосовувались, або вдосконалення існуючих методів за рахунок більш детального вивчення фізичних процесів при вимірюванні температури. Підвищення точності вимірювання при використанні існуючих методів можливе за рахунок поглибленого вивчення похибок, які вносяться на кожному етапі процесу вимірювання і знаходження шляхів зменшення впливу цих похибок на результат вимірювання [45].

Існує широкий клас методів вимірювання температури взагалі. Ці методи засновані на використанні залежності різних фізичних явищ від температури, оскільки пряме вимірювання температури неможливе. Набір фізичних явищ, які використовуються дуже широкий. Він включає в себе: явища виникнення термоелектрорушійної сили (термо-ЕРС), температурну залежність опорів матеріалів, інтенсивність електромагнітного випромінювання та його спектральних характеристик, явища флюоресценції, температурну залежність властивостей звукових хвиль та ін..

Використання того чи іншого методу вимірювання температури залежить від того, чи дозволяє об'єкт вимірювання прямий контакт із

вимірювальним перетворювачем температури. На підставі цієї вимоги всі методи вимірювання температури можна розділити на три категорії: контактні, безконтактні та змішані (рис. 1.1) [45].



Рисунок 1.1 – Методи вимірювання температури

Контактний метод передбачає присутність вимірювального пристрою в безпосередньому контакті із середовищем вимірювання, наприклад, термопари в газовому потоці. При встановленні термодинамічної рівноваги між чутливим елементом термометра і середовищем можна визначити його температуру. В змішаному методі, об'єкт дослідження обробляють таким чином, щоб дозволити дистанційне вимірювання, наприклад, покриття поверхні речовинами, колір яких змінюється з температурою. Безконтактні методи дозволяють вимірювання температури на відстані без прямого контакту з об'єктом вимірювання, наприклад, інфрачервона термографія.

У роботі розглянуто переваги та недоліки кожного з методів. Запропоновано можливі варіанти підвищення точності вимірювання температури. Зроблено обґрунтування вибору методу вимірювання температури, який буде застосований в даний роботі.

1.3.1. Вимірювання температури безконтактними методами

Безконтактні методи не потребують наявності чутливого елемента вимірювального перетворювача в безпосередньому контакті з об'єктом вимірювання. Температура вимірюється на відстані. Перевагами безконтактних методів є відсутність впливу вимірювального перетворювача на температурне поле в зоні вимірювання температури, вимірювання високих температур, для яких відсутні контактні перетворювачі, можливість

отримання дво-, тривимірною розподілу поля температури в об'єкті вимірювання.

За наявністю додаткових джерел випромінювання безконтактні методи вимірювання температури можна розділити на пасивні – температура визначається за власним випромінюванням тіла, і активні – використовують додаткові джерела випромінювання (лазери, АЧТ, ультразвук та інші) і визначають температуру тіл за ступенем поглинання (ослаблення) додаткового випромінювання.

На рис. 1.2 представлено класифікацію безконтактних методів в залежності від наявності додаткових джерел випромінювання [45].

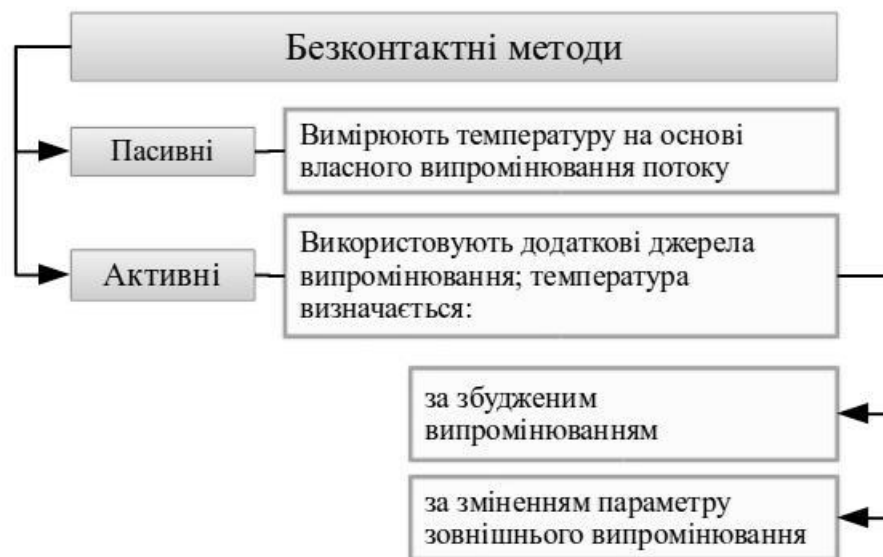


Рисунок 1.2 – Класифікація безконтактних методів вимірювання температури за наявністю додаткового джерела випромінювання [45]

За просторовим розподілом температури, безконтактні методи можна розділити на два види: точкові та просторові (рис. 1.3)

За використанням термометричної властивості, безконтактні методи можна розділити на радіометричні та акустичні (рис. 1.4). Радіометричні методи є найбільш розповсюдженими методами вимірювання температури.

Найчастіше, в радіометричних вимірюваннях, в якості вимірювального параметру залежного від температури, використовують інтенсивність електромагнітного теплового випромінювання. Кожне тіло температура

якого вища за 0 К створює електромагнітне випромінювання відповідно до його температури. Тепловим випромінюванням називається електромагнітне випромінювання, яке створюється тілом за рахунок його внутрішньої енергії.

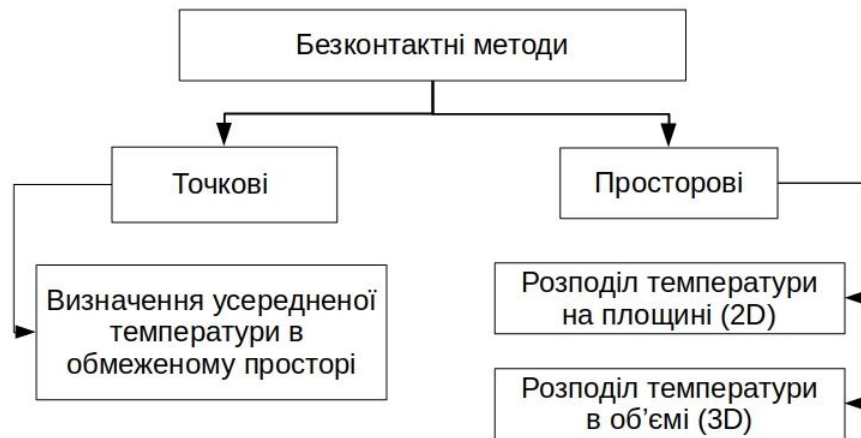


Рисунок 1.3 – Класифікація безконтактних методів за просторовим розподілом температури

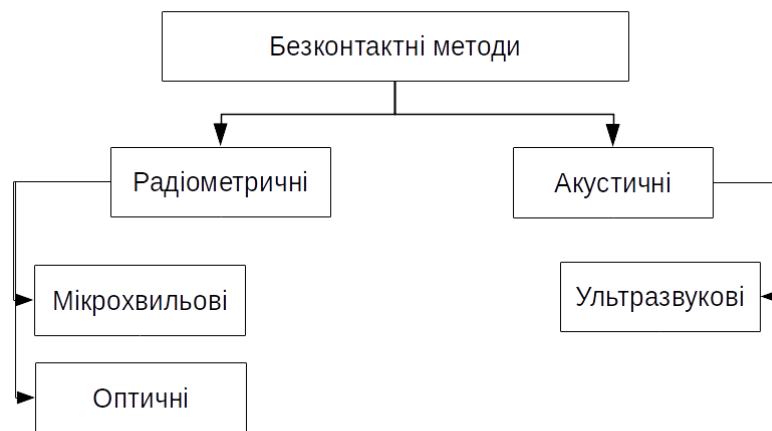


Рисунок 1.4 – Класифікація безконтактних методів за використанням термометричної властивості

Спектр електромагнітного випромінювання складається з декількох піддіапазонів: гамма-випромінювання, рентгенівський, оптичний (ультрафіолетовий, видимий, інфрачервоний), мікрохвильовий та радіохвильовий. Безконтактні методи використовують в основному в оптичному діапазоні, який ще називають діапазоном теплового випромінювання.

Залежність інтенсивності електромагнітного випромінювання від температури та спектра випромінювання детально описано для ідеальної моделі теплового випромінювача – абсолютно чорного тіла (АЧТ). Ця залежність описується рівнянням Планка:

$$E_{\lambda,T} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left(e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right)},$$

де h – універсальна стала Планка, c – швидкість світла в вакуумі, k – стала Больцмана. В залежності від спектрального діапазону вимірювань використовують спрощені формули. Спектральна цільність випромінювання реальних об'єктів відрізняється від випромінювання АЧТ [8]. Для наближеного врахування цієї різниці вводять поправку у вигляді коефіцієнту випромінювання, який виражається нерівністю [9]:

$$\varepsilon(\lambda,T) \leq 1,$$

де $\varepsilon=1$ - для АЧТ, $\varepsilon(\lambda,T) < 1$ - для всіх реальних тіл. Коефіцієнт випромінювання залежить від стану об'єкту вимірювання, через що визначається експериментальним чином.

Оптичні методи розділяють в залежності від кількості складових спектрального діапазону, які використані при вимірюванні температури (рис. 1.5).



Рисунок 1.5 – Класифікація оптичних пасивних безконтактних методів вимірювання температури за кількістю довжин хвиль на яких приводиться вимірювання

В оптичних методах, в залежності від кількості спектральних складових які використані для вимірювання температури потрібно

заздалегідь володіти інформацією про відповідну кількість коефіцієнтів випромінювання [10]. Дані методи мають високу точність для об'єктів з відомими оптичними і спектральними характеристиками. Це потребує додаткового створення та використання спеціальних методів визначення коефіцієнтів випромінювання. Також для визначення коефіцієнту випромінювання будь-якого тіла потрібно використовувати незалежний метод вимірювання температури, часто контактний. Але, навіть знаючи коефіцієнт випромінювання, отриманий експериментальним шляхом, покази оптичних засобів вимірювання можуть відрізнятися від дійсних значень температури, оскільки коефіцієнт випромінювання змінюється при зміні стану об'єкту вимірювання.

Оптоволоконна термометрія набула розвитку в останні роки. Даний напрям термометрії розроблявся для заміни існуючих методів або розширення їх можливостей. Перевагами цього методу є: довгострокова стабільність, не піддається впливу електромагнітного випромінювання, висока чутливість, мала інерційність та можливість використання в жорстких умовах. Для вимірювання температури використовують два типа датчиків: «чорнотілі» сенсори та флюороскопічні сенсори. Проте, найчастіше цей метод застосовується при вимірюванні температури твердих об'єктів із відомими оптичними властивостями.

1.3.1.1. Інфрачервона пірометрія

Пірометричні методи є класичними і давно відомими. Ці методи використовують при вимірюванні усередненої температури певної ділянки об'єкту. Діапазон вимірювання температури: -40 до 3500 °С.

Пірометри вимірюють температуру за випромінюванням в інфрачервоному діапазоні спектра. Це пояснюється тим, що максимум спектрального розподілу інтенсивності випромінювання абсолютно чорного тіла за температур до 3000 °С лежить якраз в інфрачервоному діапазоні (рис. 1.6).

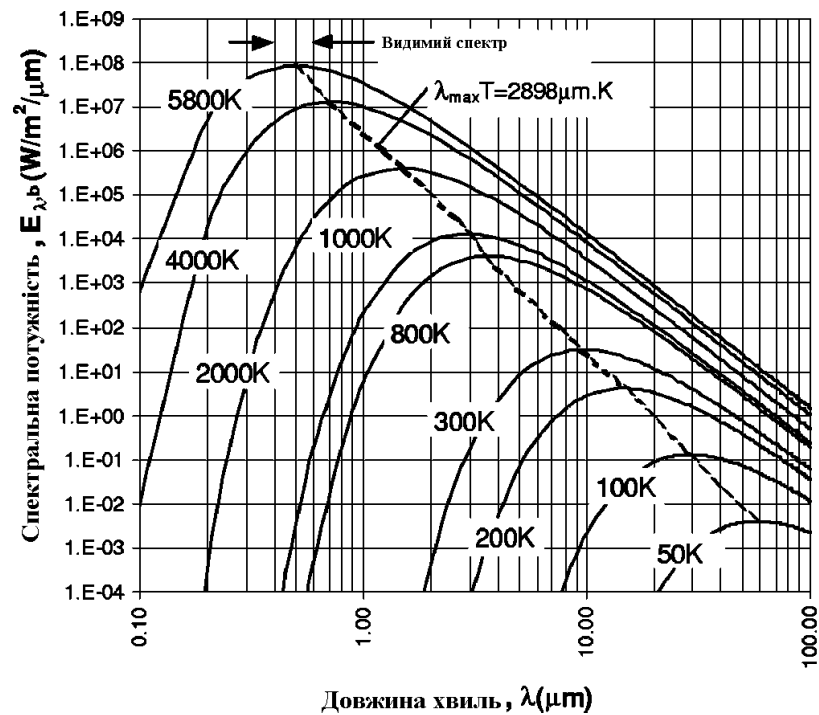


Рисунок 1.6 – Спектральна щільності електромагнітного випромінювання АЧТ [9]

Довжина хвилі максимуму спектрального розподілу інтенсивності випромінювання залежить від температури тіла і наближено описується рівнянням [8]:

$$\lambda_{\max} T = 2898 \text{ мкм.}$$

Тобто із збільшенням температури максимум спектрального розподілу зсувається в область коротких хвиль. Оскільки інтенсивність випромінювання реальних об'єктів менша за інтенсивність АЧТ, то пірометри використовують інфрачервоний діапазон для вимірювання температури.

Різні типи пірометрів існують для вимірювання температури в різних піддіапазах. Розділення ІЧ спектра на піддіапази приведено в табл.1.1.



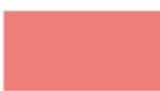


Таблиця 1.1. Піддіапази ІЧ спектра

Ближній	NIR	0,76...1,1
Короткохвильовий	SWIR	1,1...2,5
Середньохвильовий	MWIR	3,0...5,0
Довгохвильовий	LWIR	8,0...14,0

Дальній	FIR	15,0...1000
---------	-----	-------------

У табл. 1.2-1.3 наведені приклади спектральних діапазонів, які використовують пірометри для вимірювання температури різних об'єктів у промисловості, за даними різних джерел.

Таблиця 1.2. Приклади застосування пірометрів для вимірювання температури у промисловості [11]

Позначення	Діапазон, мкм	Вимірюють температуру
	0,8 ... 1,1	металевих поверхонь
	3 ... 5	мають спеціальне призначення
	3,9	димових газів та полум'я
	4,8 ... 5,2	скляних поверхонь
	8 ... 14	неметалевих поверхонь

Таблиця 1.3-. Спектральні діапазони вимірювання температури пірометром в промислових застосуваннях [12]

Спектральний діапазон, мкм	Вимірювання температури, °С
0,676	розплаву металів (від 1100)
0,8 ... 1,1	розплаву скла, металів та керамік (від 600)
1,45 ... 1,8	металів та керамік (від 250)

2,0 ... 2,8	металів (від 75)
3 ... 5	металів та керамік (від 5)
3,43	ПЕ та ПП плівок (від 50)
3,9	печей, які підігріваються полум'ям (від 75)
5,14	скляних поверхонь (від 100)
8 ... 14	неметалевих поверхонь та металів із покриттям (від -40)

Даний метод знайшов застосування при вирішенні наступних задач:

- вимірювання високих температур (до 3000 °С);
- вимірювання температури рухомих об'єктів на відстані;
- вимірювання в умовах небезпечного та агресивного середовищ;
- малий час відгуку.

1.3.1.2. Точність вимірювання температури пірометрами

Пірометр перетворює інтенсивність електромагнітного випромінювання об'єкту у значення його температури. Величина інтенсивності об'єкту, яку отримує первинний перетворювач пірометра, залежить від оптичних характеристик об'єкта вимірювання, середовища через яке ІЧ випромінювання передається від об'єкта до пірометра та самого перетворювача. Дані характеристики залежать, як від температури об'єкту та середовища, так від довжини хвилі на якій вимірюється температура. На рис. 1.7 зображено схему вимірювального каналу пірометра та його похибки.

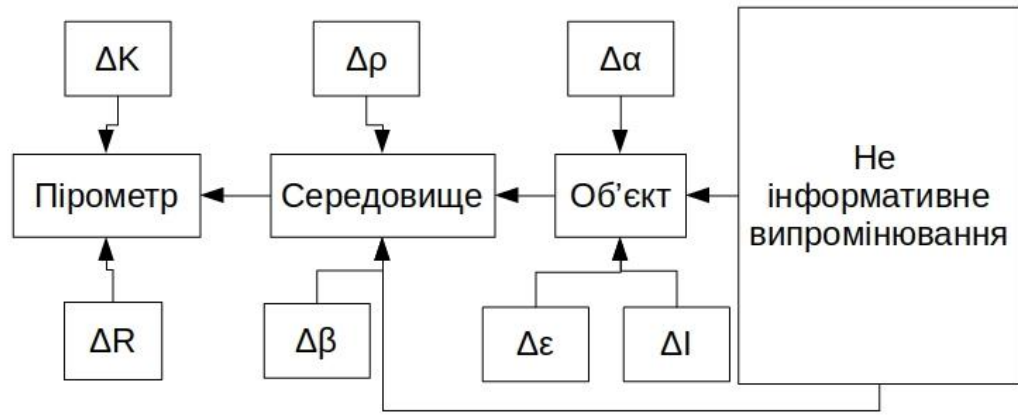


Рисунок 1.7 – Похибки вимірювального каналу пірометра (1)

Сумарна методична похибка вимірювання температури пірометром становить:

$$\Delta T = \Delta P(\Delta K, \Delta R) + \Delta S(\Delta \rho, \Delta \beta, \Delta S_n) + \Delta O(\Delta \alpha, \Delta \epsilon, \Delta l, \Delta O_n) + \Delta D$$

ΔT - похибка вимірювання температури пірометром;

ΔP - похибка, яку вносить пірометр у вимірювання; дана похибка складається із таких складових:

ΔK - похибка калібрування пірометру;

ΔR - похибка позиціонування вимірювальної плями пірометру;

ΔS - похибка, яку вносить середовище в якому проходить випромінювання від об'єкту; дана похибка складається із таких складових:

$\Delta \rho$ - похибка розсіювання електромагнітного випромінювання середовищем;

$\Delta \beta$ - похибка поглинання електромагнітного випромінювання середовищем;

ΔS_n - похибка, яку вносить не інформативне випромінювання, яке проходить через середовище і потрапляє в чутливий елемент пірометра;

ΔO - похибка, яку вносить об'єкт який теплове випромінювання; дана похибка складається із таких складових:

$\Delta \alpha$ - похибка, яка виникає внаслідок відбивання від поверхні об'єкту не інформативного випромінювання, яке разом із тепловим випромінюванням потрапляє в чутливий елемент пірометра;

Δl - похибка, яку вносить не інформативне випромінювання самого об'єкту і яке не є тепловим випромінюванням;

$\Delta \epsilon$ - похибка визначення коефіцієнту випромінювання об'єкту;

ΔO_n - похибка, яку вносить не інформативне випромінювання, яке проходить через об'єкт вимірювання і потрапляє в чутливий елемент пірометра;

ΔD - динамічна похибка вимірювання пірометром.

В табл. 1.4 приведені характеристики типових пірометрів для вимірювання температури твердих поверхонь.

Таблиця 1.4. Технічні характеристики промислових пірометрів

	Час відгуку	Діапазон T , °C	Спектральний діапазон, мкм	Оптична роздільна здатність	Похибка	Температурна роздільна здатність,
CTfast LT	3 мс,	-50 ... 975	8 - 16	25:1	± 1% або ± 2°C	0.4 C
CTF-SF25-C3	3 мс	-50 ... 975	8 - 14	25:1	±1% або ±2°C	0.4°C
Mergenthaler	100 мк	100 ... 3000	1.65 – 2.5		±0,5% або ±2°C	0.1°C
IMPAC IGA 740	6 мк	160 ... 500	1.58 - 2.2	290:1	0.75%	0.1°C
Endurance	2 мс	50 to 3200	1 .. 2,4	300:1	±0.5% або +2°C)	0.1°C

Перевагу серед цих методів має спектральна пірометрія, оскільки температура полум'я вимірюється на декількох тисячах довжин хвиль і за допомогою комп'ютера визначаються довжини, де полум'я має «чорне» випромінювання або в крайньому разі «сіре» [13]. Цей метод є порівняно новим і ще не отримав широкого застосування.

Застосування того чи іншого методу при вимірюванні температури полум'я залежить від оптичних і енергетичних характеристик полум'я.

Різниця коефіцієнтів випромінювання полум'я, їх мінливість, яка залежить від умов протікання горіння і як наслідок відмінність в інтенсивності випромінювання при однаковій температурі, ускладнює створення універсального інструменту для вимірювання температури полум'я.

Внаслідок нерівноважного випромінювання, наявного в полум'ї, часто відбувається перекивання спектрів різного походження, що перешкоджає застосуванню методів спектральної пірометрії.

Оптичні методи вимірювання мають значні недоліки незважаючи на універсальність методу. Головними з яких є:

- потрібно заздалегідь знати оптичні та спектральні властивості об'єкту вимірювання;
- наявність в спектрі випромінювання, яке викликане не тепловими процесами.
- залежність випромінювання температури полум'я від:
 - хімічного складу та процесів, які в ньому проходять;
 - наявності неоднорідності (частинок сажі);
 - оптичних властивостей;
- недостатня теоретична та практична вивченість залежностей температури полум'я або газів в цілому від видів випромінювання та його характеристик;
- відсутність перевірених методик вимірювання температури газових середовищ в залежності від видів випромінювання.

Один із можливих розв'язків цієї задачі полягає в додатковому використанні міри температурного електромагнітного випромінювання. В принципі цей підхід не новий, оскільки монохроматичні пірометри із зникаючою ниткою накалювання побудовані на принципі співпадіння кольору розжареної вольфрамової нитки та досліджуваного об'єкту. Проте цей метод має великі інструментальні похибки, які залежать від суб'єктивної оцінки оператора.

1.3.2. Напівконтактні методи вимірювання температури

Напівконтактні (змішані) методи застосовують для вимірювання температури із використанням чутливих матеріалів, які розміщують в прямому контакті з об'єктом, чю температуру потрібно виміряти. Ці матеріали змінюють оптичні властивості своєї поверхні, що може бути зареєстровано на відстані. Методи поверхневого покриття розглядаються як змішані на підставі того, що ці методи використовують як контактні індикатори, які розміщують в досліджуваному середовищі, що вносить збурення в поле температур вимірюваного об'єкту, так і безконтактні датчики для віддаленого вимірювання температури. Існує цілий ряд чутливих до нагрівання матеріалів, в тому числі термохромні рідкі кристали, чутливі до нагрівання кристалічні тверді тіла та фарби, і термографічні люмінофори (рис. 1.8).



Рисунок 1.8 – Напівконтактні (змішані) методи вимірювання температури

1.3.3. Вимірювання температури контактними методами

Вимірювання температури газових потоків та полум'я контактними методами передбачає розташування чутливого елемента термоперетворювача в середовищі дослідження. Існує велике різноманіття контактних вимірювальних перетворювачів температури, які побудовані на різних фізичних принципах, наприклад: газові та рідинні термометри, термометри опору, термістори та інші (рис. 1.9).

Використання конкретного термоперетворювача залежить від діапазону вимірюваних температур та від можливості його використання при задоволенні всіх вище вказаних вимог до проектування відокремлюваних елементів.



Рисунок 1.9 – Контактні методи вимірювання температури

Газові та рідинні термометри

Газові та рідинні термометри загалом використовуються у дослідницьких та повірочних лабораторіях при проведенні статичних вимірювань. Діапазон вимірювань: 3 – 1000 К.

Термістори

Термістори – напівпровідникові пристрої, опір яких залежить від температури. Термістори використовуються коли точність вимірювань не є критичним фактором. Недоліком термісторів є відхилення показів при змінах в матеріалі напівпровідника.

NTC термістори використовують в якості термоперетворювачів та як обмежувачі струму. PTC термістори використовують як само-відновлювані запобіжники та саморегульовані нагрівачі.

Чутливий елемент термістору виготовляють із кераміки, полімерів або кремнію, на відміну від термометрів опору в яких використовують метали. Температурна чутливість термісторів в п'ять разів перевищує чутливість кремнієвих температурних давачів (силісторів), та в десять разів більше термометрів опору. NTC термістори звичайно використовують в діапазоні температур від -55 до 200 С (рис. 1.10). Проте існують спеціальні типи термісторів, які можуть вимірювати температуру близьку до температури абсолютного нуля ($-273,15$ С). Також спеціально виробляються термістори для вимірювання температури 150 С [14]. Температурна залежність опору термісторів має виражену не лінійність (рис. 1.12).

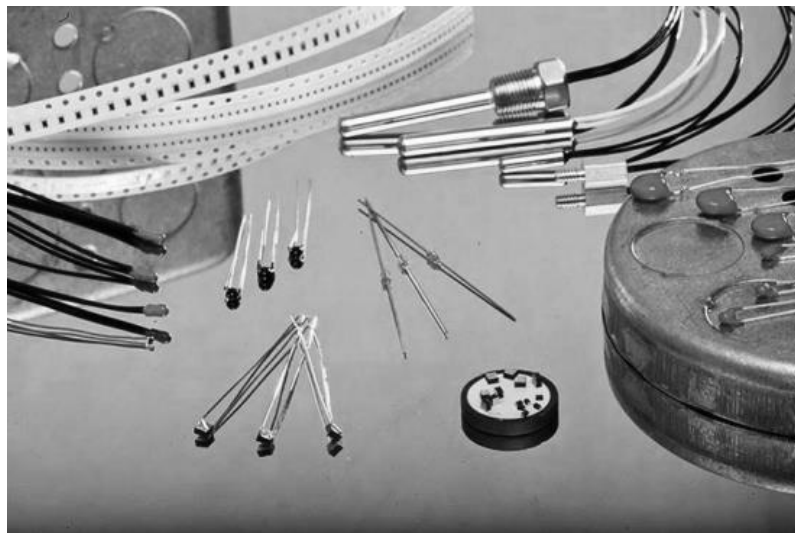


Рисунок 1.10 – NTC термістори [15]

Нижня межа сталої часу термісторів, які призначені для використання в умовах швидкого реагування на зміну температури знаходиться в діапазоні 10...40 с.

Термометри опору

Термометри опору мають вищу точність в порівнянні з термісторами. Вони також використовують температурну залежність опору вимірювального перетворювача. В якості матеріалу чутливого елемента використовують провідники, найчастіше дорогоцінні метали (золото, платина, срібло), а також мідь та нікель. В табл. 1.5 наведено електричні властивості цих матеріалів.

Таблиця 1.5. Властивості матеріалів термометрів опору [16, 17]

Матеріал	Питомий опір (Ом м) 10^{-8}	Температурний коефіцієнт опору (K^{-1}) \times 10^{-3}
Мідь	1,7	3,9
Срібло	1,6	4,0
Нікель	59	6,0
Платина	11	3,85
Золото	2,4	3,4

Мідь відносно дешевий матеріал і використовується до температури 100 С°. Нікель має недоліки пов'язані нелінійною залежністю опору від зміни температури, а також залежність від деформації.

Найчастіше для вимірювань температури використовують платинові термометри опору. Платина має високий питомий опір (табл. 1.5), відносно інертний до дії багатьох чинників та має добре вивчену температурну залежність опору. Термометри опору працюють у діапазоні температур від -300 С° до 1000 С°. Платинові термометри опору є найбільш точними та стабільними з усіх контактних термоперетворювачів [17]. Еталонний платиновий термометр опору є інтерполяційним пристроєм, який входить в склад міжнародної температурної шкали МТШ-90.

Не зважаючи на високу точність вимірювань яку можливо досягти при правильному використанні платинових термометрів опору вони вносять свої похибки викликані внутрішнім розігрівом чутливого елемента, оксидацією, корозією та зусиллями деформації чутливого елемента, зумовлені тепловим розширенням; також мають значну теплову інерційність.

Термопары

Найбільш поширеним термоперетворювачем для вимірювання температури є термопара. В Північній Америці при вимірюванні низьких та середніх температур переважають термопары.

Найчастіше термопары використовують за їх швидкодію, достатню точність, низьку ціну, високу надійність та широкий температурний діапазон від $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+2500\text{ }^{\circ}\text{C}$. Термопары використовують для вимірювання точкової температури. До переваг термопар можна віднести їх нечутливість до вібрації в порівнянні з термометрами опору. Недоліками термопар є компенсація холодного спаю термопары, складно проводити повторну перевірку. Проте термопары поступаються точністю та стабільністю показів платиновим термометрам опору. При вимірюванні температури термопарою відомим є тільки значення термо-ЕРС, якому відповідає температура чутливого елемента термопары. Дійсна температура теплового імпульсу залежить від термодинамічної рівноваги теплового потоку та чутливого елемента термопары. При відсутності рівноваги, температура спаю термопары відрізняється від дійсної температури, створеної тепловим імпульсом. Для встановлення імпульсної температури потрібно знати динамічні характеристики термопары.

Відповідно до [18], термопара як технічний засіб вимірювання має нормовані метрологічні характеристики. Нормовані характеристики поділяють на статичні та динамічні [19]. Статичні характеристики термопар характеризують параметри термопары, при незмінній температурі. При вимірюванні температури коротких теплових імпульсів, які виникають при вибухах, потрібно враховувати динамічні характеристики термопары.

При дослідженні процесів горіння та детонації важливим вимірювальним параметром є температура. Термопара отримала широке поширення в цих вимірюваннях, завдяки свої простоті роботи та відносній легкості використання. Проте, області застосування термопар обмежені максимальною температурою вимірювання, динамічним діапазоном, інерційністю термопари та терміном роботи.

Вимірювання температури полум'я контактними методами передбачає наявність чутливого елемента в зоні горіння. Внесення термоперетворювача в полум'я впливає на процеси горіння та створює перешкоди в газовому потоці, що в свою чергу спотворює температурне поле факела. В результаті виникають методичні похибки пов'язані: з відведенням тепла від термоперетворювача через з'єднувальні проводи, значними втратами через випромінювання, внаслідок променистого теплообміну з навколишнім середовищем, каталітичним ефектом. Використання контактних методів для вимірювання температури полум'я дає неадекватні результати через динамічні параметри потоку газів, які змінюють температуру контактних датчиків від кінетичної енергії потоку [16, 20].

Використання термопар при вимірюванні температури полум'я газових або конденсованих систем може приводить до значних збурень газового потоку, і в результаті цього спотворення розподілу температурного поля в полум'ї.

Не зважаючи на вказані недоліки, основним джерелом похибки є динамічна похибка вимірювання температури, викликана тепловою інерційністю чутливого елемента термопари. Для зменшення динамічної похибки потрібно знати ДХ термопар. Розробка методу ідентифікації ДХ імпульсних термопар дозволить зменшити динамічну похибку вимірювання та підвищити точність вимірювання температури коротких теплових імпульсів.

На рис. 1.11 приведено найуживаніші термоперетворювачі та їх узагальнені температурні діапазони.

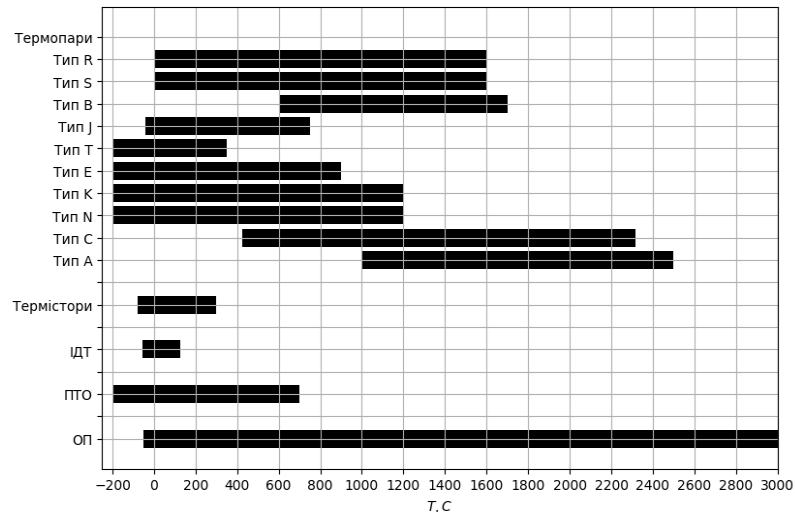


Рисунок 1.11 – Діапазони температур найуживаніших термоперетворювачів. ІДТ — інтегральні давачі температури. ПТО — платинові термометри опору. ОП — оптичні пірометри.

На рис. 1.12 зображено лінійність вихідного сигналу контактних термоперетворювачів.

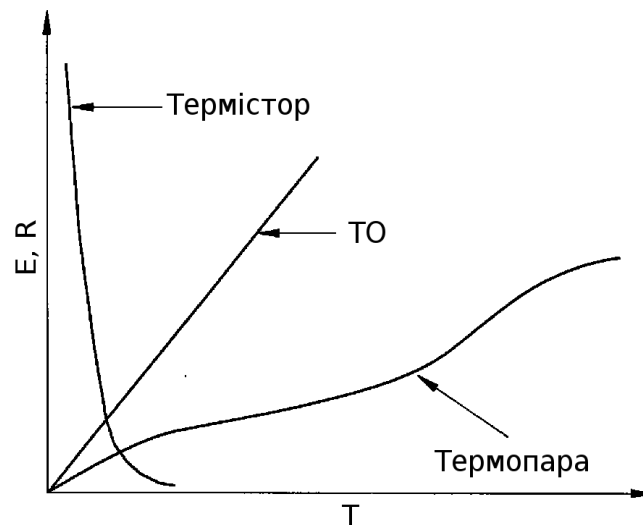


Рисунок 1.12 – Лінійність вихідного сигналу декількох термоперетворювачів в залежності від температури. ТО — термометр опору.

Висновки до розділу 1

1. При розробці вимірювальних комплексів фізичних моделей відокремлюваних елементів крім температур порядку 2000°C потрібно враховувати великі значення тиску, а також перевантаження до 10000 g .

2. Використання безконтактних та напівконтактних термоперетворювачів при проектуванні фізичних моделей відокремлюваних елементів неможливе внаслідок наявності методичної похибки вимірювання температури полум'я за тепловим випромінюванням, конструктивну складність їх розміщення, неможливості забезпечення міцності та інертності до дії високотемпературних потоків.

3. Зважаючи на вказані недоліки безконтактних методів вимірювання температури коротких теплових імпульсів при випробуванні фізичних моделей відокремлюваних елементів, у якості вимірювального перетворювача температури були обрані контактні перетворювачі та відповідно контактні методи вимірювання. Дані методи мають широку історію застосування та достатньо розроблені методики вимірювання температури у статиці.

4. На основі проведеного аналізу контактних засобів вимірювання в якості термоперетворювача була вибрана термопара. Цей пристрій охоплює найширший температурний діапазон від -200 C° до 2500 C° . Термопари відносно дешеві та прості у використанні. Термопари набули широкого вжитку через стабільність показів, малі розміри чутливого елемента та широкий діапазон вимірювання.

5. Значна теплова інерційність термопар вимагає створення методів ідентифікації динамічних характеристик термопар та розробки методу вимірювання температури коротких теплових імпульсів на основі знайдених ДХ.

РОЗДІЛ 2.

ВДОСКОНАЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОПАР

2.1. Термоелектричні властивості термопар

В основі процесу вимірювання температури термопарою лежать термоелектричні ефекти. Термопара перетворює теплову енергію в електричну. В основі термоелектричного процесу вимірювання температури лежать ефекти Зеєбека, Пельт'є та Томсона. В замкненому колі, яке складається із двох різнорідних провідників, і контакти останніх перебувають за різних значень температури, в такому колі виникає напруга термо-ЕРС U_{θ} . В цьому полягає ефект Зеєбека. Величина термо-ЕРС залежить не тільки від температур гарячого θ_r та холодного θ_x контактів, а й від матеріалу провідників. Як зазначалось, залежність термо-ЕРС від температури є нелінійною, але в невеликому інтервалі температур термо-ЕРС можна вважати пропорційною до різниці температур контактів:

$$U_{\theta} = \alpha(\theta_r - \theta_x),$$

де α - коефіцієнт термо-ЕРС, який залежить від матеріалу провідників термопари, а також від інтервалу температур і навіть може змінювати свій знак на деяких ділянках.

Позитивною властивістю термопари є те, що величина термо-ЕРС не змінюється при послідовному включенні в коло будь-якої кількості провідників з інших матеріалів, за умови, що нові місця контактів будуть перебувати за однакової температури.

Вимірювання температури термопарою ґрунтується тільки на основі ефекту Зеєбека. Отримати аналітичну залежність термо-ЕРС від температури практично дуже важко, оскільки фізико-хімічні властивості термоелектродів внаслідок їх неоднорідності або не ізотропності відомі наближено. Також, значно ускладнює задачу температурна залежність коефіцієнту Пельт'є. Тому, на практиці використовується уніфікована кількість термопар,

залежність термо-ЕРС від температури яких визначається експериментальним шляхом.

Крім стандартної методики використання термопар для вимірювання температури, за якої гарячий спай термопари контактує із об'єктом вимірювання, а холодний спай тримають за відомої постійної температури, в деяких випадках, додатково, через термопару пропускають електричний струм. Дана процедура виконується в різних цілях, зокрема, для підвищення чутливості термопари, або при її калібруванні. Наявність в колі термопари електричного струму викликає появу додаткових термоелектричних ефектів Пельт'є та Томсона.

Ефект Пельт'є виникає за наявності температурного градієнту вздовж провідників в колі, що викликає появу термо-ЕРС. Якщо додатково через коло із різнорідних провідників протікає електричний струм, то в місцях контактів виділяється або поглинається певна кількість тепла. Напрямок теплопереносу залежить від напрямку протікання струму. Даний ефект не залежить від ефекту Джоуля. Кількість тепла, яка передається через спай пропорційна силі струму:

$$Q_{\text{П}} = \Pi It,$$

де Π - коефіцієнт Пельт'є, який залежить від матеріалу термоелектродів та температури; I — сила струму, який протікає в колі.

Оскільки вздовж термоелектродів термопари існує градієнт температури, то при проходженні струму через термопару в її об'ємі виділяється або поглинається тепло за рахунок ефекту Томсона. Напрямок теплопередачі залежить від напрямку протікання струму в провіднику. Кількість тепла яка переміщується дорівнює:

$$Q_{\text{T}} = T(\theta_{\text{x}} - \theta_{\text{r}})It,$$

де T — коефіцієнт Томсона, який залежить від матеріалу провідника. Також, струм, який проходить через провідник, розігріває його за рахунок ефекту Джоуля. Кількість тепла яка виділяється дорівнює:

$$Q_{\text{D}} = UI t,$$

де U — напруга на затискачах термопари.

Використання струму при вимірюванні температури термопарою потребує врахування ефектів Пельт'є та Томсона.

2.2. Вибір планів експериментів для отримання моделей високої точності

Математичне моделювання складних систем, як правило, здійснюється на основі багатofакторних статистичних моделей (рівнянь регресії), отриманих шляхом апроксимації даних експериментів, статистичних випробувань, експертних оцінок, трудомістких обчислень на ЕОМ. Математичні моделі особливо необхідні в тих випадках, коли можливості конструювання, виробництва та експлуатації, засновані на традиційних фізичних принципах, вичерпані або призводять до недоцільно більших витрат [21].

Послідовність точок P_1, \dots, P_i, \dots називається рівномірно розподіленою у n -мірному кубу K^n , якщо для будь-якого паралелепіпеда Π виконується рівність:

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{S_N(\Pi)}{N} = V_\Pi$$

де $S_N(\Pi)$ — кількість точок P_i із номерами $1 \leq i \leq N$, які належать Π ; V_Π — об'єм (n -мірний) паралелепіпеда Π . Послідовність точок $P_0, P_1, \dots, P_i, \dots, P_n$, n -мірного куба K^n називається \mathcal{LPP}_τ послідовністю, якщо будь-яка її двійкова ділянка, яка містить не менше ніж $2^{\tau+1}$ точок, являє собою Π_τ -сітку [22].

\mathcal{LPP}_τ послідовності мають широку область застосування: обчислення багатовимірних інтегралів, випадковий пошук, задачі багатокритеріальної оптимізації, моделювання фізичних і економічних процесів.

Розробка якісних математичних моделей без планування експерименту неможлива. Тому актуальним є постановка і використання багатofакторного експерименту на основі \mathcal{LPP}_τ рівномірно розподілених послідовностей. Є поодинокі згадки про застосування їх для отримання математичних моделей.

У більшості джерел не наводяться конкретні плани експериментів, не проведені статистичні дослідження LPI_τ послідовностей для виявлення корельованості між ними і подальшого їх ранжування. Використання LPI_τ послідовностей при послідовному плануванні експериментів не розроблено. Статистичні властивості планів, що використовують квазівипадкове розміщення точок в багатofакторному просторі (на основі відомих джерел), розроблені слабо.

Властивості LPI_τ послідовностей [21]:

1. Вибір у якості точок плану експерименту у багатовимірному просторі LPI_τ рівномірно розподілених послідовностей дозволяє отримати порівняно слабо корельовані головні ефекти і ефекти взаємодій чинників при виборі структури математичної моделі.

2. Зі збільшенням числа дослідів N ймовірність отримання в плані експерименту точок, досить близьких до точок екстремуму і перегину поверхні відгуку, прямує до одиниці, а коефіцієнт кореляції r_{ij} між різними ефектами прагне до нуля [22].

3. Проекція будь-якої LPI_τ послідовності із N точок в k -вимірному просторі на $(k - j)$ -мірну грань $(1 \leq j \leq k - 1)$ багатовимірного одиничного куба утворює також рівномірно розподілену послідовність із N проєкцій точок [23].

2.2.1. Дослідження статистичних властивостей LPI_τ послідовностей

Плани експериментів повинні відповідати різними критеріями якості. Критерії, що дозволяють вибрати структуру математичної моделі, практично не використовуються. При виборі структури математичної моделі головні ефекти і ефекти взаємодій повинні бути ортогональними або слабо корельовані. Величина кореляції послідовностей характеризувалась на основі парного коефіцієнту кореляції [24]:

$$r_{ij}(\xi_i, \xi_j) = \frac{\sum_{u=1}^N (\xi_{iu} - \bar{\xi}_i)(\xi_{ju} - \bar{\xi}_j)}{\sqrt{\sum_{u=1}^N (\xi_{iu} - \bar{\xi}_i)^2 \sum_{u=1}^N (\xi_{ju} - \bar{\xi}_j)^2}}$$

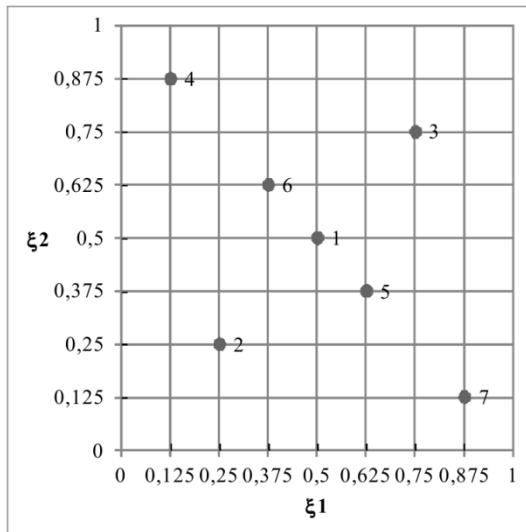
де ξ_{iu} , ξ_{ju} – значення i -тої, j -тої послідовності у u -тій строчці таблиці послідовностей, $1 \leq i < j \leq k$, $1 \leq u \leq N$, k – загальне число послідовностей, які відповідають розмірності досліджуваного простору, N – загальна кількість строк в таблиці послідовностей:

$$\bar{\xi}_i = \sum_{u=1}^N \xi_{iu} / N$$

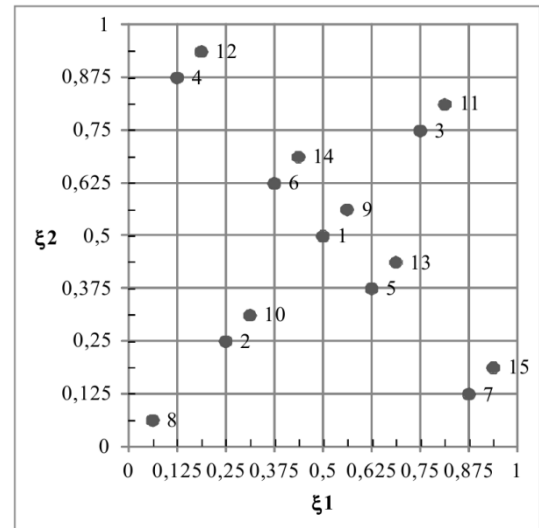
$$\bar{\xi}_j = \sum_{u=1}^N \xi_{ju} / N$$

Ця вимога досягається шляхом рівномірного розподілу точок плану експерименту у багатофакторному просторі. ЛПт послідовності на даний час є найбільш рівномірно розподіленими послідовностями (рис. 2.1). Дослідження показали, що послідовності точок розподілених рівномірно у діапазонах [24]:

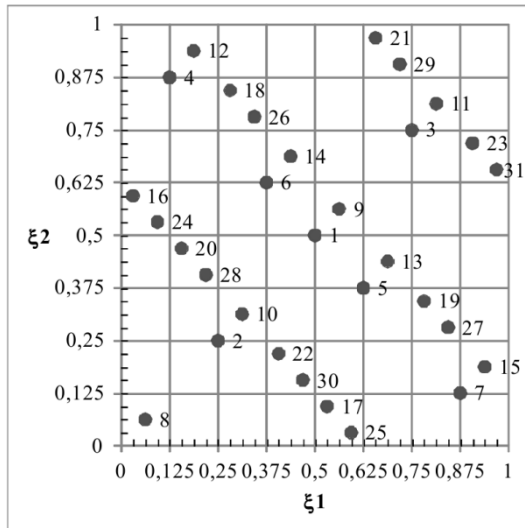
$N = 1 \dots 7$; $N = 1 \dots 15$; $N = 1 \dots 31$; $N = 1 \dots 63$ і т.д.



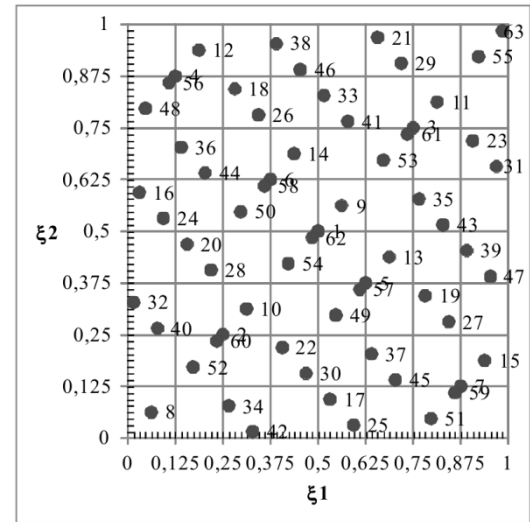
а) дослідів – 7



б) дослідів – 15



в) дослідів – 31



г) дослідів – 63

Рисунок 2.1 – Розподіл точок ЛПт послідовності ξ_1 та ξ_2 у двовірному просторі

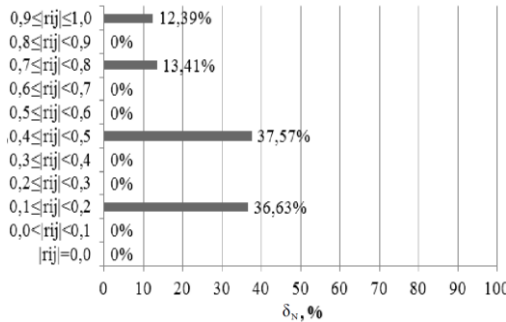
ЛПт послідовності І. М. Соболя володіють кращими властивостями рівномірності розподілу, ніж будь-які інші послідовності точок в багатовимірному одиничному кубі. Властивості ЛПт послідовностей [22-23, 24]:

1. Проекція будь-якої ЛПт послідовності із N точок у k -мірному просторі на $(k - j)$ -мірну грань ($1 \leq j \leq k - 1$) багатовимірного одиничного куба утворює також рівномірно розподілену послідовність із N проекцій точок.

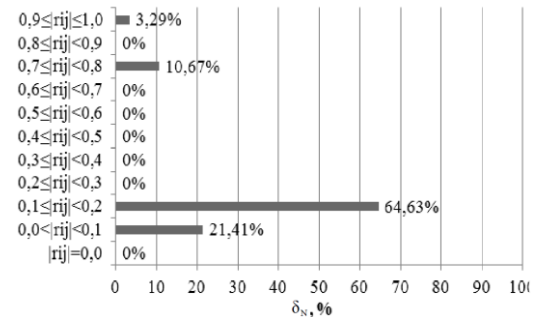
2. Вибір у якості точок плану експерименту у багатовимірному просторі ЛПт рівномірно розподілених послідовностей дозволяє отримати порівняно слабо корельовані головні ефекти та ефекти взаємодій чинників ($|r_{ij}(\xi_i, \xi_j)| < 0,4$) при виборі структури математичної моделі.

3. Плани експериментів на основі ЛПт рівномірно розподілених послідовностей дозволяють, у порівнянні із регулярними планами, отримати розташування точок, більш близьке до екстремальних значень поверхні відгуку [23]. Число рівнів s_i для безперервних факторів дорівнює числу дослідів N ЛПт, що дозволяє більш точно визначити структуру одержуваної статистичної моделі.

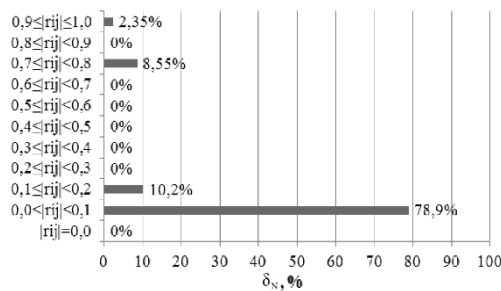
Тому, застосування ЛПт рівномірно розподілених послідовностей в якості планів експериментів без спеціального дослідження не представляється можливим. Необхідно знайти послідовності, близькі до ортогональних один щодо одного (рис. 2.2).



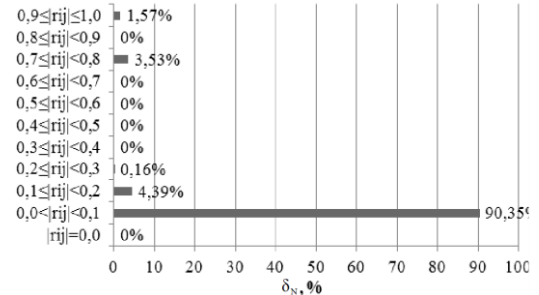
Середнє абсолютних величин коефіцієнтів кореляції 0,4331.
Середнє квадратичне відхилення 0,2852. Дослідів – 7



Середнє абсолютних величин коефіцієнтів кореляції 0,2350.
Середнє квадратичне відхилення 0,2371. Дослідів – 15



Середнє абсолютних величин коефіцієнтів кореляції 0,1623.
Середнє квадратичне відхилення 0,2271. Дослідів – 31



Середнє абсолютних величин коефіцієнтів кореляції 0,0844.
Середнє квадратичне відхилення 0,1755. Дослідів – 63

Рисунок 2.2 – Розподіл коефіцієнтів кореляції 51 послідовності [24]

Проведене дослідження показало, що повністю не корельованих послідовностей, на основі ЛПт послідовностей, немає. Проте, виявлена значна кількість слабо корельованих послідовностей. Тому, побудова планів експериментів може проводитися тільки після визначення всіх слабо корельюється послідовностей і їх ранжирування. Побудовані таким чином плани експериментів будуть мати найменшу корельованість ефектів, а отримані на їх основі математичні моделі - відповідати реальній дійсності.

2.3. Дослідження математичних моделей термопар

Звичайно, при моделюванні роботи термопар використовують аперіодичну ланку першого порядку. В операторній формі ця ланка описується наступною передавальною функцією:

$$W(p) = \frac{K}{(1+\tau p)}.$$

Дана передавальна функція характеризується двома параметрами: K — статичний коефіцієнт перетворення, який визначає точність вимірювання температури в статичному режимі вимірювання, і ϵ номінальною характеристикою термопар; τ - стала часу термопар, яка і визначає динамічні властивості ланки [48]. Стала часу характеризує час який потрібен ланці першого порядку, щоб вихідне значення досягло 63,2 % від усталеного, коли ланка буде перебувати в рівновазі.

Проте, у роботі запропоновано розглядати моделі реальних термопар, які складаються із послідовно включених аперіодичних ланок першого порядку, електрично розв'язаних одна відносно одної. Тому, спочатку розглянемо модель термопар у вигляді ланки першого порядку.

Сталу часу отримують із реакції термопар на ступінчасту зміну температури (рис. 2.3.) [48].

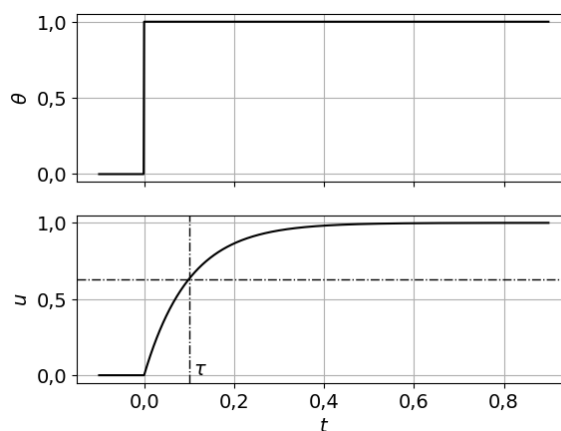


Рисунок 2.3 – Реакція термопар на ступінчасту зміну температури

Сталу часу можна визначити експериментальним із реакції термопар на ступінчасту зміну температури (рис. 2.3), а можна використати лінійну зміну температури і стала часу буде дорівнювати часу затримки відгуку термопар (рис. 2.4) [48].

Якщо термопару вважати аперіодичною ланкою першого порядку, то в цьому випадку процес вимірювання описується звичайним диференціальним рівнянням першого порядку [48]:

$$a_1 \frac{dy(x)}{dx} + a_0 y(x) = f(x),$$

де $y(x)$ – реакція системи на вхідну дію; $f(x)$ – вхідна дія на систему; a_0, a_1 – невідомі коефіцієнти. Перепишемо це рівняння стосовно термопар:

$$\tau \frac{du(t)}{dt} + u(t) = K\theta(t), u(t=0) = u_0 \quad (2.1)$$

де $u(t)$ — функція термо-ЕРС в часовій області, вихід термопар; $\theta(t)$ – функція температури в часовій області, вхід термопар; K — коефіцієнт перетворення температури в термо-ЕРС, становить номінальну статичну характеристику термопар; цей коефіцієнт є нелінійною функцією температури $K = f(\theta)$ і описується поліноміальними моделями; u_0 - термо-ЕРС термопар в стані спокою, до початку зміни температури, при $t < 0$.

При ідентифікації термопар найчастіше користуються методом визначення перехідної характеристики термопар (рис. 2.3). Тобто, в початковий момент часу, коли $t = 0$, температура об'єкту вимірювання миттєво змінюється від значення θ_1 до θ_2 і так залишається незмінною нескінченно довго. Іншими словами, вхідна дія має форму одиничної функції (рис. 2.3) [48]:

$$\sigma(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1, & t > 0 \end{cases}.$$

Можна переписати рівняння термопар наступним чином:

$$\tau \frac{du(t)}{dt} + u(t) = K\sigma(t).$$

Оскільки в розрахунках відрізок часу $t < 0$ не розглядається, то можна остаточно записати:

$$\tau \frac{du(t)}{dt} + u(t) = K.$$

Дане рівняння описує реакцію терморпарі на стрибок температури. Для простоти рішення приймемо $u_0 = 0$, тобто, температура змінюється від нуля до якогось усталеного значення. Для вирішення рівняння застосуємо перетворення Лапласа [48]. Знайдемо зображення членів рівняння :

$$\begin{aligned} u(t) &\rightarrow U(p), \\ \theta(t) &\rightarrow \Theta(P), \\ \frac{du(t)}{dt} &\rightarrow pU(p) - u(0), \\ \sigma(t) &\rightarrow \frac{1}{p} \end{aligned}$$

Отримаємо загальний вираз рівняння в операторній формі:

$$\tau(pU(p) - u(0)) + U(p) = \frac{K}{p}.$$

Оскільки $u_0 = 0$, то отримаємо:

$$\tau pU(p) + U(p) = \frac{K}{p}.$$

Вирішимо дане рівняння відносно $U(p)$:

$$U(p) = \frac{K}{p} \frac{1}{\tau p + 1}.$$

Для переходу до області оригіналів виконаємо певні перетворення. Представимо праву частину у вигляді суми елементарних дробів використавши метод невизначених коефіцієнтів [48]:

$$\frac{K}{p} \frac{1}{\tau p + 1} = \frac{A}{p} + \frac{B}{\tau p + 1}.$$

Зведемо праву частину до спільного знаменника:

$$\frac{A}{p} + \frac{B}{\tau p + 1} = \frac{A(\tau p + 1) + Bp}{p(\tau p + 1)}.$$

З цього рівняння отримаємо рівність чисельників і можемо записати:

$$A(\tau p + 1) + Bp = K.$$

Приведемо рівняння до більш загальної форми:

$$(A\tau + B)p + A = 0p + K,$$

і складемо систему рівнянь:

$$\begin{cases} A\tau + B = 0 \\ A = K \end{cases}.$$

Вирішимо дану систему відносно A і B :

$$\begin{cases} A = K \\ B = -K\tau \end{cases}.$$

Запишемо остаточний вигляд рівняння термо-ЕРС в операторній формі:

$$U(p) = \frac{K}{p} - \frac{K\tau}{\tau p + 1}.$$

Застосуємо зворотнє перетворення Лапласа для отримання рівняння термо-ЕРС в часовій області. Для цього перетворимо доданки в правій частині рівняння [48]:

$$U(p) = K \frac{1}{p} - K \frac{1}{p - \left(-\frac{1}{\tau}\right)}.$$

Виконавши почленне зворотнє перетворення, отримаємо:

$$u(t) = K - K e^{\frac{-t}{\tau}},$$

або звівши подібні отримаємо реакцію термопари на ступінчасту зміну температури:

$$u(t) = K \left(1 - e^{\frac{-t}{\tau}}\right).$$

Графік даної функції зображено на рис. 2.3.

Для простоти розрахунку було прийнято, що температура змінювалась від нуля до якогось значення. Якщо ж температура мала якесь постійне значення, то відповідно на виході термопари існувало певне значення термо-ЕРС u_0 . В результаті отримаємо наступне рівняння [48]:

$$u(t) = K \left(1 - \left(\frac{u_0 - K}{K}\right) e^{\frac{-t}{\tau}}\right).$$

Як зазначалось, іншим методом визначення сталої часу є використання вхідного сигналу температури, який лінійно наростає від одного сталого значення до нескінченності $\theta(t) = t$. Нехай температура наростатиме пропорційно до часу. Прийmemo для простоти $u_0 = 0$. Тоді отримаємо диференційне рівняння наступного виду [48]:

$$\tau \frac{du(t)}{dt} + u(t) = Kt$$

Застосуємо перетворення Лапласа:

$$\tau(pU(p) - u(0)) + U(p) = \frac{K}{p^2}.$$

Виконаємо викладені вище перетворення, отримаємо рівняння термоЕРС в операторній формі:

$$U(p) = \frac{K}{p^2(\tau p + 1)}.$$

Розкладемо праву частину рівняння на прості дроби:

$$U(p) = \frac{-K\tau}{p} + \frac{K}{p^2} + \frac{K\tau^2}{\tau p + 1}$$

Виконаємо зворотнє перетворення Лапласа:

$$u(t) = -K\tau + kt + K\tau e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

Зведемо подібні і отримаємо рівняння термопар при зміні температури термопар за лінійним законом:

$$u(t) = K \left(t + \tau \left(e^{-\frac{t}{\tau}} - 1 \right) \right)$$

Для того щоб отримати значення температури за значенням термо-ЕРС потрібно використати номінальну статичну характеристику термопар. Для спрощення будемо вважати, що існує коефіцієнт K^{-1} , який дозволяє оцінити з певною похибкою значення температури за значенням термо-ЕРС за наступним рівнянням [48]:

$$\theta(t) = K^{-1}u(t).$$

На рис. 2.4 зображено графік залежності дійсної та вимірної температури від часу. Як видно з даного графіку, часове запізнення значень термопар, після виходу на усталений режим дорівнює сталій часу термопар. А похибка вимірювання температури дорівнює $\Delta\theta$. Як видно з рис. 2.4 похибка вимірювання температури пропорційна до сталої часу термопар. Тому дуже важливим є ідентифікація термопар при вимірюванні температури коротких теплових імпульсів для отримання точних результатів вимірювання [48].

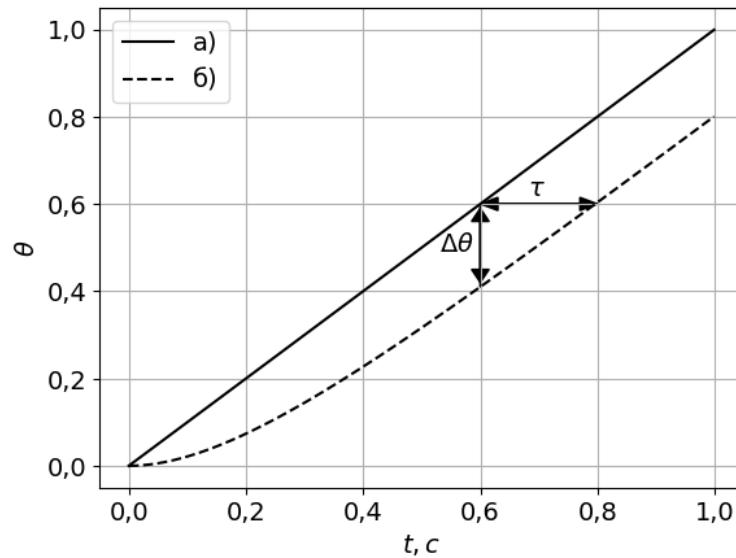


Рисунок 2.4 – Графік залежності дійсної а) та вимірної б) температури, у відносних одиницях, від часу. τ - стала часу терморпарі; $\Delta\theta$ - похибка вимірювання температури в усталеному режимі

Отримаємо рівняння для лінійного форми вхідного температурного сигналу з урахуванням того, що $u_0 \neq 0$.

$$u(t) = K \left(t + \tau \left(e^{-\frac{t}{\tau}} - 1 \right) + \frac{u_0}{K} e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

Отримаємо загальну формулу для визначення термо-ЕРС для будь-якої форми вхідного сигналу температури. Як і раніше, для початку приймемо, що $u_0 = 0$. запишемо в операторній формі рівняння (2.1) [48]:

$$\tau(pU(p) - u(0)) + U(p) = K\theta(p).$$

Виконаємо перетворення для того щоб отримати рівняння залежності термо-ЕРС від температури:

$$U(p) = \theta(p) \frac{K}{\tau p + 1}. \quad (2.2)$$

Виконаємо зворотнє перетворення Лапласа. Добутку образів відповідає згортка оригіналів [25]:

$$F_1(p)F_2(p) \rightarrow \int_0^t f_1(m)f_2(t - m)dm.$$

Тоді, загальне рівняння залежності термо-ЕРС термопари від температури для аперіодичної ланки 1-го порядку матиме наступний вигляд:

$$u(t) = \frac{K}{\tau} \int_0^t \theta(m) e^{-\frac{t+m}{\tau}} dm.$$

Вираз $\frac{K}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}}$ - імпульсна характеристика ланки першого порядку. Тому дане рівняння можна переписати до рівняння, яке описує реакцію лінійної стаціонарної системи в теорії сигналів:

$$u(t) = \int_0^t \theta(m) h(t-m) dm,$$

де h — імпульсна характеристики термопари.

Для випадку коли $u_0 \neq 0$ отримаємо рівняння перетворення термопари.

Виконавши попередні розрахунки отримаємо рівняння в операторній формі:

$$E(p) = \theta \frac{K}{\tau p + 1} + \frac{\tau u_0}{\tau p + 1} \quad (2.3)$$

Виконавши почленно зворотне перетворення Лапласа остаточно отримаємо в загальній формі рівняння перетворення термопари, у вигляді моделі першого порядку, яке матиме наступний вигляд [48]:

$$u(t) = \frac{K}{\tau} \int_0^t \theta(m) e^{-\frac{t+m}{\tau}} dm + u_0(t) e^{-\frac{t}{\tau}}$$

На основі отриманого раніше рівняння (2.2), знайдемо у аналітичному вигляді рівняння реакції термопари на зміну температури середовища за відомими простими законами за початкових нульових умов ($u(0) = 0$).

1. Закон зміни температури середовища має форму функції Хевісайда [48]:

$$\theta(t) = \sigma(t).$$

В операторній формі має вигляд:

$$\theta(p) = \frac{1}{p}.$$

Реакція термопари на вхідну дію в операторній формі:

$$U(t) = \frac{K}{p(\tau p + 1)}.$$

Рівняння реакції термопар на зміну температури за функцією Хевісайда:

$$u(t) = K \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \sigma(t).$$

На рис. 2.5 зображено графік зміни температури в часі θ_r та графік реакції моделі термопар першого порядку на цю зміну θ_m .

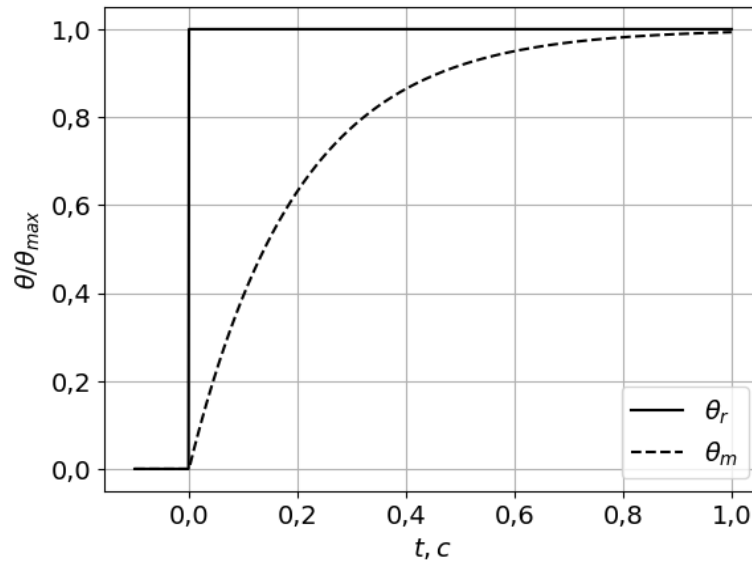


Рисунок 2.5 – Реакція моделі термопар першого порядку на зміну температури за функцією Хевісайда. θ_r – реальна температура середовища вимірювання. θ_m – температура розрахована за значенням моделі термопар.

2. Закон зміни температури середовища має форму функції Хевісайда із запізненням:

$$\theta(t) = \sigma(t - t_0).$$

В операторній формі дана функція має вигляд:

$$\Theta(p) = \frac{e^{-pt_0}}{p}.$$

Реакція термопар на вхідну дію в операторній формі:

$$U(p) = \frac{K e^{-pt_0}}{p(\tau p + 1)}.$$

Дану формулу для зручності застосування зворотнього перетворення Лапласа запишемо в наступному вигляді:

$$U(p) = K \frac{e^{-pt_0}}{p} - K\tau \frac{e^{-pt_0}}{\tau p + 1}$$

Рівняння реакції термопар на зміну температури за функцією Хевісайда із запізненням:

$$u(t) = K \left(1 - e^{-\frac{t-t_0}{\tau}} \right) \sigma(t - t_0)$$

На рис. 2.6 зображено графік зміни температури в часі θ_r та графік реакції моделі термопар першого порядку на цю зміну θ_m .

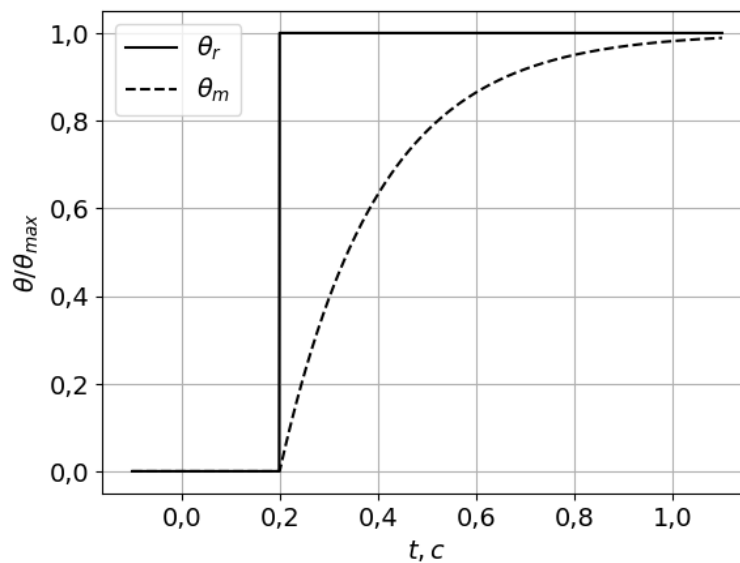


Рисунок 2.6 – Реакція моделі термопар першого порядку на зміну температури за функцією Хевісайда із запізненням. θ_r - температура середовища вимірювання. θ_m - температура розрахована за значенням моделі термопар.

3. Закон зміни температури середовища описується кусково лінійним законом в наступній формі:

$$\theta(t) = \begin{cases} 0, & t \leq 0 \\ t, & t > 0 \wedge t < t_0 \\ \theta_0, & t \geq t_0 \end{cases} \quad (2.4)$$

Тобто, $\theta(t)$ є кусковою функцією, яка змінюється за різними законами на різних проміжках часу (рис. 2.7). Для аналітичного представлення даної залежності в практично придатній формі використаємо одиничну функцію Хевісайда та властивість запізнення операторного методу. Згідно з [26], будь-

яку складну кускову функцію можна отримати за рахунок множення функції на відповідному відрізку часу на $\sigma(t - t_0)$ при різних запізненнях t_0 . Комбінуючи таким чином отриманні добутки отримують загальне рівняння на всій часовій осі [48].

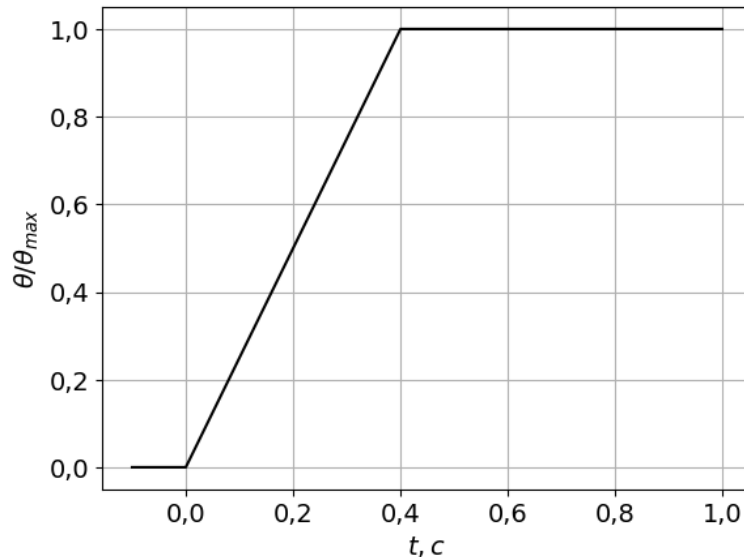


Рисунок 2.7 – Графік зміни температури за кусково лінійним законом

Запишемо рівняння зміни температури в часі використовуючи функцію Хевісайда:

$$\theta(t) = \frac{\theta_0}{t_0} t \sigma(t) - \frac{\theta_0}{t_0} (t - t_0) \sigma(t - t_0).$$

Отримаємо операторну форму цього рівняння:

$$\Theta(p) = \frac{\theta_0}{t_0} \frac{1}{p^2} - \frac{\theta_0}{t_0} \frac{1}{p^2} e^{-pt_0},$$

$$\Theta(p) = \frac{\theta_0}{t_0 p^2} (1 - e^{-pt_0}).$$

Реакція термопари на вхідну дію в операторній формі:

$$U(p) = \frac{\theta_0}{t_0 p^2} (1 - e^{-pt_0}) \frac{K}{\tau p + 1}.$$

Дану формулу, для зручності застосування зворотного перетворення Лапласа, змінимо, виконавши перестановку:

$$U(p) = \frac{\theta_0 K}{t_0} (1 - e^{-pt_0}) \frac{1}{p^2 (\tau p + 1)}.$$

Перетворимо множник $\frac{1}{p^2 (\tau p + 1)}$ на суму простих дробів:

$$U(p) = \frac{\theta_0 K}{t_0} (1 - e^{-pt_0}) \left(\frac{1}{p^2} - \frac{\tau}{p} + \frac{\tau^2}{\tau p + 1} \right).$$

Рівняння реакції термопары на зміну температури за функцією Хевісайда із запізненням:

$$u(t) = \frac{K\theta_0}{t_0} \left(t\sigma(t) - \tau\sigma(t) + \tau e^{-\frac{t}{\tau}}\sigma(t) - (t - t_0)\sigma(t - t_0) + \tau\sigma(t - t_0) - \tau e^{-\frac{t-t_0}{\tau}}\sigma(t - t_0) \right),$$

$$u(t) = \frac{K\theta_0}{t_0} \left(\left(t - \tau \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \right) \sigma(t) - \left((t - t_0) - \tau \left(1 - e^{-\frac{t-t_0}{\tau}} \right) \right) \sigma(t - t_0) \right),$$

$$u(t) = \frac{K\theta_0}{t_0} \left((t - \tau)(\sigma(t) - \sigma(t - t_0)) + \tau e^{-\frac{t}{\tau}} \left(\sigma(t) - e^{\frac{t_0}{\tau}} \sigma(t - t_0) \right) + t_0 \sigma(t - t_0) \right).$$

На рис. 2.8 зображено графік зміни температури в часі θ_r за кусково лінійним законом та графік реакції моделі термопары першого порядку на цю зміну θ_m .

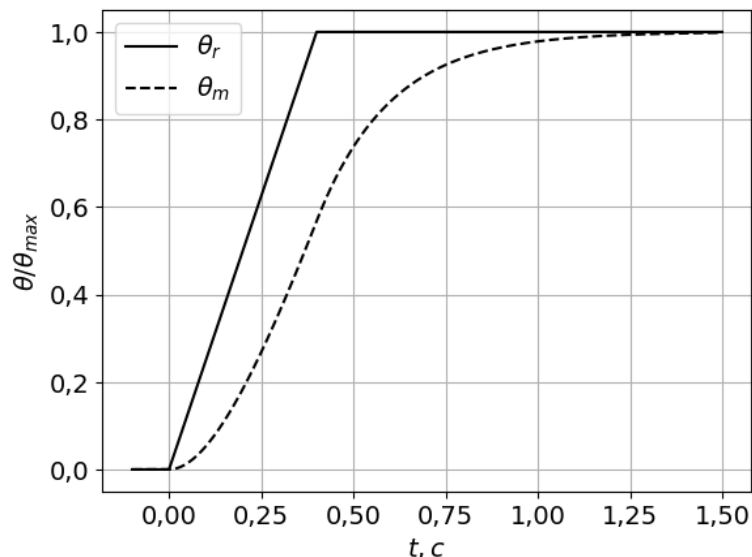


Рисунок 2.8 – Реакція моделі термопары першого порядку на зміну температури за кусково-лінійним законом (2.4). θ_r - температура середовища вимірювання. θ_m - температура розрахована за значенням моделі термопары.

4. Температура середовища змінюється за наступним законом:

$$\theta(t) = \begin{cases} 0, & t \leq 0 \\ t^2, & t > 0 \wedge t < t_0 \\ \theta_0, & t \geq t_0 \end{cases} \quad (2.5)$$

Запишемо рівняння зміни температури в часі використовуючи функцію Хевісайда:

$$\theta(t) = \frac{\theta_0}{t_0^2} t^2 \sigma(t) - \frac{\theta_0}{t_0^2} (t^2 - t_0^2) \sigma(t - t_0).$$

На рис. 2.9 зображено графік зміни температури в часі θ_r за кусково лінійним законом та графік реакції моделі термопари першого порядку на цю зміну θ_m .

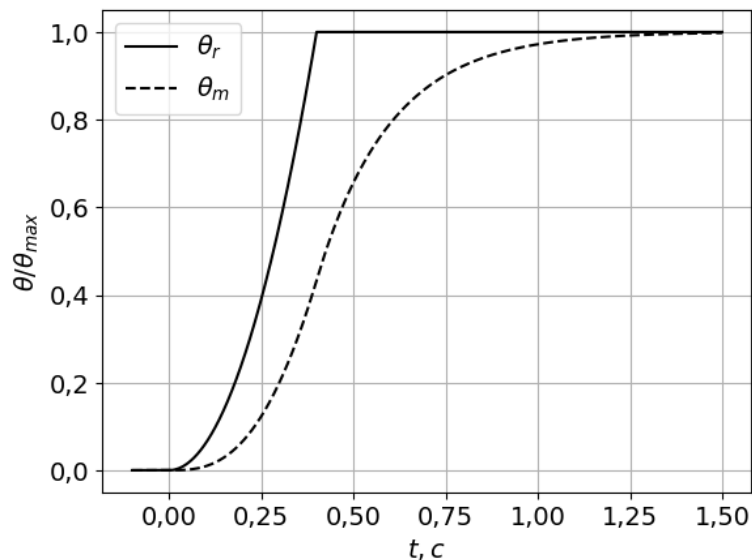


Рисунок 2.9 – Реакція моделі термопари першого порядку на зміну температури за кусково-нелінійним законом (2.5). θ_r - температура середовища вимірювання. θ_m - температура розрахована за значенням моделі термопари.

5. Температура середовища змінюється за наступним законом:

$$\theta(t) = \begin{cases} 0, & t \leq 0 \\ \sqrt{t}, & t > 0 \wedge t < t_0 \\ \theta_0, & t \geq t_0 \end{cases} \quad (2.6)$$

Запишемо рівняння зміни температури в часі використовуючи функцію Хевісайда:

$$\theta(t) = \frac{\theta_0}{\sqrt{t_0}} \sqrt{t} \sigma(t) - \frac{\theta_0}{\sqrt{t_0}} (\sqrt{t} - \sqrt{t_0}) \sigma(t - t_0).$$

На рис. 2.10 зображено графік зміни температури в часі θ_r за кусково лінійним законом та графік реакції моделі термопарі першого порядку на цю зміну θ_m .

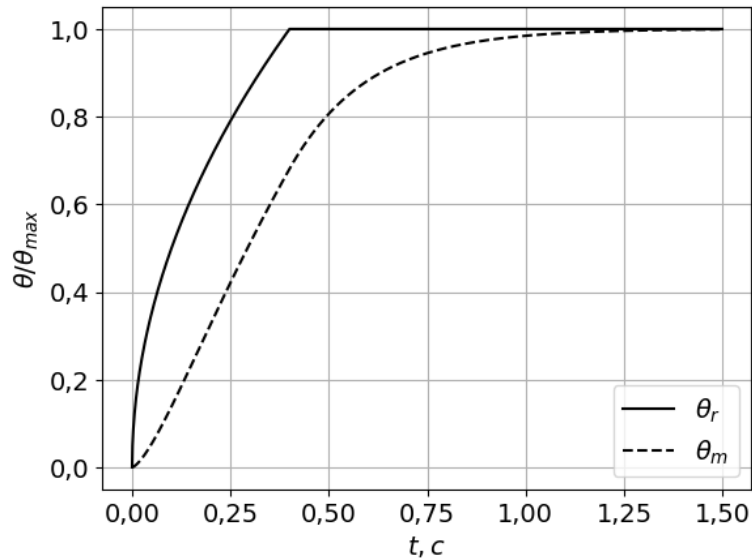


Рисунок 2.10 – Реакція моделі термопарі першого порядку на зміну температури за кусково лінійним законом (2.6). θ_r - температура середовища вимірювання. θ_m - температура розрахована за значенням моделі термопарі.

6. Температура середовища змінюється за наступним законом:

$$\theta(t) = \begin{cases} 0, & t \leq 0 \\ e^t - 1, & t > 0 \wedge t < t_0 \\ \theta_0, & t \geq t_0 \end{cases} \quad (2.7)$$

Запишемо рівняння зміни температури в часі використовуючи функцію Хевісайда:

$$\theta(t) = \frac{\theta_0}{e^{t_0} - 1} ((e^t - 1) \sigma(t) - (e^t - e^{t_0}) \sigma(t - t_0)).$$

На рис. 2.11 зображено графік зміни температури в часі θ_r за кусково лінійним законом та графік реакції моделі термопарі першого порядку на цю зміну θ_m .

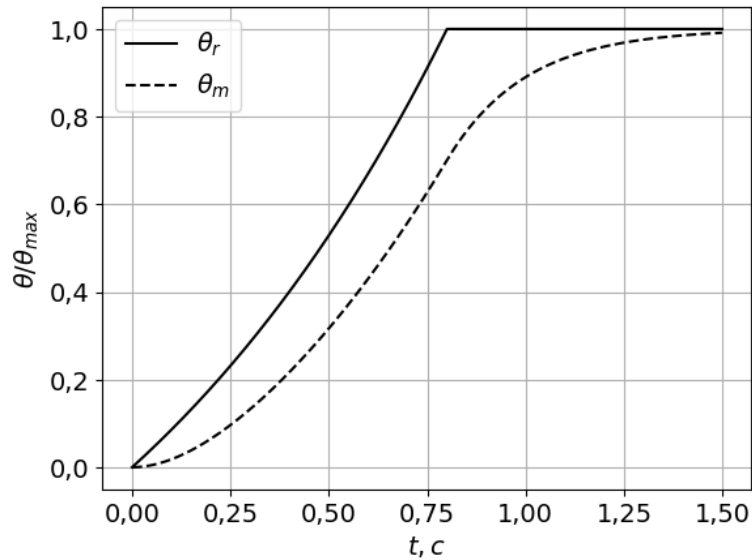


Рисунок 2.11 – Реакція моделі термопарі першого порядку на зміну температури за кусково-нелінійним законом (2.7). θ_r - температура середовища вимірювання. θ_m - температура розрахована за значенням моделі термопарі.

7. Температура середовища змінюється за наступним законом:

$$\theta(t) = \begin{cases} 0, & t \leq 0 \\ \sin(2\pi ft), & t > 0 \wedge t < t_0 \end{cases} \quad (2.8)$$

Запишемо рівняння зміни температури в часі використовуючи функцію Хевісайда:

$$\theta(t) = \sin(2\pi ft)\sigma(t).$$

На рис. 2.12 зображено графік зміни температури в часі θ_r за кусково лінійним законом (2.8) та графік реакції моделі термопарі першого порядку на цю зміну θ_m .

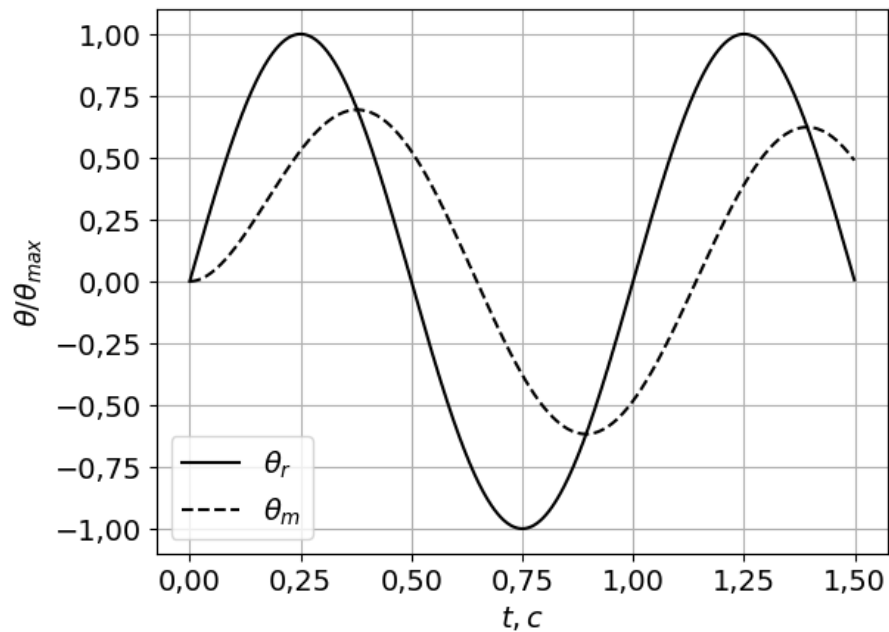


Рисунок 2.12 – Реакція моделі термопарі першого порядку на зміну температури за кусково-лінійним законом (2.8). θ_r - температура середовища вимірювання. θ_m - температура розрахована за значенням моделі термопарі.

2.4. Вдосконалення динамічної моделі термопарі

Динамічні вимірювання температури пов'язані із використанням термопарі у динамічному режимі. У цьому режимі потрібно враховувати зміну в часі термо-ЕРС термопарі. Динамічні характеристики описують реакцію термопарі на вхідний змінний сигнал. Як вже зазначалось, перехідну характеристику такої системи можна описати експоненціальним рядом [47, 50]:

$$h(t) = 1 + k_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} + k_2 e^{-b\frac{t}{\tau_2}} + \dots$$

де k_1, k_2, \dots - коефіцієнти моделі; τ_1, τ_2, \dots - сталі часу термопарі. Дану модель можна напряму використовувати для апроксимації перехідної характеристики. Проте, із збільшенням кількості членів ряду, збільшується кількість невідомих в два рази, які потрібно визначити, що в свою чергу, ускладнює процес сходження алгоритму апроксимації. Тому, потрібно якимось чином зменшити кількість невідомих [49].

В якості динамічної моделі термопарі приймемо аперіодичну ланку n -го порядку. У випадку термопарі, рівняння має тільки дійсні корені, тому можна його записати у вигляді:

$$H(s) = \frac{1}{s(\tau_n s + 1)(\tau_{n-1} s + 1) \cdots (\tau_1 s + 1)}.$$

Для зручності були виконані заміни $a = \frac{1}{\tau_1}$, $b = \frac{1}{\tau_2}$ тощо.

В результаті отримаємо рівняння перехідної характеристики в операторній формі [49]:

$$H(s) = \frac{abc \dots}{s(s+a)(s+b)(s+c) \dots}.$$

Використовуючи метод аналітичних розрахунків були отримані оригінали та образи перехідних характеристик для моделей із кількістю сталих часу від двох до шести (табл. 2.1) [49].

Таблиця 2.1. Моделі перехідної характеристики термопарі

$\mathcal{L}_s^{(-1)}$ (часова форма)	\mathcal{L}_s (операторна форма)
$h(t) = 1 - e^{-at}$	$H(s) = \frac{a}{s(s+a)}$
$h(t) = 1 + \frac{be^{-at}}{a-b} + \frac{ae^{-bt}}{b-a}$	$H(s) = \frac{ab}{s(s+a)(s+b)}$
$h(t) = 1 - \frac{bce^{-at}}{(a-b)(a-c)} - \frac{ace^{-bt}}{(b-a)(b-c)} - \frac{abe^{-ct}}{(c-a)(c-b)}$	$H(s) = \frac{abc}{s(s+a)(s+b)(s+c)}$
$h(t) = 1 + \frac{bcde^{-at}}{(a-b)(a-c)(a-d)} + \frac{acde^{-bt}}{(b-a)(b-c)(b-d)} + \frac{abde^{-ct}}{(c-a)(c-b)(c-d)} + \frac{abce^{-dt}}{(d-a)(d-b)(d-c)}$	$H(s) = \frac{abcd}{s(s+a)(s+b)(s+c)(s+d)}$

$1 - \frac{bcdfe^{-at}}{(a-b)(a-c)(a-d)(a-f)}$ $- \frac{acdfe^{-bt}}{(b-a)(b-c)(b-d)(b-f)}$ $- \frac{abdfce^{-ct}}{(c-a)(c-b)(c-d)(c-f)}$ $- \frac{abcfe^{-dt}}{(d-a)(d-b)(d-c)(d-f)}$ $- \frac{abcde^{-ft}}{(f-a)(f-b)(f-c)(f-d)}$	$H(s) = \frac{abcdf}{s(s+a)(s+b)(s+c)(s+d)(s+f)}$
$1 + \frac{bcd f g e^{-at}}{(a-b)(a-c)(a-d)(a-f)(a-g)}$ $+ \frac{acd f g e^{-bt}}{(b-a)(b-c)(b-d)(b-f)(b-g)}$ $+ \frac{abdf g e^{-ct}}{(c-a)(c-b)(c-d)(c-f)(c-g)}$ $+ \frac{abc f g e^{-dt}}{(d-a)(d-b)(d-c)(d-f)(d-g)}$ $+ \frac{abcd g e^{-ft}}{(f-a)(f-b)(f-c)(f-d)(f-g)}$ $+ \frac{abcd f e^{-gt}}{(g-a)(g-b)(g-c)(g-d)(g-f)}$	$H(s) = \frac{abcdfg}{s(s+a)(s+b)(s+c)(s+d)(s+f)(s+g)}$

Рівняння із табл. 2.1 зручно напряму використовувати в операціях апроксимації перехідної характеристики термопар, оскільки в більшості довідників оригінали та образи представлені тільки для рівнянь першого ступеня [49].

2.5. Застосування високочастотного сигналу для ідентифікації динамічної характеристики термопар

Побудуємо модель теплообміну спаю термопар з навколишнім середовищем. Для складання моделі теплообміну використаємо закон збереження енергії та виведемо рівняння теплового балансу. Згідно першої засади термодинаміки кількість тепла підведена до термопарі йде на збільшення внутрішньої енергії та на роботу. Оскільки термопара не виконує ніякої роботи, то рівняння теплового балансу матиме наступний вигляд:

$$dE = \sum_{i=1}^n dQ_i$$

де dE — елементарна зміна внутрішньої енергії термопарі; dQ_i - підведена або відведена елементарна кількість тепла.

Обмін тепловою енергією відбувається трьома способами: теплопровідністю, конвекцією та випромінюванням. Для дослідження процесів передачі теплової енергії використовують рівняння теплопровідності Фур'є, яке виведено експериментальним шляхом. Дане рівняння встановлює зв'язок між тепловим потоком та градієнтом температури [27]:

$$q = -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial n} = -\lambda \text{grad} \theta$$

де q_s — питомий тепловий потік, який проходить через одиницю площини за одиницю часу, або питома тепла потужність, [Вт/(м²)]; λ — коефіцієнт теплопровідності речовини, Вт/(м·К); $\frac{\partial \theta}{\partial n}$ — зміна температури за нормаллю до елементарної площини ізотермічної поверхні.

Рівняння Фур'є, в загальному вигляді, описує процес теплообміну. Рівняння теплопровідності термопарі можна отримати розглянувши тепловий баланс для елементарного об'єму. Рівняння теплообміну термопарі в декартовій системі координат:

$$c\rho \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + q_v$$

де $c=f(t,x,y,z)$ - питома теплоємність [Дж/(кг·К)]; $\rho=f(\theta,x,y,z)$ - густина, [кг/м³]; $q_v = f(t,x,y,z)$ - питома об'ємна потужність джерел та стоків, розподілених в об'ємі тіла, [Вт/м³]. Коефіцієнти моделі залежать від температури та структури матеріалу термопарі.

В залежності від моделі термопарі та граничних умов отримаємо конкретне рівняння теплообміну. В першому наближенні розглянемо термопару як однорідне ізотропне тіло в якому діють джерела теплоти та

області з поглинанням тепла розподілені в об'ємі. Рівняння теплообміну в декартовій системі координат матиме наступний вигляд:

$$c(\theta)\rho(\theta)\frac{\partial\theta}{\partial t}=\lambda(\theta)\left(\frac{\partial^2\theta}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\theta}{\partial y^2}+\frac{\partial^2\theta}{\partial z^2}\right)+q_V$$

Фізичні коефіцієнти залежать від температури. Прийmemo, в першому наближенні, тезу про незалежність від температури фізичних коефіцієнтів. В цьому разі рівняння теплообміну матиме вигляд:

$$\frac{\partial\theta}{\partial t}=a\left(\frac{\partial^2\theta}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\theta}{\partial y^2}+\frac{\partial^2\theta}{\partial z^2}\right)+\frac{q_V}{c\rho}$$

де a — температуропровідність термопар.

Для стаціонарного теплового потоку який проходить в ізотропному однорідному середовищі, теплофізичні властивості якого не залежать від температури, а теплообмін відбувається в напрямі однієї вісі координат, рівняння теплопровідності Фур'є можна звести до алгебраїчного рівняння. Для такого випадку теплообмін між твердим тілом та середовищем при переході питомого теплового потоку q_S через поверхню термопар S описується законом Ньютона [27]:

$$q_S=\alpha(\theta-\theta_c)$$

де α - коефіцієнт тепловіддачі, [Дж/(с м² К)]; $\theta-\theta_c$ - різниця температур термопар та середовища. З цього рівняння випливає, що температура пропорційна питомій потужності тепла. Перепишемо дане рівняння відносно температури термопар θ :

$$q=\alpha S(\theta-\theta_c)$$

$$\theta=\theta_c+\frac{q}{\alpha S}$$

де q — тепловий потік, [Вт].

Тепловий обмін між термопарою, через яку пропускають постійний струм, та зовнішнім середовищем, при досягненні термодинамічної рівноваги між ними, можна визначити із законів Джоуля, для потужності струму, та

закону Ньютона, для теплопередачі. Потужність створена струмом пропорційна тепловому потоку через поверхню терморпарі:

При протіканні струму через терморпару в об'ємі останньої виділяється тепло. Кількість тепла, яка виділяється пропорційна квадрату струму та часу дії струму.

$$Q_{\text{Дж}} = RI^2t$$

де R — сумарний опір провідника.

Миттєве значення потужності змінного електричного струму визначається за формулою:

$$p = q$$

$$\frac{U^2}{R} = \alpha S(\theta - \theta_c)$$

$$\theta = \theta_c + \frac{1}{\alpha SR} U^2$$

Дане рівняння описує перетворення електричної енергії в теплову в стаціонарному режимі теплообміну.

Терморпара складається з двох різнорідних металевих проводів з'єднаних з різними фізико-хімічними властивостями. Така структура терморпарі сприяє виникненню додаткових явищ, крім явища Джоуля, які створюють або поглинають тепло. Ці явища називають термоелектричними, оскільки вони залежать від значення температури та її розподілу. До цих явищ відносяться ефекти Зеєбека, Пельть'є та Томсона.

Для позбавлення ефектів Пельть'є та Тамсона використовується гармонічний змінний струм. Миттєве значення потужності змінного електричного струму визначається за формулою:

$$p(t) = u(t)i(t) = U_m I_m \sin(\omega t) \sin(\omega t - \phi)$$

На графіках рис. 2.13 приведено форми вхідного та вихідного сигналів терморпарі при використанні змінного струму.

Виконавши тригонометричні перетворення отримаємо:

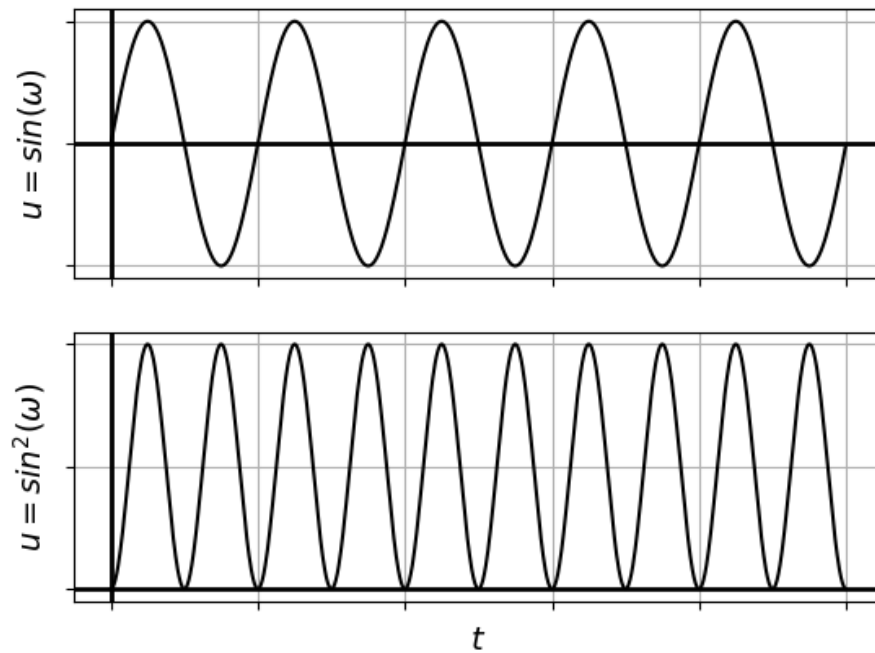


Рисунок 2.13 – Форми вхідного та вихідного сигналів термопар

$$p(t) = \frac{U_m I_m}{2} (\cos(\omega t - \omega t + \phi) - \cos(\omega t + \omega t - \phi)) = \frac{U_m I_m}{2} (\cos(\phi) - \cos(2\omega t))$$

$$p(t) = \frac{U_m I_m}{\sqrt{2}\sqrt{2}} (\cos(\phi) - \cos(2\omega t))$$

$$p(t) = UI (\cos(\phi) - \cos(2\omega t - \phi))$$

де p — миттєва потужність, u — миттєва напруга, i — миттєвий струм, U_m — амплітуда напруги, I_m — амплітуда струму, U — діюче значення напруги, I — діюче значення струму, ϕ — зсув фаз між напругою та струмом.

Миттєве значення потужності на активному опорі:

$$p(t) = UI(1 - \cos(2\omega t))$$

Приклад потужності сигналу радіоімпульсу для модельних значень струму, напруги та опору термопар приведено на рис. 2.14.

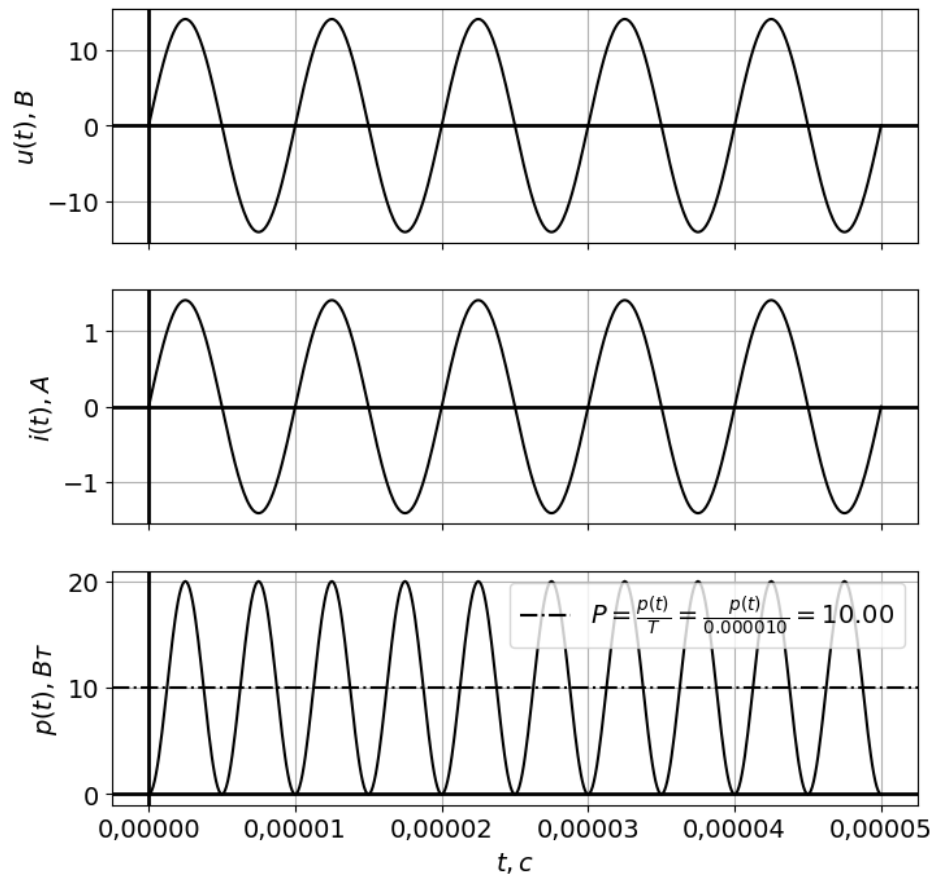


Рисунок 2.14 – Потужність сигналу радіоімпульсу

Енергія змінного струму:

$$Q = \int_0^T p(t) dt = \int_0^T UI(1 - \cos(2\omega t)) dt$$

$$Q = \int_0^T UI(1 - \cos(2\omega t)) dt$$

$$Q = UI \left(T - \frac{1}{2\omega} \sin(2\omega T) \right)$$

де T — тривалість дії електричного струму.

До встановлення термодинамічної рівноваги між термопарою та навколишнім середовищем, потужність електричного струму, який проходить через термопару, витрачається на збільшення внутрішньої енергії та на тепловий потік, який виникає між термопарою та навколишнім середовищем. Тепловий потік через поверхню термопари, при проходженні через термопару електричного струму, пропорційний різниці температур термопари та навколишнього середовища та площі поверхні охолодження.

2.6. Застосування сигналу інфранизької частоти для ідентифікації динамічної характеристики термопар на основі АФЧХ

Якщо відома динамічна характеристика в операторній формі $W(p)$, то вхідна вимірювана температура в операторній формі знаходиться за формулою (2.9) [46].

$$T(p)_{\text{вх}} = \frac{E(p)_{\text{вих}}}{W(p)}, \quad (2.9)$$

де $E(p)_{\text{вих}}$ - електрорушійна сила термопар або вихідний сигнал термоперетворювача; $T(p)_{\text{вх}}$ - вхідна температура в операторній формі.

Серед повних динамічних характеристик найбільш важливими є диференційне рівняння, перехідна, імпульсна перехідна та амплітудо-фазочастотна характеристики, які можуть бути взаємно перераховані.

Диференційне рівняння пов'язує вхідні та вихідні величини в часі незалежно від їх форми. Перехідна, імпульсна перехідна та амплітудно-частотна характеристики вимагають застосовувати на вході стандартні сигнали: стрибок, дельта імпульс та гармонічний сигнал, відповідно.

В дисертації пропонується визначати динамічну характеристику на основі амплітудо-фазочастотних характеристик термопар. Для цього спай термопар розігрівається струмом синусної форми. Завдяки розігріву підвідних провідників, збільшується їх температура, яка пропорційна потужності, що в них виділяється через наявність електричного опору, яка в сою чергу пропорційна квадрату струму, який проходить через провідник. Таким чином ЕРС термопар буде мати в своєму складі постійну складову і складову другої гармоніки (2.10).

$$E(t) = ki(t) = kI_m^2 \sin^2(\omega t) = k \frac{I_m^2}{2} (1 - \cos(2\omega t)). \quad (2.10)$$

АЧХ термопар (2.11), в цьому випадку, буде визначається як відношення амплітуди змінної складової ЕРС термопар у вигляді складової на подвійній частоті вхідного струму, до амплітуди другої гармоніки

вхідного струму, отриманої шляхом піднесення миттєвих значень до квадрату, обчислювальним шляхом.

$$W(2\omega) = \frac{E_m(2\omega)}{I_m^2(2\omega)}. \quad (2.11)$$

Спрощена структурна (рис. 2.15) модель процесів, які відбуваються в реальній термопарі при пропусканні через неї електричного струму може бути представлена наступним рисунком.

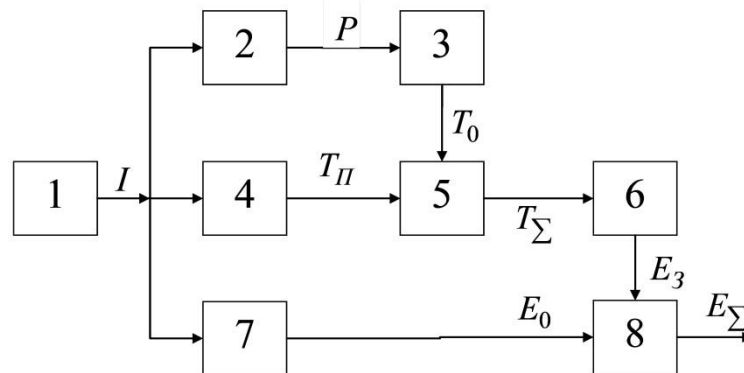


Рисунок 2.15 – Спрощена структурна модель процесів, які відбуваються в термопарі при пропусканні через неї електричного струму де 1 – джерело струму; 2 – перетворювач струму в потужність; 3 – перетворювач потужності в температуру Джоуля; 4 – перетворювач струму в температуру Пельт’є; 5 – суматор Температур; 6 – перетворювач температури в ЕРС Зеебека; 7 – перетворювач струму в напругу на резисторах; 8 – суматор ЕРС Зеебека і напруги на резисторах; I – струм через термопару; P – активна потужність, що виділяється на еквівалентному опорі провідників біля спаю термопар (2.12):

$$P = I^2 R. \quad (2.12)$$

T_0 - температура, що має місце на спаї термопар в наслідок дії ефекту Джоуля (2.13);

$$T_0 = k_D P, \quad (2.13)$$

де k_D - коефіцієнт пропорційності залежить від теплообмінних процесів; T_{II} - температура спаю, яка має місце внаслідок дії ефекту Пельт’є згідно якого кількість тепла Q_{II} пропорційна струмові, що проходить через спай (2.14);

$$Q_{II} = k_{II} I t, \quad (2.14)$$

де k_{II} - коефіцієнт Пельть'є; t - час; E_3 - ЕРС Зеебека, яка пропорційна різниці температур гарячого і холодного спаю термопар (2.15);

$$E_3 = k_3 (T_{Г} - T_{Х}), \quad (2.15)$$

де k_3 - коефіцієнт пропорціональності; $T_{Г}$, $T_{Х}$ - температура гарячого та холодного спаїв термопар; T_{Σ} - сумарна температура спаю; E_0 - електрорушійна сила, яка виділяється на повному опорі спаю та підвідних проводах (2.16);

$$E_0 = I \cdot z, \quad (2.16)$$

де z - повний опір спаю та підвідних проводів термопар.

Термопару можна представити як нероз'ємний чорний ящик. Еквівалентну електричну модель динамічної схеми термопар можна представити у вигляді декількох послідовно включених аперіодичних ланок першого порядку, розв'язаних ідеальними повторювачами напруги (рис. 2.16). Кількість ланок та значення сталих часу не відомо.

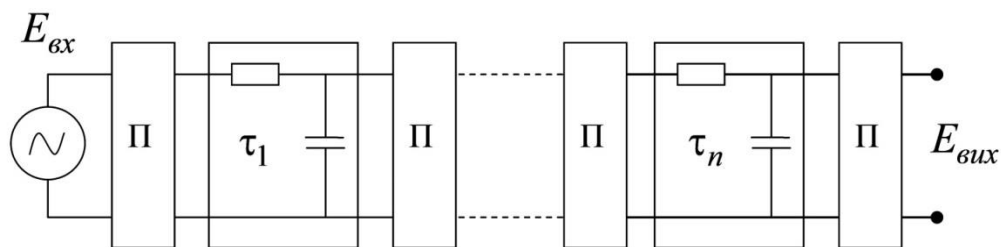


Рисунок 2.16 – Еквівалентна електрична модель динамічної схеми термопар

АФЧХ такої моделі (2.17), в комплексній формі є добуток комплексних коефіцієнтів передачі кожної ланки.

$$h(j\omega) = \prod_{i=1}^n \frac{1}{1 + j\omega\tau_i}. \quad (2.17)$$

Модуль коефіцієнта передачі (2.17) моделі на рис. 2.16 є добутком модулів окремих ланок (2.18).

$$h(\omega) = \prod_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega\tau_i)^2}}, \quad (2.18)$$

де ω - частота, τ_i - стала часу. Фазовий зсув дорівнює сумі фазових зсувів окремих ланок (2.19).

$$\varphi_{\Sigma} = -\sum_{i=1}^n \operatorname{arctg}(\omega\tau_i). \quad (2.19)$$

При дослідженні реальної термопари невідомими є як значення кожної сталої часу τ_i так і їх кількість. Рівняння (2.18) має n змінних. Вони можуть бути знайдені або шляхом складання та розв'язання системи з n рівнянь або з масиву даних АЧХ, ФЧХ методом найменших квадратів. Кількість актуальних сталих часу, які необхідно враховувати, залежить від їхньої питомої ваги в формулах (2.18-2.19). Кількість сталих часу, які необхідно враховувати для досягнення заданої точності знаходиться методом поступових наближень. А саме, спочатку передбачається наявність однієї сталої часу, потім двох, трьох і т. д. до того випадку, коли врахування наступної сталої часу не буде суттєво впливати на значення попередньо знайдених.

У першому наближенні, для встановлення кількості сталих часу, можна скористатись графіками АФЧХ термопари. Фаза інерційної ланки із однією сталою часу не перевищує 90° і тому АФЧХ знаходиться у першому квадранті. Фаза інерційної лаки із двома сталими часу на перевищуюю 180° і тому АФЧХ проходить через перший та другий квадранти і т.д. За графіком АФЧХ можна наближено встановити модель термопари, яку в подальшому, можна використовувати для апроксимації експериментальних даних. Приклади графіків АФЧХ моделей термопари із різною кількістю сталих часу зображено на рис. 2.17.

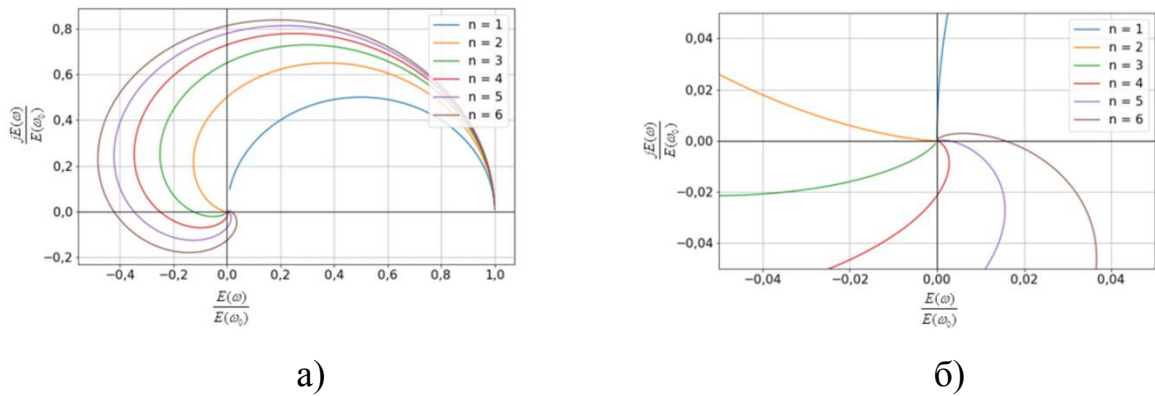


Рисунок 2.17 – Графіки АФЧХ моделей термопар із різною кількістю сталей часу на частотах від 0 до ∞ .

а) загальний масштаб; б) збільшений масштаб; n – кількість сталей часу

2.7. Дослідження похибки математичних моделей перехідної та амплітудно-частотної характеристик термопар

У роботі отримано відносні похибки математичних моделей перехідної та амплітудно-частотної характеристик для двох сталей часу.

Як зазначалось, загальна модель перехідної характеристики термопар описується рівнянням (2.20).

$$E(t) = E_0 \left(1 + k_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} + k_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}} \right). \quad (2.20)$$

Виконавши перетворення рівняння (2.20) для виділення похибок параметрів отримали:

$$\frac{E(t)}{E_0} = 1 + k_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} + k_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}}.$$

Представивши ліву частину рівняння наступним чином:

$$A = \frac{E(t)}{E_0},$$

у результаті отримали перехідну характеристику термопар (2.21)

$$A = 1 + k_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} + k_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}}. \quad (2.21)$$

Була визначена відносна похибка рівняння термопар (2.21) $\delta A = f(\delta t, \delta \tau_1, \delta \tau_2, \delta k_1, \delta k_2)$. Використавши алгебраїчний метод визначення відносної похибки функції на основі відносних похибок аргументів, шляхом розкладу складного виразу на елементарні функції відносні похибки яких відомі [18], було розраховано відносну похибку значень перехідної характеристики у залежності від відносних похибок вимірювання часу та визначення сталих часу (2.22).

$$\begin{aligned} \delta(A) &= \delta \left(1 + k_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} + k_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}} \right) = \\ &= \frac{1}{1 + k_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} + k_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}}} \left[1 \delta(1) + k_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} \delta \left(k_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right) + k_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}} \delta \left(k_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}} \right) \right]. \end{aligned} \quad (2.22)$$

Враховавши, що $\delta(1) = 0$, складові похибки рівняння (2.22) мають наступні вирази:

$$\begin{aligned} \delta \left(k_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right) &= \delta(k_1) + \delta \left(e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right). \\ \delta \left(e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right) &= -\frac{t}{\tau_1} \delta \left(-\frac{t}{\tau_1} \right). \\ \delta \left(-\frac{t}{\tau_1} \right) &= -\delta \left(\frac{t}{\tau_1} \right) = -[\delta(t) - \delta(\tau_1)]. \\ \delta \left(e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right) &= -\frac{t}{\tau_1} (-[\delta(t) - \delta(\tau_1)]) = \frac{t}{\tau_1} [\delta(t) - \delta(\tau_1)]. \\ \delta \left(k_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right) &= \delta(k_1) + \frac{t}{\tau_1} [\delta(t) - \delta(\tau_1)]. \end{aligned}$$

Другу складову похибки знаходимо подібним чином. Підставивши отримані рівняння складових похибок у рівняння (2.22) отримали рівняння (2.23).

$$\delta(A) = \frac{1}{1 + k_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} + k_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}}} * \left[k_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} \left(\delta(k_1) + \frac{t}{\tau_1} [\delta(t) - \delta(\tau_1)] \right) + k_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}} \left(\delta(k_2) + \frac{t}{\tau_2} [\delta(t) - \delta(\tau_2)] \right) \right]. \quad (2.23)$$

Виконавши перегрупування складових значень похибок отримали:

$$\begin{aligned} & k_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} \left(\delta(k_1) + \frac{t}{\tau_1} [\delta(t) - \delta(\tau_1)] \right) + k_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}} \left(\delta(k_2) + \frac{t}{\tau_2} [\delta(t) - \delta(\tau_2)] \right) = \\ & = k_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} \delta(k_1) + k_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} \frac{t}{\tau_1} \delta(t) - k_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} \frac{t}{\tau_1} \delta(\tau_1) + \\ & + k_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}} \delta(k_2) + k_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}} \frac{t}{\tau_2} \delta(t) - k_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}} \frac{t}{\tau_2} \delta(\tau_2) = \\ & = k_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} \frac{t}{\tau_1} \delta(t) + k_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}} \frac{t}{\tau_2} \delta(t) + k_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} \delta(k_1) - k_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} \frac{t}{\tau_1} \delta(\tau_1) + \\ & + k_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}} \delta(k_2) - k_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}} \frac{t}{\tau_2} \delta(\tau_2) = \\ & = \left(k_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} \frac{t}{\tau_1} + k_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}} \frac{t}{\tau_2} \right) \delta(t) + k_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} \left(\delta(k_1) - \frac{t}{\tau_1} \delta(\tau_1) \right) + k_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}} \left(\delta(k_2) - \frac{t}{\tau_2} \delta(\tau_2) \right). \end{aligned}$$

У результаті було визначена відносна похибка термо-ЕРС термопар (2.24).

$$\delta(A) = \frac{1}{1 + k_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} + k_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}}} * \left[\left(k_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} \frac{t}{\tau_1} + k_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}} \frac{t}{\tau_2} \right) \delta(t) + k_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} \left[\delta(k_1) - \frac{t}{\tau_1} \delta(\tau_1) \right] + k_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}} \left[\delta(k_2) - \frac{t}{\tau_2} \delta(\tau_2) \right] \right]. \quad (2.24)$$

Розширена модель перехідної характеристики термопар дозволяє скоротити кількість невідомих, тим самим зменшивши кількість джерел впливу на загальну похибку. Для цього потрібно розкрити коефіцієнти при

експонентах k_1 та k_2 . Була розглянута форма перехідної характеристики із оберненими значеннями сталих часу (табл. 2.1), $a = \frac{1}{\tau_1}$, $b = \frac{1}{\tau_2}$ (2.25).

$$A = 1 + \frac{b}{a-b} e^{-at} + \frac{a}{b-a} e^{-bt}. \quad (2.25)$$

Замінивши значення параметрів у рівнянні (2.25) на вирази для сталих часу отримали (2.26).

$$A = 1 + \frac{\frac{1}{\tau_2}}{\frac{1}{\tau_1} - \frac{1}{\tau_2}} e^{-\frac{t}{\tau_1}} + \frac{\frac{1}{\tau_1}}{\frac{1}{\tau_2} - \frac{1}{\tau_1}} e^{-\frac{t}{\tau_2}}. \quad (2.26)$$

Виконавши перетворення коефіцієнтів при експонентах отримали:

$$\frac{\frac{1}{\tau_2}}{\frac{1}{\tau_1} - \frac{1}{\tau_2}} = \frac{\frac{1}{\tau_2}}{\frac{\tau_2 - \tau_1}{\tau_1 \tau_2}} = \frac{1}{\tau_2} \frac{\tau_1 \tau_2}{\tau_2 - \tau_1} = \frac{\tau_1}{\tau_2 - \tau_1}.$$

$$\frac{\frac{1}{\tau_1}}{\frac{1}{\tau_2} - \frac{1}{\tau_1}} = \frac{\frac{1}{\tau_1}}{\frac{\tau_1 - \tau_2}{\tau_1 \tau_2}} = \frac{1}{\tau_1} \frac{\tau_1 \tau_2}{\tau_1 - \tau_2} = \frac{\tau_2}{\tau_1 - \tau_2}.$$

Підставивши отримані вирази у рівняння (2.26), отримали рівняння перехідної характеристики (2.27).

$$A = 1 + \frac{\tau_1}{\tau_2 - \tau_1} e^{-\frac{t}{\tau_1}} + \frac{\tau_2}{\tau_1 - \tau_2} e^{-\frac{t}{\tau_2}}. \quad (2.27)$$

Відповідно, маємо значення коефіцієнтів k_1 та k_2 (2.28).

$$k_1 = \frac{\tau_1}{\tau_2 - \tau_1}, \quad k_2 = \frac{\tau_2}{\tau_1 - \tau_2}. \quad (2.28)$$

Похибка коефіцієнту k_1 виражаються рівнянням (2.29).

$$\delta(k_1) = \delta\left(\frac{\tau_1}{\tau_2 - \tau_1}\right) = \delta(\tau_1) - \delta(\tau_2 - \tau_1).$$

$$\delta(\tau_2 - \tau_1) = \frac{1}{\tau_2 - \tau_1} [\tau_1 \delta(\tau_1) + \tau_2 \delta(\tau_2)]. \quad (2.29)$$

$$\begin{aligned}
\delta(k_1) &= \delta(\tau_1) - \frac{1}{\tau_2 - \tau_1} [\tau_1 \delta(\tau_1) + \tau_2 \delta(\tau_2)] = \\
&= \delta(\tau_1) - \frac{\tau_1}{\tau_2 - \tau_1} \delta(\tau_1) - \frac{\tau_2}{\tau_2 - \tau_1} \delta(\tau_2) = \quad . \\
&= \left(1 - \frac{\tau_1}{\tau_2 - \tau_1} \right) \delta(\tau_1) - \frac{\tau_2}{\tau_2 - \tau_1} \delta(\tau_2) \\
\delta(k_1) &= \left(1 - \frac{\tau_1}{\tau_2 - \tau_1} \right) \delta(\tau_1) - \frac{\tau_2}{\tau_2 - \tau_1} \delta(\tau_2).
\end{aligned}$$

Похибка коефіцієнту k_2 виражаються рівнянням (2.30).

$$\begin{aligned}
\delta(k_2) &= \delta\left(\frac{\tau_2}{\tau_1 - \tau_2}\right) = \delta(\tau_2) - \delta(\tau_1 - \tau_2). \\
\delta(\tau_1 - \tau_2) &= \frac{1}{\tau_1 - \tau_2} [\tau_1 \delta(\tau_1) + \tau_2 \delta(\tau_2)]. \\
\delta(k_2) &= \delta(\tau_2) - \frac{1}{\tau_1 - \tau_2} [\tau_1 \delta(\tau_1) + \tau_2 \delta(\tau_2)] = \\
&= \delta(\tau_2) - \frac{\tau_1}{\tau_1 - \tau_2} \delta(\tau_1) - \frac{\tau_2}{\tau_1 - \tau_2} \delta(\tau_2) = \quad . \\
&= \left(1 - \frac{\tau_2}{\tau_1 - \tau_2} \right) \delta(\tau_2) - \frac{\tau_1}{\tau_1 - \tau_2} \delta(\tau_1) \\
\delta(k_2) &= \left(1 - \frac{\tau_2}{\tau_1 - \tau_2} \right) \delta(\tau_2) - \frac{\tau_1}{\tau_1 - \tau_2} \delta(\tau_1).
\end{aligned} \tag{2.30}$$

Підставивши вирази для коефіцієнтів (2.28) та похибок коефіцієнтів при експонентах (2.29-2.30) у рівняння похибки термо-ЕРС (2.23) було отримано розширене рівняння (2.31) похибки перехідної характеристики.

$$\begin{aligned}
\delta(A) &= \frac{1}{1 + \frac{\tau_1}{\tau_2 - \tau_1} e^{-\frac{t}{\tau_1}} + \frac{\tau_2}{\tau_1 - \tau_2} e^{-\frac{t}{\tau_2}}} * \\
&* \left[\left(\frac{t}{\tau_2 - \tau_1} e^{-\frac{t}{\tau_1}} + \frac{t}{\tau_1 - \tau_2} e^{-\frac{t}{\tau_2}} \right) \delta(t) + \right. \\
&+ \frac{\tau_1}{\tau_2 - \tau_1} e^{-\frac{t}{\tau_1}} \left[\left(1 - \frac{\tau_1}{\tau_2 - \tau_1} \right) \delta(\tau_1) - \frac{\tau_2}{\tau_2 - \tau_1} \delta(\tau_2) - \frac{t}{\tau_1} \delta(\tau_1) \right] + \\
&\left. + \frac{\tau_2}{\tau_1 - \tau_2} e^{-\frac{t}{\tau_2}} \left[\left(1 - \frac{\tau_2}{\tau_1 - \tau_2} \right) \delta(\tau_2) - \frac{\tau_1}{\tau_1 - \tau_2} \delta(\tau_1) - \frac{t}{\tau_2} \delta(\tau_2) \right] \right]
\end{aligned} \tag{2.31}$$

Виконавши перетворення похибок сталих часу отримали наступний вираз (2.32):

$$\begin{aligned}
&\frac{\tau_1}{\tau_2 - \tau_1} e^{-\frac{t}{\tau_1}} \left[\left(1 - \frac{\tau_1}{\tau_2 - \tau_1} \right) \delta(\tau_1) - \frac{\tau_2}{\tau_2 - \tau_1} \delta(\tau_2) - \frac{t}{\tau_1} \delta(\tau_1) \right] + \\
&+ \frac{\tau_2}{\tau_1 - \tau_2} e^{-\frac{t}{\tau_2}} \left[\left(1 - \frac{\tau_2}{\tau_1 - \tau_2} \right) \delta(\tau_2) - \frac{\tau_1}{\tau_1 - \tau_2} \delta(\tau_1) - \frac{t}{\tau_2} \delta(\tau_2) \right] = \\
&= \frac{\tau_1}{\tau_2 - \tau_1} e^{-\frac{t}{\tau_1}} \left(1 - \frac{\tau_1}{\tau_2 - \tau_1} \right) \delta(\tau_1) - \frac{\tau_2}{\tau_2 - \tau_1} \frac{\tau_1}{\tau_2 - \tau_1} e^{-\frac{t}{\tau_1}} \delta(\tau_2) - \frac{t}{\tau_1} \frac{\tau_1}{\tau_2 - \tau_1} e^{-\frac{t}{\tau_1}} \delta(\tau_1) + \\
&+ \frac{\tau_2}{\tau_1 - \tau_2} e^{-\frac{t}{\tau_2}} \left(1 - \frac{\tau_2}{\tau_1 - \tau_2} \right) \delta(\tau_2) - \frac{\tau_2}{\tau_1 - \tau_2} e^{-\frac{t}{\tau_2}} \frac{\tau_1}{\tau_1 - \tau_2} \delta(\tau_1) - \frac{\tau_2}{\tau_1 - \tau_2} e^{-\frac{t}{\tau_2}} \frac{t}{\tau_2} \delta(\tau_2) = \\
&= \frac{\tau_1}{\tau_2 - \tau_1} e^{-\frac{t}{\tau_1}} \left(1 - \frac{\tau_1}{\tau_2 - \tau_1} \right) \delta(\tau_1) - \frac{t}{\tau_1} \frac{\tau_1}{\tau_2 - \tau_1} e^{-\frac{t}{\tau_1}} \delta(\tau_1) - \frac{\tau_2}{\tau_1 - \tau_2} e^{-\frac{t}{\tau_2}} \frac{\tau_1}{\tau_1 - \tau_2} \delta(\tau_1) + \\
&+ \frac{\tau_2}{\tau_1 - \tau_2} e^{-\frac{t}{\tau_2}} \left(1 - \frac{\tau_2}{\tau_1 - \tau_2} \right) \delta(\tau_2) - \frac{\tau_2}{\tau_1 - \tau_2} e^{-\frac{t}{\tau_2}} \frac{t}{\tau_2} \delta(\tau_2) - \frac{\tau_2}{\tau_2 - \tau_1} \frac{\tau_1}{\tau_2 - \tau_1} e^{-\frac{t}{\tau_1}} \delta(\tau_2) = \\
&= \left[\left(1 - \frac{\tau_1}{\tau_2 - \tau_1} \right) - \frac{t}{\tau_1} + \frac{\tau_2}{\tau_1 - \tau_2} \right] \frac{\tau_1}{\tau_2 - \tau_1} e^{-\frac{t}{\tau_1}} \delta(\tau_1) + \\
&+ \left[\left(1 - \frac{\tau_2}{\tau_1 - \tau_2} \right) - \frac{t}{\tau_2} + \frac{\tau_1}{\tau_2 - \tau_1} \right] \frac{\tau_2}{\tau_1 - \tau_2} e^{-\frac{t}{\tau_2}} \delta(\tau_2)
\end{aligned} \tag{2.32}$$

Розкривши коефіцієнти при $\delta(\tau_1)$ отримали наступний вираз:

$$\begin{aligned}
& \left[\left(1 - \frac{\tau_1}{\tau_2 - \tau_1} \right) - \frac{t}{\tau_1} + \frac{\tau_2}{\tau_1 - \tau_2} \right] \frac{\tau_1}{\tau_2 - \tau_1} e^{-\frac{t}{\tau_1}} \delta(\tau_1) = \\
& = \left[1 - \frac{t}{\tau_1} + \frac{\tau_1 + \tau_2}{\tau_1 - \tau_2} \right] \frac{\tau_1}{\tau_2 - \tau_1} e^{-\frac{t}{\tau_1}} \delta(\tau_1) = \\
& = \left[\frac{\tau_1(\tau_1 - \tau_2) - t(\tau_1 - \tau_2) + \tau_1(\tau_1 + \tau_2)}{\tau_1(\tau_1 - \tau_2)} \right] \frac{\tau_1}{\tau_2 - \tau_1} e^{-\frac{t}{\tau_1}} \delta(\tau_1) = \\
& = \left[\frac{\tau_1[(\tau_1 - \tau_2) + (\tau_1 + \tau_2)] - t(\tau_1 - \tau_2)}{\tau_1(\tau_1 - \tau_2)} \right] \frac{\tau_1}{\tau_2 - \tau_1} e^{-\frac{t}{\tau_1}} \delta(\tau_1) = \\
& = \left[\frac{\tau_1[\tau_1 - \tau_2 + \tau_1 + \tau_2] - t(\tau_1 - \tau_2)}{\tau_1(\tau_1 - \tau_2)} \right] \frac{\tau_1}{\tau_2 - \tau_1} e^{-\frac{t}{\tau_1}} \delta(\tau_1) = \\
& = \left[\frac{2\tau_1^2 - t(\tau_1 - \tau_2)}{\tau_1(\tau_1 - \tau_2)} \right] \frac{\tau_1}{\tau_2 - \tau_1} e^{-\frac{t}{\tau_1}} \delta(\tau_1) = \left[\frac{2\tau_1^2 - t(\tau_1 - \tau_2)}{(\tau_1 - \tau_2)} \right] \frac{-1}{\tau_1 - \tau_2} e^{-\frac{t}{\tau_1}} \delta(\tau_1) = \\
& = \frac{t(\tau_1 - \tau_2) - 2\tau_1^2}{(\tau_1 - \tau_2)^2} e^{-\frac{t}{\tau_1}} \delta(\tau_1)
\end{aligned}$$

Розкривши коефіцієнти при $\delta(\tau_2)$ отримали наступний вираз:

$$\begin{aligned}
& \left[\left(1 - \frac{\tau_2}{\tau_1 - \tau_2} \right) - \frac{t}{\tau_2} + \frac{\tau_1}{\tau_2 - \tau_1} \right] \frac{\tau_2}{\tau_1 - \tau_2} e^{-\frac{t}{\tau_2}} \delta(\tau_2) = \\
& = \left[1 - \frac{t}{\tau_2} - \frac{\tau_1 + \tau_2}{\tau_1 - \tau_2} \right] \frac{\tau_2}{\tau_1 - \tau_2} e^{-\frac{t}{\tau_2}} \delta(\tau_2) = \\
& = \left[\frac{\tau_2(\tau_1 - \tau_2) - t(\tau_1 - \tau_2) - \tau_2(\tau_1 + \tau_2)}{\tau_2(\tau_1 - \tau_2)} \right] \frac{\tau_2}{\tau_1 - \tau_2} e^{-\frac{t}{\tau_2}} \delta(\tau_2) = \\
& = \left[\frac{\tau_2[(\tau_1 - \tau_2) - (\tau_1 + \tau_2)] - t(\tau_1 - \tau_2)}{\tau_2(\tau_1 - \tau_2)} \right] \frac{\tau_2}{\tau_1 - \tau_2} e^{-\frac{t}{\tau_2}} \delta(\tau_2) = \\
& = \left[\frac{\tau_2[\tau_1 - \tau_2 - \tau_1 - \tau_2] - t(\tau_1 - \tau_2)}{\tau_2(\tau_1 - \tau_2)} \right] \frac{\tau_2}{\tau_1 - \tau_2} e^{-\frac{t}{\tau_2}} \delta(\tau_2) = \\
& = \left[\frac{-2\tau_2^2 - t(\tau_1 - \tau_2)}{\tau_2(\tau_1 - \tau_2)} \right] \frac{\tau_2}{\tau_1 - \tau_2} e^{-\frac{t}{\tau_2}} \delta(\tau_2) = \frac{-2\tau_2^2 - t(\tau_1 - \tau_2)}{(\tau_1 - \tau_2)^2} e^{-\frac{t}{\tau_2}} \delta(\tau_2).
\end{aligned}$$

Остаточно, розраховано відносну похибку значень розширеної моделі перехідної характеристики у залежності від відносних похибок вимірювання часу та визначення сталих часу (2.33):

$$\delta(A) = \frac{1}{1 + \frac{\tau_1}{\tau_2 - \tau_1} e^{-\frac{t}{\tau_1}} + \frac{\tau_2}{\tau_1 - \tau_2} e^{-\frac{t}{\tau_2}}} * \left[\left(\frac{t}{\tau_2 - \tau_1} e^{-\frac{t}{\tau_1}} + \frac{t}{\tau_1 - \tau_2} e^{-\frac{t}{\tau_2}} \right) \delta(t) + \frac{t(\tau_1 - \tau_2) - 2\tau_1^2}{(\tau_1 - \tau_2)^2} e^{-\frac{t}{\tau_1}} \delta(\tau_1) - \frac{2\tau_2^2 + t(\tau_1 - \tau_2)}{(\tau_1 - \tau_2)^2} e^{-\frac{t}{\tau_2}} \delta(\tau_2) \right]. \quad (2.33)$$

Замінивши коефіцієнти впливу при похибках отримали результуючий вираз рівняння похибки (2.34).

$$B = \frac{1}{1 + \frac{\tau_1}{\tau_2 - \tau_1} e^{-\frac{t}{\tau_1}} + \frac{\tau_2}{\tau_1 - \tau_2} e^{-\frac{t}{\tau_2}}},$$

$$C = \frac{t}{\tau_2 - \tau_1} e^{-\frac{t}{\tau_1}} + \frac{t}{\tau_1 - \tau_2} e^{-\frac{t}{\tau_2}},$$

$$D = \frac{t(\tau_1 - \tau_2) - 2\tau_1^2}{(\tau_1 - \tau_2)^2} e^{-\frac{t}{\tau_1}},$$

$$E = \frac{2\tau_2^2 + t(\tau_1 - \tau_2)}{(\tau_1 - \tau_2)^2} e^{-\frac{t}{\tau_2}},$$

$$\delta(A) = B[C\delta(t) + D\delta(\tau_1) - E\delta(\tau_2)]. \quad (2.34)$$

Що стосується ідентифікації динамічних характеристик термопар, потрібно знати вплив похибок вимірювання часу та термо-ЕРС термопар на похибки визначення сталих часу.

Визначимо вплив похибок термо-ЕРС термопар на похибки визначення сталих часу.

$$\frac{1}{B}\delta(A) = C\delta(t) + D\delta(\tau_1) - E\delta(\tau_2). \quad (2.35)$$

Прийmemo, що вплив похибки вимірювання часу на похибку термо-ЕРС незначна і дорівнює нулю. В цьому разі рівняння (2.35) матиме вигляд:

$$\frac{1}{B} \delta(A) = D\delta(\tau_1) - E\delta(\tau_2). \quad (2.36)$$

Для визначення похибок сталих часу складемо систему рівнянь

$$\begin{cases} \frac{1}{B_1} \delta(A_1) = D_1\delta(\tau_1) - E_1\delta(\tau_2) \\ \frac{1}{B_2} \delta(A_2) = D_2\delta(\tau_1) - E_2\delta(\tau_2) \end{cases}.$$

Перетворивши рівняння отримали:

$$\frac{1}{B_1} \delta(A_1) = D_1\delta(\tau_1) - E_1\delta(\tau_2),$$

$$E_1\delta(\tau_2) = D_1\delta(\tau_1) - \frac{1}{B_1} \delta(A_1) = D_1\delta(\tau_1) - \frac{1}{B_1} \delta(A_1),$$

$$\delta(\tau_2) = \frac{D_1}{E_1} \delta(\tau_1) - \frac{1}{E_1 B_1} \delta(A_1).$$

$$\frac{1}{B_2} \delta(A_2) = D_2\delta(\tau_1) - E_2\delta(\tau_2),$$

$$D_2\delta(\tau_1) = \frac{1}{B_2} \delta(A_2) + E_2\delta(\tau_2) = E_2\delta(\tau_2) + \frac{1}{B_2} \delta(A_2),$$

$$\delta(\tau_1) = \frac{E_2}{D_2} \delta(\tau_2) + \frac{1}{D_2 B_2} \delta(A_2).$$

Похибка другої сталої часу:

$$\delta(\tau_2) = \frac{D_1}{E_1} \left[\frac{E_2}{D_2} \delta(\tau_2) + \frac{1}{D_2 B_2} \delta(A_2) \right] - \frac{1}{E_1 B_1} \delta(A_1) =$$

$$= \frac{D_1 E_2}{D_2 E_1} \delta(\tau_2) + \frac{D_1}{E_1 D_2 B_2} \delta(A_2) - \frac{1}{E_1 B_1} \delta(A_1) =$$

$$= \frac{D_1 E_2}{D_2 E_1} \delta(\tau_2) + \left[\frac{D_1}{E_1 D_2 B_2} - \frac{1}{E_1 B_1} \right] \delta(A_1) =$$

$$= \frac{D_1 E_2}{D_2 E_1} \delta(\tau_2) + \frac{D_1 B_1 - D_2 B_2}{E_1 B_1 D_2 B_2} \delta(A_1)$$

$$\delta(\tau_2) - \frac{D_1 E_2}{D_2 E_1} \delta(\tau_2) = \frac{D_1 B_1 - D_2 B_2}{E_1 B_1 D_2 B_2} \delta(A_1),$$

$$\left[1 - \frac{D_1 E_2}{D_2 E_1} \right] \delta(\tau_2) = \frac{D_1 B_1 - D_2 B_2}{E_1 B_1 D_2 B_2} \delta(A_1),$$

$$\frac{D_2 E_1 - D_1 E_2}{D_2 E_1} \delta(\tau_2) = \frac{D_1 B_1 - D_2 B_2}{E_1 B_1 D_2 B_2} \delta(A_1),$$

$$\delta(\tau_2) = \frac{D_1 B_1 - D_2 B_2}{B_1 B_2 (D_2 E_1 - D_1 E_2)} \delta(A_1),$$

Похибка першої сталої часу:

$$\delta(\tau_1) = \frac{E_2 (D_1 B_1 - D_2 B_2)}{D_2 B_1 B_2 (D_2 E_1 - D_1 E_2)} \delta(A_1) + \frac{1}{D_2 B_2} \delta(A_2).$$

Скориставшись рівнянням (2.34), та знехтувавши похибкою вимірювання часу та взявши дві точки на перехідній характеристиці отримано залежність похибок визначення сталих часу від похибок вимірювань термо-ЕРС термопар (2.37).

$$\begin{cases} \delta(\tau_1) = \frac{E_2 (D_1 B_1 - D_2 B_2)}{D_2 B_1 B_2 (D_2 E_1 - D_1 E_2)} \delta(A_1) + \frac{1}{D_2 B_2} \delta(A_2) \\ \delta(\tau_2) = \frac{D_1 B_1 - D_2 B_2}{B_1 B_2 (D_2 E_1 - D_1 E_2)} \delta(A_1) \end{cases} \quad (2.37)$$

Також були отримані рівняння похибок моделі АЧХ термопар (2.38) шляхом застосування алгебраїчного методу. Рівняння АЧХ термопар:

$$K(\omega, \tau_1, \tau_2) = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega \tau_1)^2} \sqrt{1 + (\omega \tau_2)^2}}. \quad (2.38)$$

Знайдемо похибку АЧХ:

$$\delta(K) = f(\delta(\omega), \delta(\tau_1), \delta(\tau_2)).$$

Використавши алгебраїчний метод [18] отримали наступний вираз:

$$\begin{aligned} \delta(K) &= \delta \left[\frac{1}{\sqrt{1 + (\omega \tau_1)^2} \sqrt{1 + (\omega \tau_2)^2}} \right] = \\ &= \delta(1) - \delta \left[\sqrt{1 + (\omega \tau_1)^2} \sqrt{1 + (\omega \tau_2)^2} \right] = \\ &= 0 - \delta \left[\sqrt{1 + (\omega \tau_1)^2} \right] - \delta \left[\sqrt{1 + (\omega \tau_2)^2} \right] = \\ &= -\frac{1}{2} \delta \left[1 + (\omega \tau_1)^2 \right] - \frac{1}{2} \delta \left[1 + (\omega \tau_2)^2 \right] \end{aligned}$$

Розписавши першу складову похибку отримаємо вираз:

$$\begin{aligned}
\delta[1 + (\omega\tau_1)^2] &= \frac{1}{1 + (\omega\tau_1)^2} [1\delta(1) + (\omega\tau_1)^2 \delta((\omega\tau_1)^2)] = \\
&= \frac{1}{1 + (\omega\tau_1)^2} [(\omega\tau_1)^2 \delta((\omega\tau_1)^2)] = \frac{(\omega\tau_1)^2}{1 + (\omega\tau_1)^2} 2\delta(\omega\tau_1) = . \\
&= \frac{2(\omega\tau_1)^2}{1 + (\omega\tau_1)^2} [\delta(\omega) + \delta(\tau_1)]
\end{aligned}$$

Друга складова похибки знаходиться аналогічно.

$$\begin{aligned}
\delta(K) &= -\frac{1}{2} \frac{2(\omega\tau_1)^2}{1 + (\omega\tau_1)^2} [\delta(\omega) + \delta(\tau_1)] - \frac{1}{2} \frac{2(\omega\tau_2)^2}{1 + (\omega\tau_2)^2} [\delta(\omega) + \delta(\tau_2)] = \\
&= -\frac{(\omega\tau_1)^2}{1 + (\omega\tau_1)^2} \delta(\omega) - \frac{(\omega\tau_1)^2}{1 + (\omega\tau_1)^2} \delta(\tau_1) - \frac{(\omega\tau_2)^2}{1 + (\omega\tau_2)^2} \delta(\omega) - \frac{(\omega\tau_2)^2}{1 + (\omega\tau_2)^2} \delta(\tau_2) = . \\
&= -\left[\frac{(\omega\tau_1)^2}{1 + (\omega\tau_1)^2} + \frac{(\omega\tau_2)^2}{1 + (\omega\tau_2)^2} \right] \delta(\omega) - \frac{(\omega\tau_1)^2}{1 + (\omega\tau_1)^2} \delta(\tau_1) - \frac{(\omega\tau_2)^2}{1 + (\omega\tau_2)^2} \delta(\tau_2)
\end{aligned}$$

Розкладемо похибку у дужках:

$$\begin{aligned}
\frac{(\omega\tau_1)^2}{1 + (\omega\tau_1)^2} + \frac{(\omega\tau_2)^2}{1 + (\omega\tau_2)^2} &= \frac{(\omega\tau_1)^2 [1 + (\omega\tau_2)^2] + (\omega\tau_2)^2 [1 + (\omega\tau_1)^2]}{1 + (\omega\tau_1)^2} = \\
&= \frac{(\omega\tau_1)^2 + (\omega\tau_1)^2 (\omega\tau_2)^2 + (\omega\tau_2)^2 + (\omega\tau_2)^2 (\omega\tau_1)^2}{1 + (\omega\tau_1)^2} = \\
&= \frac{(\omega\tau_1)^2 + \omega^4 (\tau_1 \tau_2)^2 + (\omega\tau_2)^2 + \omega^4 (\tau_1 \tau_2)^2}{1 + (\omega\tau_1)^2} = \\
&= \frac{\omega^2 [\tau_1^2 + 2\omega^2 (\tau_1 \tau_2)^2 + \tau_2^2]}{1 + (\omega\tau_1)^2}
\end{aligned}$$

Рівняння похибок моделі АЧХ термопар (2.39):

$$\delta(K) = -\frac{\omega^2 [\tau_1^2 + 2\omega^2 (\tau_1 \tau_2)^2 + \tau_2^2]}{1 + (\omega\tau_1)^2} \delta(\omega) - \frac{(\omega\tau_1)^2}{1 + (\omega\tau_1)^2} \delta(\tau_1) - \frac{(\omega\tau_2)^2}{1 + (\omega\tau_2)^2} \delta(\tau_2). \quad (2.39)$$

Замінивши коефіцієнти впливу при похибках отримали результуючий вираз рівняння похибки (2.40).

$$B = -\frac{\omega^2 [\tau_1^2 + 2\omega^2 (\tau_1 \tau_2)^2 + \tau_2^2]}{1 + (\omega\tau_1)^2}.$$

$$C = -\frac{(\omega\tau_1)^2}{1 + (\omega\tau_1)^2}.$$

$$D = -\frac{(\omega\tau_2)^2}{1 + (\omega\tau_2)^2}.$$

$$\delta(K) = B\delta(\omega) + C\delta(\tau_1) + D\delta(\tau_2). \quad (2.40)$$

Знехтувавши похибкою вимірювання частоти:

$$\delta(K) = C\delta(\tau_1) + D\delta(\tau_2),$$

та взявши дві точки на АЧХ отримано:

$$\begin{cases} \delta(K_1) = C_1\delta(\tau_1) + D_1\delta(\tau_2) \\ \delta(K_2) = C_2\delta(\tau_1) + D_1\delta(\tau_2) \end{cases}.$$

Перетворивши перше рівняння отримали:

$$C_1\delta(\tau_1) = \delta(K_1) - D_1\delta(\tau_2),$$

$$\delta(\tau_1) = \frac{1}{C_1}\delta(K_1) - \frac{D_1}{C_1}\delta(\tau_2).$$

Перетворивши друге рівняння отримали:

$$D_1\delta(\tau_2) = \delta(K_2) - C_2\delta(\tau_1),$$

$$\delta(\tau_2) = \frac{1}{D_1}\delta(K_2) - \frac{C_2}{D_1}\delta(\tau_1).$$

Розкриємо коефіцієнти при похибках для визначення $\delta(\tau_2)$:

$$\delta(\tau_2) = \frac{1}{D_1}\delta(K_2) - \frac{C_2}{D_1}\left[\frac{1}{C_1}\delta(K_1) - \frac{D_1}{C_1}\delta(\tau_2)\right].$$

$$\delta(\tau_2) - \frac{D_1}{C_1}\delta(\tau_2) = \frac{1}{D_1}\delta(K_2) - \frac{C_2}{C_1D_1}\delta(K_1).$$

$$\left[1 - \frac{D_1}{C_1}\right]\delta(\tau_2) = \frac{1}{D_1}\delta(K_2) - \frac{C_2}{C_1D_1}\delta(K_1).$$

$$\frac{C_1 - D_1}{C_1}\delta(\tau_2) = \frac{1}{D_1}\left[\delta(K_2) - \frac{C_2}{C_1}\delta(K_1)\right].$$

$$\delta(\tau_2) = \frac{C_1}{D_1(C_1 - D_1)}\left[\delta(K_2) - \frac{C_2}{C_1}\delta(K_1)\right].$$

Розкриємо коефіцієнти при похибках для визначення $\delta(\tau_1)$:

$$\begin{aligned}
\delta(\tau_1) &= \frac{1}{C_1} \delta(K_1) - \frac{D_1}{C_1} \left[\frac{C_1}{D_1(C_1 - D_1)} \left[\delta(K_2) - \frac{C_2}{C_1} \delta(K_1) \right] \right] = \\
&= \frac{1}{C_1} \delta(K_1) - \frac{1}{C_1 - D_1} \left[\delta(K_2) - \frac{C_2}{C_1} \delta(K_1) \right] = \\
&= \frac{1}{C_1} \delta(K_1) - \frac{1}{C_1 - D_1} \delta(K_2) + \frac{C_2}{C_1(C_1 - D_1)} \delta(K_1) = \\
&= \left[\frac{1}{C_1} + \frac{C_2}{C_1(C_1 - D_1)} \right] \delta(K_1) - \frac{1}{C_1 - D_1} \delta(K_2) = \\
&= \frac{C_1 + C_2 - D_1}{C_1(C_1 - D_1)} \delta(K_1) - \frac{1}{C_1 - D_1} \delta(K_2) = \\
&= \frac{1}{C_1 - D_1} \left[\frac{C_1 + C_2 - D_1}{C_1} \delta(K_1) - \delta(K_2) \right]
\end{aligned}$$

У результаті похибка першої сталої часу:

$$\delta(\tau_1) = \frac{1}{C_1 - D_1} \left[\frac{C_1 + C_2 - D_1}{C_1} \delta(K_1) - \delta(K_2) \right].$$

Знехтувавши похибкою вимірювання частоти та взявши дві точки на АЧХ отримано залежність похибок визначення сталих часу від похибок вимірювань АЧХ термопари (2.41).

$$\begin{cases} \delta(\tau_1) = \frac{1}{C_1 - D_1} \left[\frac{C_1 + C_2 - D_1}{C_1} \delta(K_1) - \delta(K_2) \right] \\ \delta(\tau_2) = \frac{C_1}{D_1(C_1 - D_1)} \left[\delta(K_2) - \frac{C_2}{C_1} \delta(K_1) \right] \end{cases} \quad (2.41)$$

Висновки до розділу 2

Виконано дослідження статистичних властивостей та застосування $ЛП\tau$ рівномірно розподілених послідовностей при плануванні багатofакторних експериментів для отримання регресійних моделей за критеріями, що дозволяють вибрати структуру математичної моделі. А саме, щоб головні ефекти і ефекти взаємодій повинні бути ортогональні або слабо корельовані.

Досліджено динамічні моделі термопари та отримано аналітичні моделі реакції термопари на вхідний сигнал довільної форми.

Отримано моделі перехідної характеристики термопари для кількості сталих часу від 3 до 6, що дозволило значно скоротити простір пошуку оптимальних значень сталих часу та підвищити точність їх визначення.

Досліджено методи ідентифікації термопар та встановлено, що найбільш придатною є ідентифікація високочастотним сигналом для отримання перехідної характеристики, або сигналом інфранизької частоти для отримання АФЧХ термопари.

Отримано аналітичні вирази детермінованої похибки математичних моделей перехідної та амплітудно-частотної характеристик термопар. Розраховано відносну похибку значень моделі перехідної характеристики термопари у залежності від відносних похибок вимірювання часу та визначення сталих часу, а також залежність похибок визначення сталих часу від похибок вимірювань термо-ЕРС термопари. Також, отримано залежність відносної похибки моделі АЧХ термопари від відносних похибок вимірювання частоти та визначення сталих часу, а також залежність похибок визначення сталих часу від похибок вимірювань АЧХ термопари.

РОЗДІЛ 3.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОПАР

3.1. Дослідження динамічних характеристик існуючих термопар

В першому розділі було встановлено, що для вимірювання температури коротких високо температурних теплових імпульсів буде використана термопара. Термопара — це термоелектричний перетворювач який складається із двох різнорідних провідників з'єднаних з одного боку і роз'єднаних з іншого. Термопари можна розділити на дві категорії в залежності від конструкції: термопари без захисного чохла (рис. 3.1) та термопари із захисним чохлам (рис. 3.2).

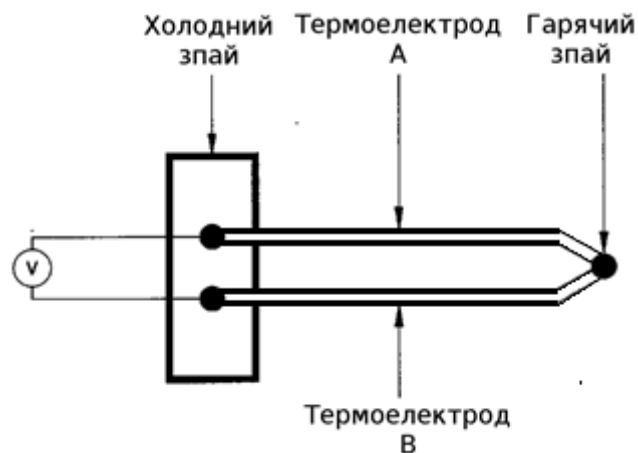


Рисунок 3.1 – Схема термопари без захисного чохла.

З'єднані кінці утворюють вимірювальний (гарячий) спай, який є чутливим елементом термопари. Не з'єднані кінці називаються спаєм порівняння або холодним спаєм. До них приєднуються подовжувальні провідники, які йдуть до вимірювального приладу. Якщо температура гарячого спаю перевищує температуру холодного, то на холодних кінцях термопари виникає напруга, яку називають термо-ЕРС. Величина термо-ЕРС залежить від властивостей термоелектродів та різниці температур між гарячим та холодним спаями. В лабораторних дослідженнях та при повірці холодний спай тримають за температури 0 С за допомогою льоду. В робочих

умовах холодний спай знаходиться за температури відмінної від нуля і потрібно використовувати додаткові засоби для компенсації температури холодного спаю.

Для захисту чутливого елемента термопары від корозії та руйнування в агресивному середовищі, а також від високих значень температури та тиску термопару розміщують в металевому корпусі — в захисному чохлах. Весь простір корпусу заповнюють ізоляційним матеріалом, наприклад MgO , який захищає термоелектроди термопары та виконує їх електричну ізоляцію. Корпус герметично запаковується для запобігання проникнення вологи в середину (рис. 3.2).

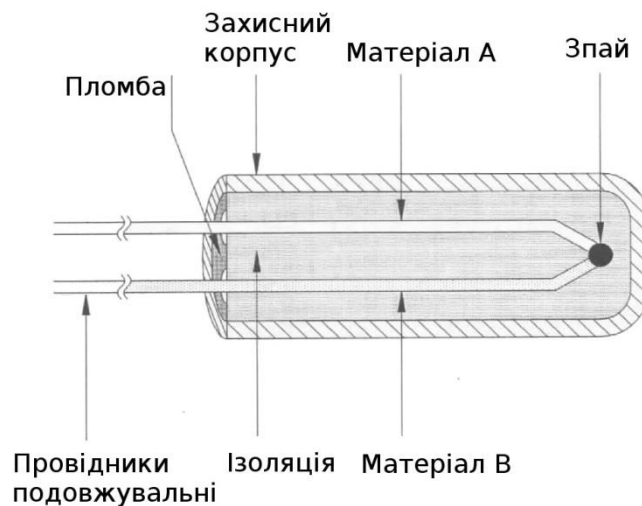


Рисунок 3.2 – Термопара із захисним чохлам.

Якщо матеріал ізолятора гігроскопічний, то при попаданні вологи в середину термопары він може втратити свої ізоляційні властивості. Це може призвести до корозії термоелектродів та збільшити шум в сигналі термо-ЕРС.

Для додаткового захисту термопар в особливо агресивних середовищах використовують ще один чохла, який вмонтований в робоче місце вимірювання температури (рис. 3.3). Крім захисту від агресивного середовища додатковий чохла дозволяє швидко змінити термопару. Недоліком додаткового чохла є значне збільшення часу реакції термопары. Тому додаткові чохла використовують в технологічних процесах які не вимагають швидкої реакції термопары.

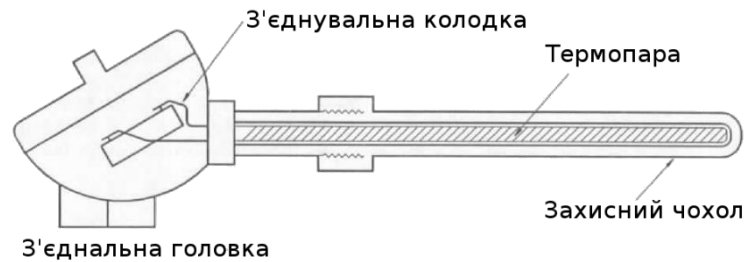


Рисунок 3.3 – Термопара в додатковому захисному чохлі.

Гарячий спай є робочим чутливим елементом термопар. Він використовується в якості вимірювального елементу і безпосередньо на нього діє температура об'єкту вимірювання. Інший спай, холодний, є опорним спаєм. Температура опорного спаю відома і підтримується на постійному рівні або значення опорного спаю контролюється за допомогою іншого термоперетворювача для компенсації температури холодного спаю. Для цього холодний спай намагаються тримати як подалі від гарячого, щоб отримати найбільшу різницю температур гарячого та холодного спаїв. Із зростанням температури гарячого спаю збільшується і термо-ЕРС на холодному спаї. Залежність термо-ЕРС від різниці температур є нелінійною. Для отримання більш точного значення температури об'єкту потрібно більш точно виміряти температуру холодного спаю. Для цього використовують ізотермічні клемні колодки із міді із вбудованим прецизійним термістором, термометром опору або напівпровідниковим термоперетворювачем. Виводи холодного спаю приєднують до колодки і за допомогою вбудованого термоперетворювача компенсують температуру холодного спаю.

Гарячий спай термопар створюють різними способами. Спай термопар повинен відповідати певним вимогам для того щоб отримати найкращі характеристики термопар. Так спай термопар повинен мати механічну міцність, створювати замкнутий контур для виникнення термо-ЕРС на холодному кінці, не мати сторонніх домішок крім матеріалів термоелектродів. Гарячий спай термопар без захисного чохла (рис. 3.4) можна отримати за рахунок скручування кінців проводів, але такий спай швидко втрачає свої властивості і тому не використовується.

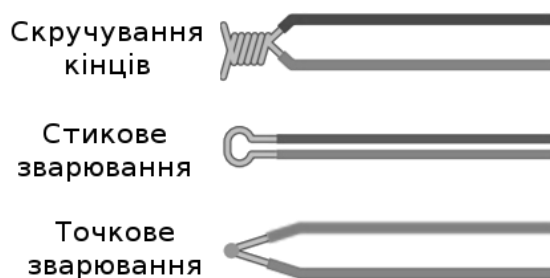


Рисунок 3.4 – Типи спаїв відкритих термопар.

Найпопулярнішими способами виготовлення спаїв є зварювання кінців термоелектродів. Використовують два види зварювання кінців (рис. 3.4): зварювання в стик та точкове зварювання.

Для термопар із захисним чохлам гарячий спай формується наступними методами (рис. 3.5):

- з відкритим спаєм;
- із закритим не заземленим спаєм;
- із закритим заземленим спаєм.

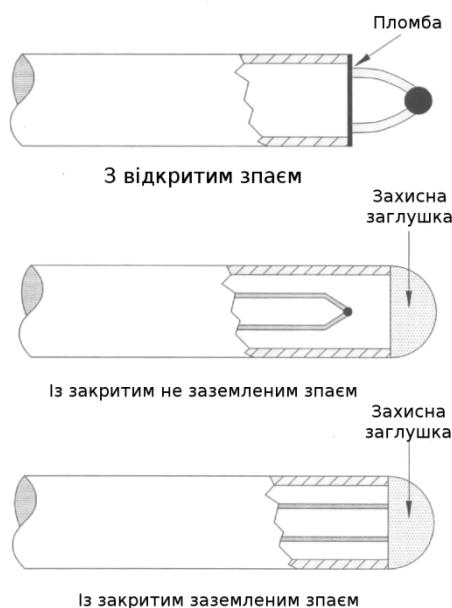


Рисунок 3.5 – Типи спаїв закритих термопар.

В термопарах із відкритим спаєм, останній виходить назовні захисного чохла і знаходяться в прямому контакті із середовищем. Сам спай формується скручуванням і зварюванням кінців термоелектродів. Іншим

варіантом формування спаю є використання зварювання тертям [28]. В цьому методі кінці термоелектродів шліфуються для формування спаю (рис. 3.6).

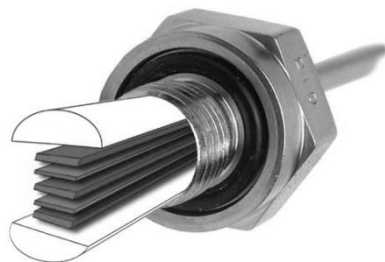


Рисунок 3.6 – Формування спаю термопар за рахунок зварювання тертям.

Звичайна термопарі із відкритим спаєм використовуються для вимірювання температури газів та твердих об'єктів. До переваг цього типу спаю можна віднести малу інерційність термопарі, внаслідок відсутності проміжних матеріалів між середовищем та спаєм, які збільшують масу спаю. Недоліком є прямий контакт спаю термопарі з середовищем, оскільки захисне та ізоляційне покриття відсутні, що може призвести до механічних або хімічних пошкоджень спаю. Ці термопарі не застосовуються напряму для вимірювання температури рідин або вологого середовища. Для застосування цього типу термопар, останні повинні бути захищені спеціальними покриттями для запобігання проникнення вологості в термопару. Також спай термопарі покривають спеціальними фарбами або епоксидними речовинами.

Термопарі із закритим спаєм складаються із захисного чохла та ізоляційного матеріалу в якому розміщені термоелектроди та спай термопарі (рис. 3.4). Формують спай термопарі наступним чином, металеву трубку, із термоелектродами та ізоляційним матеріалом всередині, відрізають потрібної довжини, зачищають частину металу та ізоляції, для вивільнення кінців, формують спай, вкривають ізоляційним матеріалом та заварюють металевий чохол для формування округлого кінця. Перевагами цих термопар є відсутність прямого контакту з середовищем, що забезпечує захист від механічних та хімічних пошкоджень та забезпечує ізоляцію від потрапляння

вологості в термопару. Термоелектроди термопари є не заземленими. Недоліками є значно більший час відгуку в порівнянні із термопарами із відкритим спаєм. Також важко виготовляти термопари малих діаметрів.

Термопара, закритих заземлених термопар, формується так як і закрита не заземлена термопара, але із однією особливістю, вивільнені кінці термоелектродів приварюють до кінцівки металевого чохла (рис. 3.5). Перевагами цих типів термопар є малий час відгуку, через збільшення площі контакту з середовищем, легкість виготовлення та захист чутливого елемента від механічних та хімічних пошкоджень. Недоліками є наявність електричних шумів. Також вони проявляють деяку нестабільність при роботі.

При виборі термопари для вимірювання коротких теплових імпульсів потрібно мати уяву про значення сталих часу цих термопар. В одних випадках виробники термопар дають наближене значення однієї сталої часу у вигляді таблиць або графіків залежності сталої часу від якогось параметру термопари. Так, наприклад, в [29] приведено графіки залежності сталої часу від діаметру дроту термоелектродів термопари або діаметру спаю термопари для відкритих термопар, або діаметру корпусу термопари для закритих термопар.

Відповідно до [29], стала часу термопари визначалась на повітрі за кімнатної температури та атмосферного тиску, за умов руху повітря 20 м/с для термопар а) та б) рис 3.7, тобто для відкритої термопари із стиковим зварюванням спаю та закритої термопари із заземленим спаєм. Графік залежності сталих часу від діаметру проводу або спаю представлено на рис. 3.8 для термопар типу а) та б) (рис. 3.7). Для отримання цього графіку були розпізнані графіки із сайту [29]. Після розпізнання графіків були отримані масиви точок для кожного діапазону значень характерного діаметру термопари.

На рис. 3.7 зображено найбільш розповсюджені форми чутливого елемента термопари [29], які виготовляються даною фірмою. Кожний з варіантів має характерний діаметр d . Так, для типу а) характерний діаметр

представляє діаметр проводу термопар. Для спаю виконаного за типом в) d — діаметр спаю. Для випадку б) та г) d є діаметром гільзи термопар, у випадку термопар типу б) гарячий спай напряму приєднаний до верхівки гільзи. Маса чутливого елемента в такому випадку збільшується за рахунок маси гільзи.

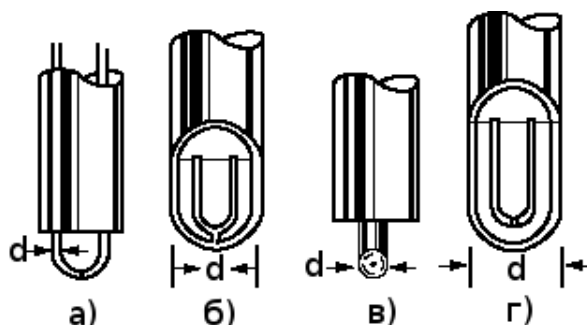


Рисунок 3.7 – Форми чутливих елементів термопар [29]. а) Відкритий, сформований стиковим зварюванням. б) Закритий, заземлений. в) Відкритий, сформований точковим зварюванням. г) Закритий, незаземлений.

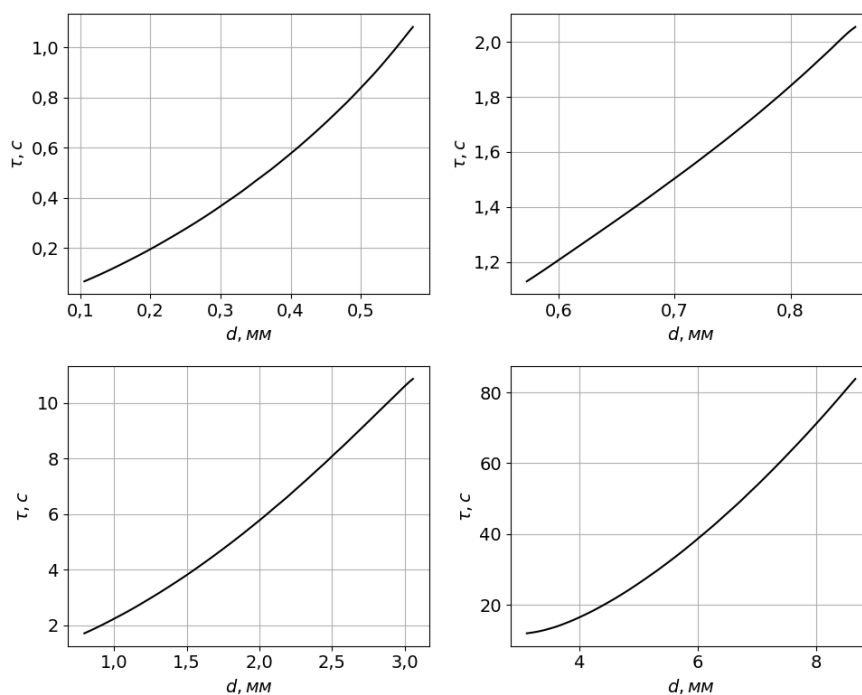


Рисунок 3.8 – Графік залежності сталої часу термопар на повітрі від характерного діаметру d (рис. 3.7), для чотирьох діапазонів [29].

Також в [29] вказано, що для термопар із відкритим спаєм типу а) (рис. 3.7) для найменшого діаметру дроту 25,4 мкм стала часу становить

0,003 с. Для термопар типу в) та г) (рис. 3.7) значення сталих часу повинні бути збільшені в 1,5 разів. Тобто, відповідно до [29] найменшу сталу часу мають термопари типу а) та б) (рис. 3.7), а найбільшу — термопари типу в) та г).

Проаналізував графік рис. 3.7 методом інтерполяції був отриманий загальний графік для всіх діапазонів діаметрів термопари (рис. 3.9).

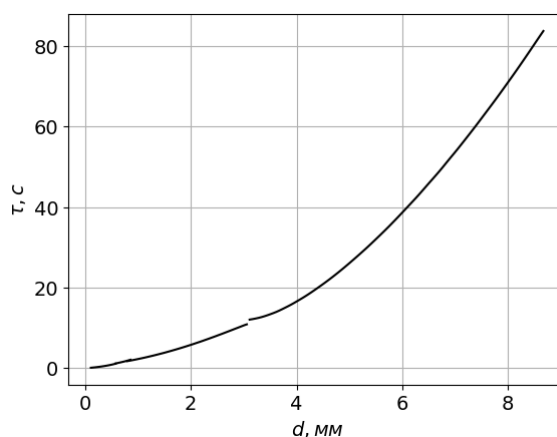


Рисунок 3.9 – Графік залежності сталої часу термопари на повітрі від характерного діаметру d [29].

Використовуючи метод апроксимації отримали модель залежності сталої часу від діаметру. Для цього використовувалась бібліотеки для числових розрахунків SciPy [30] та NumPy [31]. Метод найменших квадратів — це метод, який забезпечує мінімізацію деякої заданої квадратичної форми за фіксованої множини даних. Регресійний аналіз — це аналіз залежності середнього значення випадкової величини від однієї або декількох детермінованих змінних. Використаємо методи регресійного аналізу. Використаємо лінійну предикативну модель. В регресійному аналізі апроксимація проводиться методом найменших квадратів. Модель є лінійною якщо вона лінійна за параметрами. В якості моделі вибраний поліном не високого порядку. Як видно із графіку рис. 3.9 дана залежність є строго не лінійною. Тому використаємо поліном другого та третього порядків:

$$\tau_2(d) = a_0 + a_1d + a_2d^2$$

$$\tau_3(d) = a_0 + a_1d + a_2d^2 + a_3d^3$$

Із бібліотеки `scipy` використаємо функцію `least_squares`, яка вирішує задачу нелінійної оптимізації з обмеженнями, застосовуючи методу найменших квадратів. В загальному вигляді процедуру мінімізації даною функцією можна представити в наступному вигляді:

$$\min_x \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{n-1} p(f_i(a)^2),$$

$$a_{j_{\text{ниж}}} \leq a_j \leq a_{j_{\text{верх}}}, j = 0 \dots m - 1$$

де $f_i(a)$ - функції згладжування, які є відображенням $R^n \rightarrow R$ і називаються залишками; функція $p(\)$ зменшує вплив залишків, які занадто відхиляються від сусідніх значень підвищуючи стійкість алгоритму. Дану функцію називають функцією втрат. Також даний метод для знаходження мінімуму використовує матрицю $n \times m$ часткових похідних функції $f_i(a)$ від параметрів a_j , яку називають Якобіан:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_0}{\partial a_0} & \dots & \frac{\partial f_0}{\partial a_{m-1}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_{n-1}}{\partial a_0} & \dots & \frac{\partial f_{n-1}}{\partial a_{m-1}} \end{bmatrix}.$$

Якщо Якобіан не вказати явно, то він розраховується числовими методом кінцевих різниць, за замовчуванням. В цьому разі мінімізація може потребувати більше часу та призвести до великих значень похибок коефіцієнтів моделі. Для отримання більш точного результату потрібно вказувати Якобіан явно.

В нашому випадку, ми використаємо функцію `least_squares` для апроксимації експериментальних даних поліноміальними моделями. перепишемо $f_i(a)$ наступним чином:

$$f_i(a) = y_i - \hat{y}_i,$$

де y_i - значення спостереження; $\hat{y}_i(a)$ - значення моделі, яка є функцією параметрів a_j .

Розрахуємо Якобіани для рівнянь (3.1).

$$J_2 = \begin{bmatrix} 1 & d_0 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & d_{n-1} \end{bmatrix}$$

$$J_3 = \begin{bmatrix} 1 & d_0 & d_0^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & d_{n-1} & d_{n-1}^2 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

де J_2 - Якобіан поліному другого порядку; J_3 - Якобіан поліному третього порядку.

Для проведення апроксимації залежності сталої часу термопари від її діаметру використовувалась мова Python. Моделювання та отримання числових розрахунків проводилось у інтерактивному середовищі для наукових розрахунків Jupyter Notebook [32]. Особливістю цього середовища є можливість інтерактивного виконання коду прямо в браузері і одночасного отримання результату. Документ в якому виконуються розрахунки дозволяє отримувати та відображати будь-які графічні дані та зберігати їх в цьому документі (рис. 3.10). Дане середовище використовує Ipython - інтерактивний інтерпретатор мови Python [33]. Графіки отримувались за допомогою бібліотеки побудови 2D графіків, яку використовують для створення професійної якості рисунків [34].

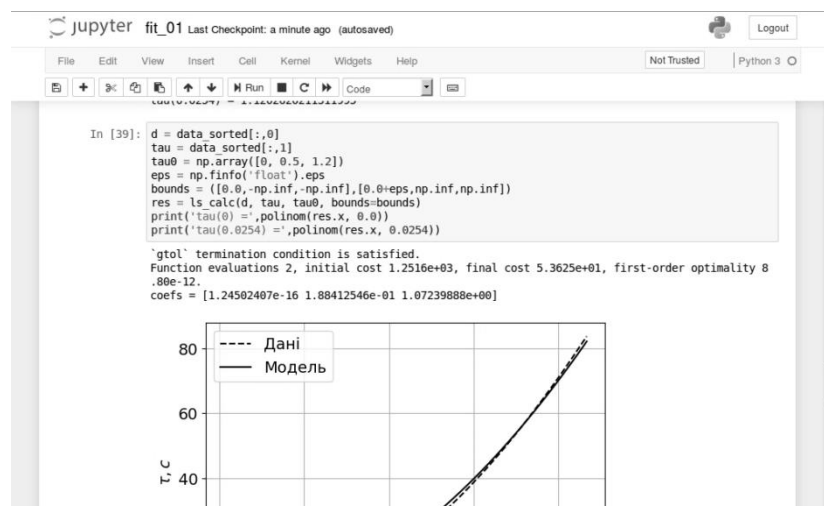


Рисунок 3.10 – Середовище наукових розрахунків Jupyter Notebook.

Апроксимацію поліномами другої та третьої ступенів проведено наступним чином. Для апроксимації потрібно задати початкові значення

параметрів поліномів. Ці значення будуть нульовими у вигляді вектору довжина якого визначатиме ступінь полінома. Залежність $\tau = f(d)$ в [29] задана для чотирьох діапазонів значень діаметрів термопар і деякі діапазони перетинаються. Тому дані діапазонів були відсортовані за значеннями діаметру термопари.

Спочатку проводиться апроксимація без обмежень на параметри поліному. Якщо отримані значення коефіцієнтів поліному не влаштують за певними показниками, то проводиться апроксимація із обмеженнями на параметри поліному. І так для кожного ступеня поліному. Відповідно отримаємо по дві моделі для кожного ступеня поліному. Загалом отримаємо чотири моделі.

Критеріями для застосування обмежень на значення параметрів поліному наступні:

1. із умови $d = 0 \rightarrow \tau = 0$;
2. в [29] було вказано, що за діаметра дроту термопари 0,0254 мкм стала часу становить 0,003 с, тому перевіримо значення функції $\tau = f(d)$ в точці $d = 0,0254$. Умови накладались тільки на перший параметр поліному, а саме $a_0 = 0$.

Особливістю випадку із обмеженнями на параметри поліному є те, що потрібно щоб мінімальне та максимальне значення параметру відрізнялись. А оскільки значення першого параметру повинно дорівнювати нулю, то верхня межа дорівнювала $0.0+eps$, де eps — машинний нуль, або роздільна здатність для даного типу даних (в нашому випадку *float*). Оскільки, якщо обмеження задаються, то вони задаються на всі параметри, на параметри на які не має обмежень задавалась константа *np.inf* на максимум та *-np.inf* на мінімум, які означають відповідну нескінченність.

Лістинг апроксимації для поліному третього порядку відрізняється тільки розміром вектору початкових значень параметрів та обмежень.

Отримано наступні результати (рис. 3.11 — 3.14).

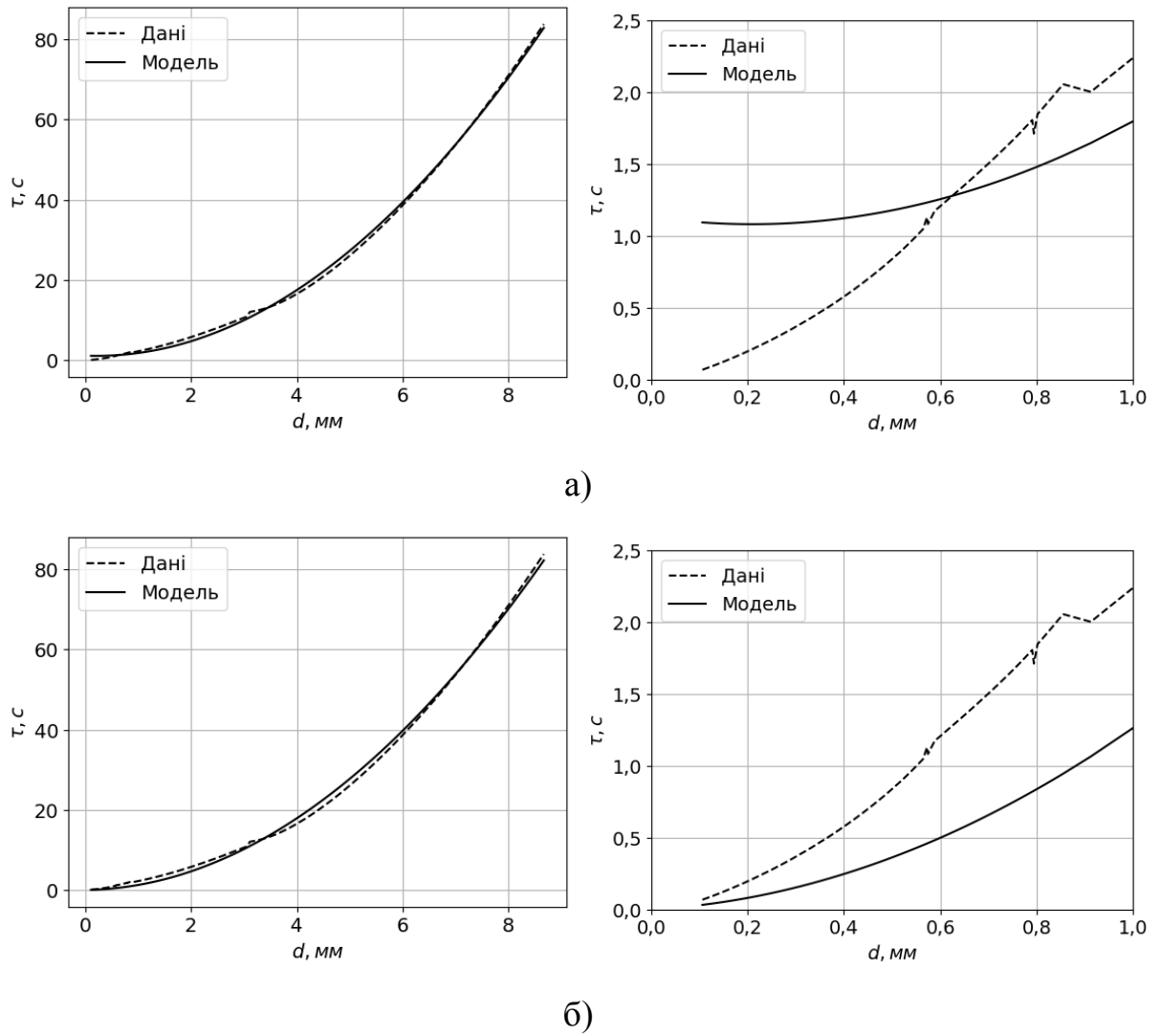


Рисунок 3.11 – Графік апроксимації залежності сталої часу термопары на повітрі від характерного діаметру d поліномом другої степені. На лівих графіках зображений весь діапазон значень. На правих — виділено початкову ділянку. а) Для поліному без обмежень на параметри. б) Для поліному із обмеженнями на параметри.

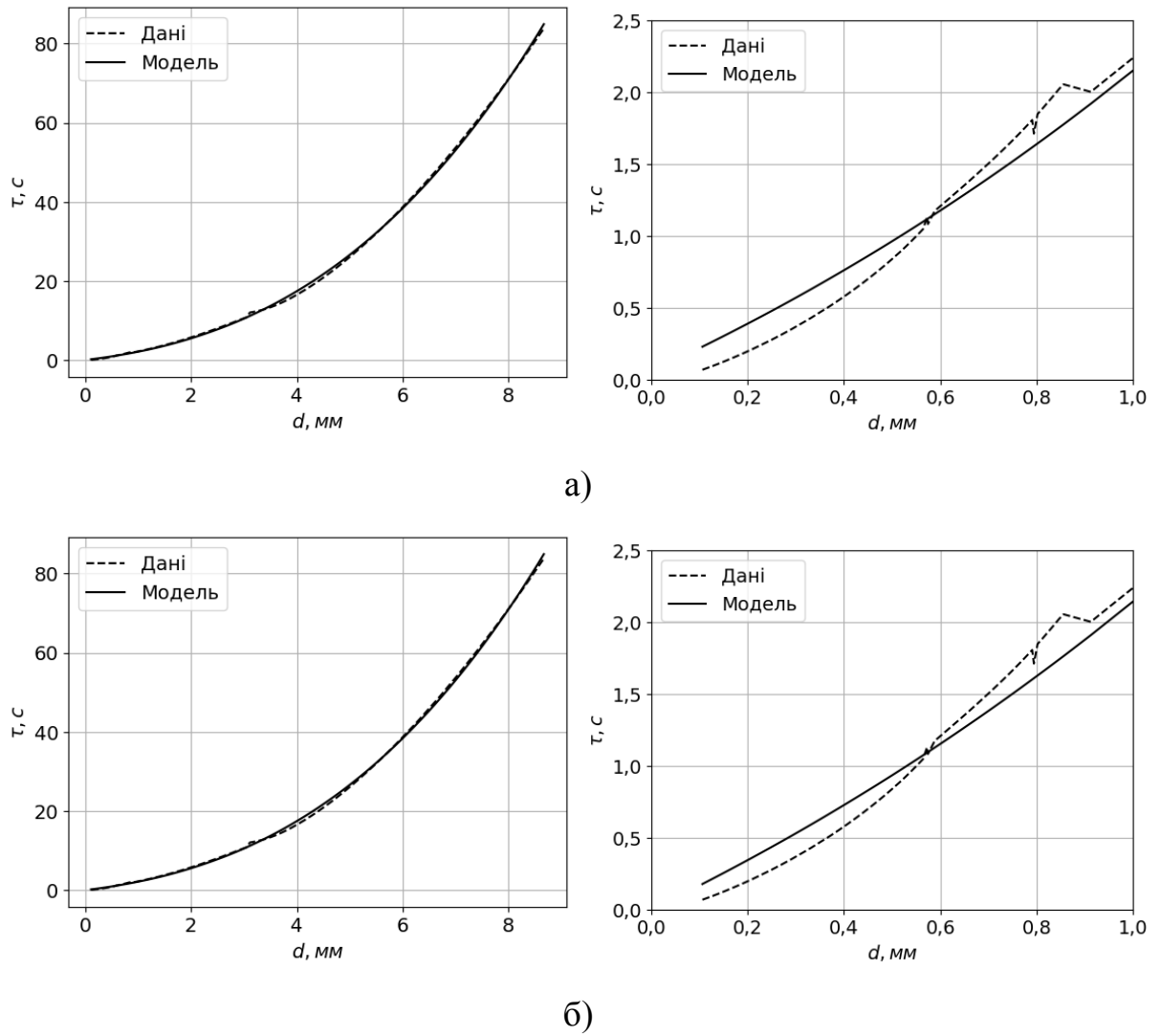


Рисунок 3.12 – Графік апроксимації залежності сталої часу термопары на повітрі від характерного діаметру d поліномом третьої степені. На лівих графіках зображений весь діапазон значень. На правих — виділено початкову ділянку. а) Для поліному без обмежень на параметри. б) Для поліному із обмеженнями на параметри.

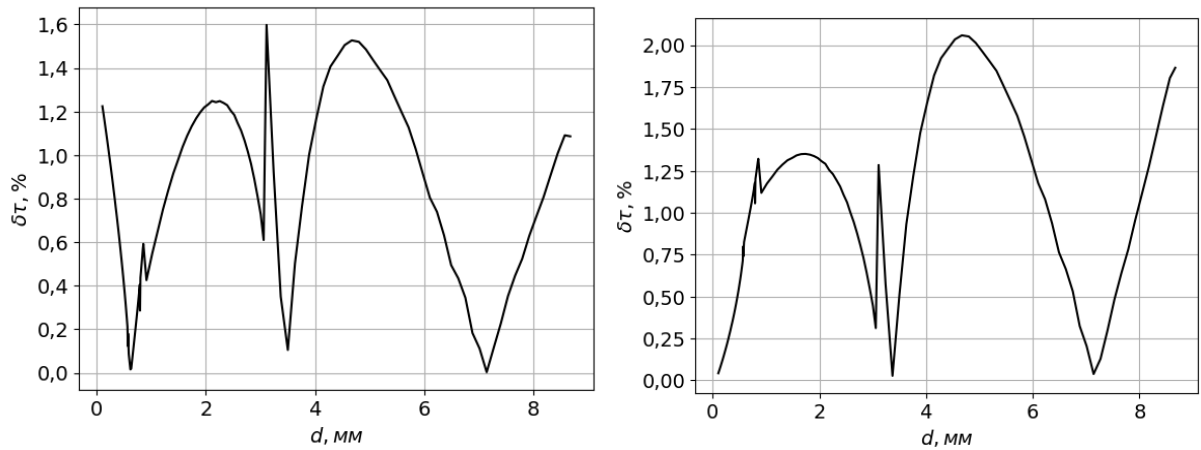


Рисунок 3.13 – Графік приведеної похибки апроксимації залежності сталої часу термопар на повітрі від характерного діаметру d для поліному другого ступеня. Лівий графік для поліному без обмежень на параметри. Правий графік для поліному із обмеженнями на параметри.

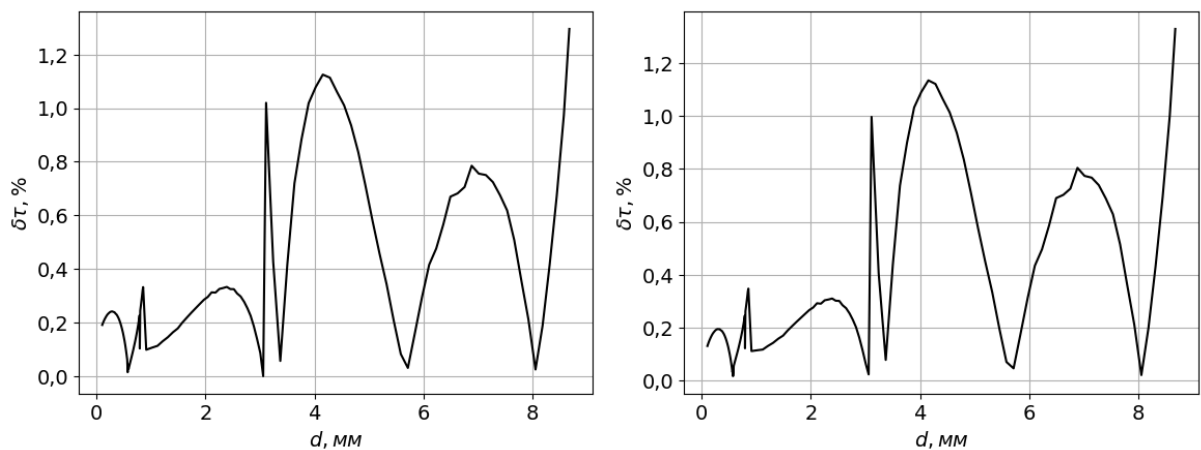


Рисунок 3.14 – Графік приведеної похибки апроксимації залежності сталої часу термопар на повітрі від характерного діаметру d для поліному третього ступеня. Лівий графік для поліному без обмежень на параметри. Правий графік для поліному із обмеженнями на параметри.

Поліном другого степеня без обмежень на параметри:

$$\tau(d) = 1.13 - 0.48d + 1.14d^2.$$

$$\tau(0.0) = 1.13 \text{ с.} \quad (3.2)$$

$$\tau(0.0254) = 1.12 \text{ с.}$$

Поліном другого степеня із обмеженнями на параметри:

$$\begin{aligned}\tau(d) &= 0.19d + 1.07d^2. \\ \tau(0) &= 0.0 \text{ с.} \\ \tau(0.0254) &= 0.0055 \text{ с.}\end{aligned}\tag{3.3}$$

Поліном третього степеня без обмежень на параметри:

$$\begin{aligned}\tau(d) &= 0.06 + 1.55d + 0.48d^2 + 0.05d^3. \\ \tau(0) &= 0.06 \text{ с.} \\ \tau(0.0254) &= 0.0979 \text{ с.}\end{aligned}\tag{3.4}$$

Поліном третього степеня із обмеженнями на параметри:

$$\begin{aligned}\tau(d) &= 1.62d + 0.46d^2 + 0.055d^3. \\ \tau(0) &= 0.0 \text{ с.} \\ \tau(0.0254) &= 0.0415 \text{ с.}\end{aligned}\tag{3.5}$$

Як видно, із візуальної оцінки та задоволення вище вказаних вимог найкраще апроксимує вхідні дані модель другого порядку (рис. 3.11). В нулі функція повертає нуль та значення при $\tau(0.0254) = 0.0055$ найбільш близько до реального 0.003 с. Проте, значення відносної похибки в залежності від діаметра термопари трохи більше ніж в інших.

Для того щоб дізнатись наскільки добре модель описує залежність випадкових величин часто використовують точкову оцінку, яка називається коефіцієнтом детермінації або R-квадрат. Даний показник є мірою залежності однієї випадкової величини від інших. В загальному випадку коефіцієнт детермінації показує яку долю дисперсії залежної змінної пояснює модель. Для лінійної регресії двох величин даний коефіцієнт є квадратом коефіцієнту кореляції цих величин. В загальному випадку коефіцієнт детермінації знаходять за наступними формулами:

$$R^2 = 1 - \frac{\sigma_r}{\sigma_t},$$

де σ_r - дисперсія невязок; σ_t - загальна дисперсія залежної випадкової величини. Дисперсія невязок знаходиться за наступною формулою:

$$\sigma_r^2 = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} (y_i - \hat{y}_i)^2}{n},$$

де y_i - експериментальні значення; \hat{y}_i - значення передбачені моделлю. Загальну дисперсію σ_t знаходимо за формулою:

$$\sigma_t^2 = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} (y_i - \bar{y})^2}{n},$$

де \bar{y} - середнє значення:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} y_i.$$

Коефіцієнт детермінації для моделі із константою приймає значення від 0 до 1. Значення коефіцієнту ближчі до одиниці характеризують частку дисперсії, яку передбачає модель. Нуль означає що модель описує залежність не краще середнього значення залежної змінної.

Недоліком даного показника є те, що він збільшується із збільшенням кількості факторів або коефіцієнтів моделі. Тому в цьому випадку даний показник є мало інформативним. Тобто, в загальному ці моделі апроксимують дану залежність добре, але яка краще не зрозуміло. Тому некоректно використовувати даний коефіцієнт для порівняння моделей із різною кількістю факторів.

Для порівняння моделей із різною кількістю факторів використовують скоригований коефіцієнт детермінації. Для розрахунку коефіцієнта використовують незміщені оцінки дисперсій. Так дисперсія нев'язок знаходиться за наступною формулою:

$$\sigma_t^2 = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} (y_i - \bar{y})^2}{n-1}.$$

Загальну дисперсію σ_t знаходимо за формулою:

$$\sigma_t^2 = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} (y_i - \bar{y})^2}{n-1}$$

В цьому випадку скоригований коефіцієнт детермінації має наступну форму:

$$R_m^2 = 1 - (1 - R^2) \frac{n-1}{n-k-1}$$

де k — кількість параметрів моделі.

Скоригований коефіцієнт детермінації можна використовувати для порівняння моделі за критерієм якості апроксимації.

Іншим показником, який можна використовувати для порівняння моделей, є коефіцієнт стандартної похибки моделі. Даний показник можна розглядати в якості міри розкиду даних спостережень від передбачених моделлю. Чим менше значення стандартної похибки моделі, тим краще модель апроксимує данні. Приведемо формулу даного показника:

$$s^2_t = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-k-1}.$$

Модель більш якісно апроксимує дані якщо цей показник менший.

Для порівняння моделей використовують інформаційні критерії. Їх часто використовують в статистиці як міру відносної якості статистичних моделей. Дані критерії використовують для порівняння моделей із різною кількістю параметрів. Також дані критерії враховують вимоги підвищення точності та зменшення числа параметрів моделі. Дані критерії побудовані на принципі штрафів за додаткові параметри моделі.

Інформаційний критерій Акаїке

$$AIC = \ln(\hat{\sigma}^2) + \frac{2k}{n},$$

$$AIC = \ln\left(\frac{\sum_{i=0}^{n-1} (y_i - \hat{y}_i)}{n}\right) + \frac{2k}{n},$$

де k — кількість параметрів моделі; n — величина вибірки.

Байєсівський інформаційний критерій (критерій Шварца):

$$BIC = \ln(\hat{\sigma}^2) + \frac{k \ln(n)}{n}$$

$$BIC = \ln\left(\frac{\sum_{i=0}^{n-1} (y_i - \hat{y}_i)}{n}\right) + \frac{k \ln(n)}{n}$$

Перший доданок в цих критеріях є штрафом за велику дисперсію. Другий — штраф за використання додаткових змінних. Найкраща із розглянутих буде модель із найменшими значеннями цих критеріїв.

Отримаємо значення всіх критеріїв для отриманих моделей другого та третього порядків для вибору найбільш підходящої моделі (табл. 3.1).

Таблиця 3.1. Критерії порівняння моделей

№	S(e)	E(e)	τ_1	τ_2	R^2	R_{adj}^2	S_{adj}^2	SE	AIC	BIC
1	0	0	1,1317	1,1203	0,9990	0,9989	0,5370	0,7268	-0,6065	-0,5389
2	36,88	0,29	0	0,0055	0,9983	0,9983	0,8791	0,9300	-0,1135	-0,0460
3	0	0	0,0581	0,0979	0,9997	0,9997	0,1456	0,3769	-1,9038	-1,8138
4	1,0609	0,0084	0	0,0415	0,9997	0,9997	0,1461	0,3776	-1,9003	-1,8103

$S(e) = \sum_{i=0}^{n-1} (y_i - \hat{y}_i)$ - сума невязок;

$E(e) = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} (y_i - \hat{y}_i)}{n}$ - середнє значення невязок;

$\tau_1 = \tau(0)$ - значення сталої часу за нульового діаметру термопар, тобто, якщо немає діаметру то і не повинно бути сталої часу у термопарі;

$\tau_2 = \tau(0,0254)$ - значення сталої часу термопар за значення діаметру термопарі рівному 0,0254 мм, для цього значення діаметру відомо, як зазначалось, значення сталої часу рівне 0,003 с, тому потрібно, щоб отримані моделі наближались в цій точці до цього значення.

Графіки невязок апроксимації залежності сталої часу термопар на повітрі від характерного діаметру d для поліному другого ступеня відображено на рис. 3.15.

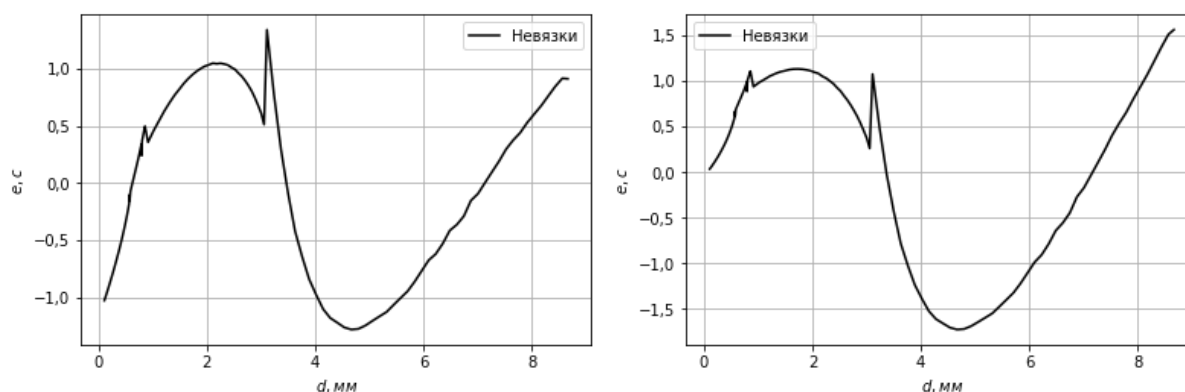


Рисунок 3.15 – Графік невязок апроксимації залежності сталої часу термопар на повітрі від характерного діаметру d для поліному другого ступеня. Лівий графік для поліному без обмежень на параметри. Правий графік для поліному із обмеженнями на параметри.

Графіки нев'язок апроксимації залежності сталої часу термопари на повітрі від характерного діаметру d для поліному третього ступеня відображено на рис. 3.16.

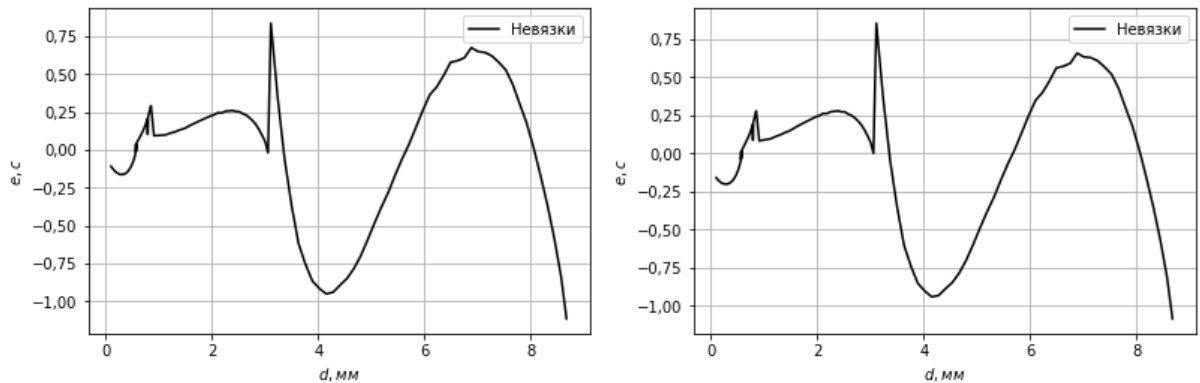


Рисунок 3.16 - Графік нев'язок апроксимації залежності сталої часу термопари на повітрі від характерного діаметру d для поліному третього ступеня. Лівий графік - для поліному без обмежень на параметри. Правий графік - для поліному із обмеженнями на параметри.

На рис. 3.17 наведено залежності значень сталих часу від характерного діаметру у водному середовищі.

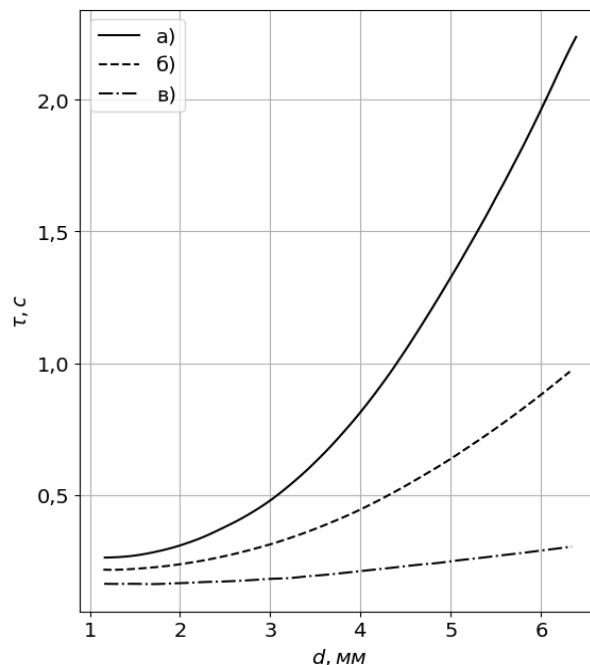


Рисунок 3.17. Графік залежності сталої часу термопари у воді від характерного діаметру d [29].

Модель першого порядку є загально прийнятою, і виробники інколи зазначають динамічні властивості вказуючи сталу часу в технічній документації до термопари. Проте, дана модель є наближеною характеристикою динамічних властивостей термопари. Використання даної моделі може приводити до знаних похибок результату вимірювання температури.

Оскільки, термопара при вимірюванні перебуває в складному теплообмінному процесі із об'єктом вимірювання, то на думу автора математична модель термопари має більш складну форму і повинна характеризуватись декількома сталими часу.

3.2. Експериментальне дослідження динамічних характеристик термопар радіоімпульсом струму

Вимірювання нестационарних температур в більшості випадків проводять за допомогою контактних засобів вимірювання, серед яких найпоширенішими є термопари, завдяки їх високій точності вимірювання, простоті конструкції та легкості використання [16].

Також стрибок температури може бути створений за рахунок внутрішнього розігріву чутливого елемента термопари. В [6] розігрів термопари здійснювався змінним, а в [35] постійним струмом з наступною реєстрацією електрорушійної сили (ЕРС) після вимикання струму.

.Серед динамічних характеристик, таких як диференціальні рівняння, амплітудо- і фазо-частотних, перехідних та імпульсно-перехідних характеристик, найбільш придатними при експериментальних випробувань термопарних перетворювачів є передавальна функція:

$$W(p) = \frac{U(p)}{\theta(p)},$$

де в операторній формі і за нульових початкових умов представлено: $W(p)$ - передавальна функція термопари; $U(p)$ - вихідний сигнал термопари – термо-ЕРС; $\theta(p)$ - вхідний сигнал – температура, оригінал якої є стрибок

температури необмежений в часі. На практиці замість необмеженого в часі стрибка температури використовують стрибок скінченної тривалості, при умові, що стала часу термопарі набагато менша тривалості стрибка.

Використання радіоімпульсу струму дозволяє позбутись ефекту Пельт'є, який виникає на спай термопарі в залежності від напрямку протікання струму і дозволяє реєструвати перехідний процес термопарі для отримання передавальної функції.

Радіоімпульс пропускають через термопару періодично з постійним збільшенням тривалості і амплітуди радіоімпульсу. Після досягнення термопарою стану рівноваги, визначають динамічні характеристики термопарі з отриманих діаграм залежності термоЕРС від часу.

Метод визначення динамічних характеристик термопар реалізується наступним чином (рис. 3.18-3.19) [51].

Експериментальні досліді проводились за допомогою обладнання компанії National Instruments і програмного забезпечення LabVIEW. Використання цього способу дозволяє більш точно визначати динамічні характеристики термопар, що в свою чергу дозволяє підвищити точність вимірювання нестационарних температур і розширити сферу застосування термопар [52].

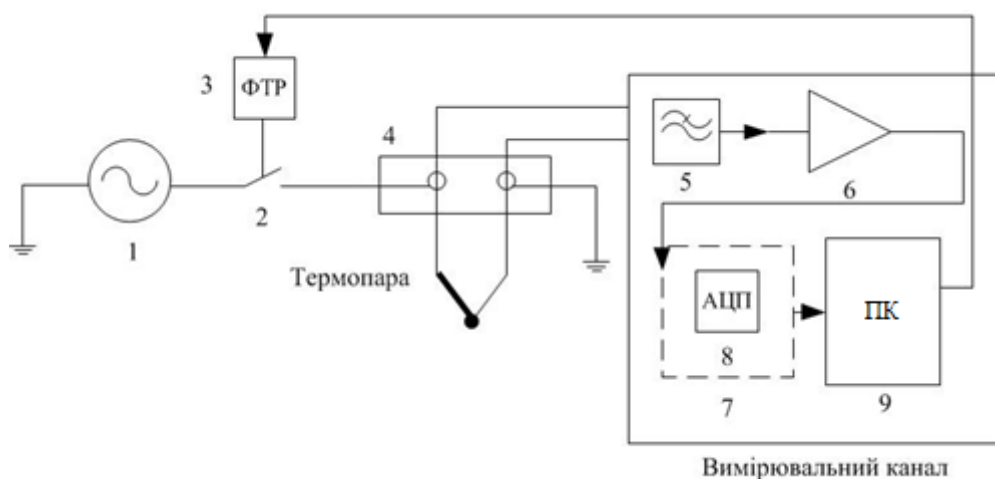


Рисунок 3.18 – Структурна схема визначення динамічних характеристик термопар. 1. Генератор радіоімпульсу струму; 2. перемикач; 3. формувач

тривалості радіоімпульсу (ФТР); 4. вхідний пристрій для кріплення вільних кінців досліджуваної термопари; 5 аналоговий фільтр нижніх частот, 6. підсилювач сигналу термо-ЕРС; 7. вимірювальний модуль; 8. аналого-цифровий перетворювач (АЦП), 9. ПК.

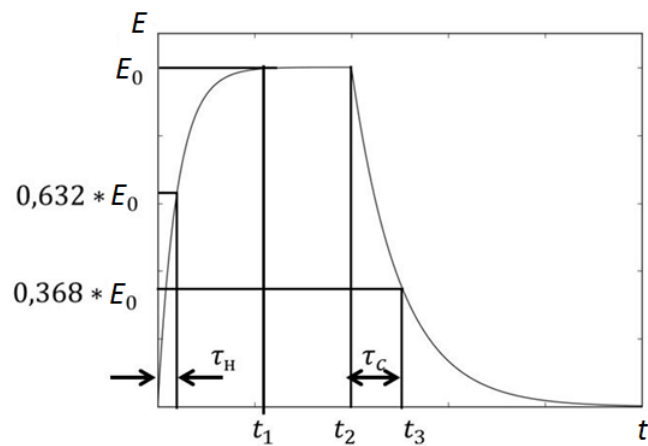


Рисунок 3.19 – Перехідний процес термопари (3.6).

Результати отримані при дослідженні різних типів термопар (рис. 3.20) дозволили підтвердити можливість застосування даного способу визначення динамічних характеристик термопар [36].

$$u(t) = \left\{ \begin{array}{ll} u_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_H}} \right), & t \leq t_1 \\ u_0, & t_1 < t \leq t_2 \\ u_0 e^{-\frac{t}{\tau_C}}, & t > t_2 \end{array} \right\}. \quad (3.6)$$

Використання запропонованого способу дозволяє підвищити точність визначення динамічних характеристик термоперетворювачів, а як наслідок і точність вимірювання нестационарної температури, зменшити час проведення випробувань, вимагає використання мінімального набору інструментів, для проведення вимірювань і може бути застосований як в лабораторних вимірюваннях, так і напряму на місці встановлення термопар.

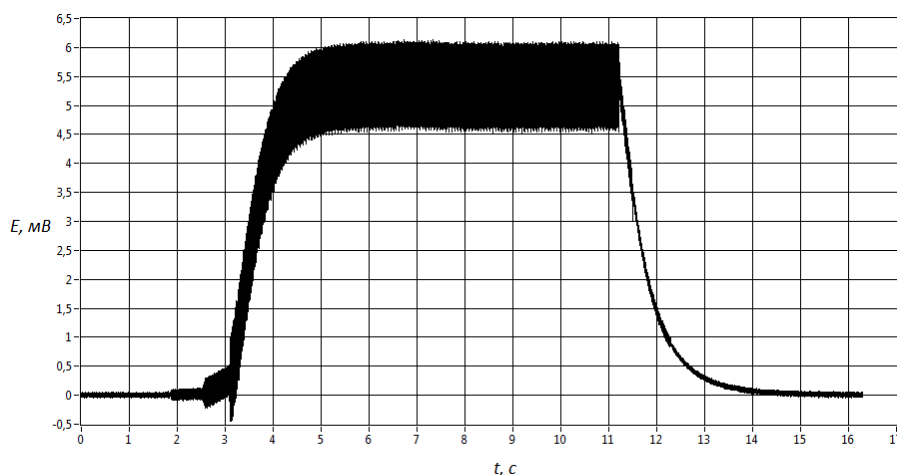


Рисунок 3.20 – Експериментальні данні, отримані при дослідженні термопар класу А1.

3.3. Експериментальне дослідження динамічних характеристик термопар на основі АФЧХ

Оскільки значення ЕРС термопар E_3 (2.15) лежить в мілівольтовому діапазоні, а ЕРС E_0 (2.16) у вольтовому діапазоні, то при знаходженні E_3 , представлену другою гармонікою в сумарній ЕРС E_Σ (рис. 2.15) необхідно подавити набагато більшу E_0 , яка представлена першою гармонікою. Оскільки фазових зсувів зазнають ЕРС, як на другій так і на першій гармоніці, то ефективне подавлення повинне бути векторне, тобто з регулюванням, як амплітуди, так і фази. Подавлення ЕРС першої гармоніки може бути, як за допомогою селективного фільтру так і компенсаційним способом. Структурна схема пристрою для отримання АФЧХ з компенсацією першої гармонік представлена на рис. 3.21.

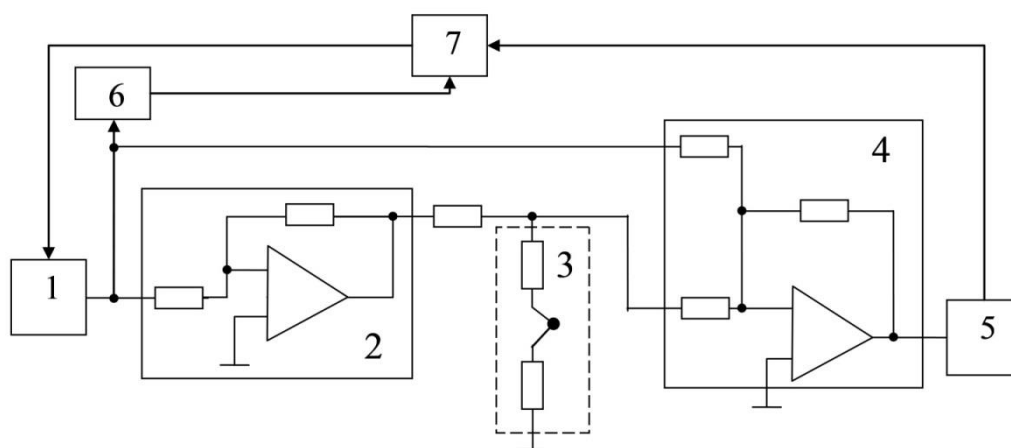


Рисунок 3.21 – Структурна схема пристрою для вимірювання АЧХ термопари

де: 1 – ЦАП синтезатор синусного струму; 2 – інвертор; 3 – термопара; 4 – суматор; 5 – АЦП; 6 – квадратор; 7 – комп'ютер.

Можливо також часткове подавлення першої гармоніки шляхом компенсації її напругою близькою до протифазної, для досягнення більшого відношення складових другої та першої гармонік із метою покращення подальшого спектрального аналізу.

Будо зроблено декілька експериментальних установок для реалізації алгоритму ідентифікації термопари.

Схема (рис. 3.21) була реалізована у системі для вимірювання АФЧХ термопари та відновлення значень сталих часу (рис. 3.22). Частиною даної системи є універсальне шасі NI PXI 1042 компанії National Instruments. В якому встановлено двоядерний промисловий комп'ютер PXI-8106, який використовувався для програмування та керування пристроями збору та генерації даних. Як інструмент синтезу сигналів та вимірювання реакції на них термопари був використаний, встановлений в шасі, модуль збору та генерації динамічних сигналів NI PXI-4461. Даний модуль складається із двох каналів динамічної генерації сигналів та двох каналів оцифровки сигналів; має шість програмно керованих режимів підсилення для налаштування вхідного діапазону. Роздільна здатність всіх каналів становить 24 біта, тобто динамічний діапазон становить 120 dB. Верхній діапазон

напруги складає ± 10 V. Має програмно керований рівень оцифровки, із частотним максимумом 204.8 кГц.

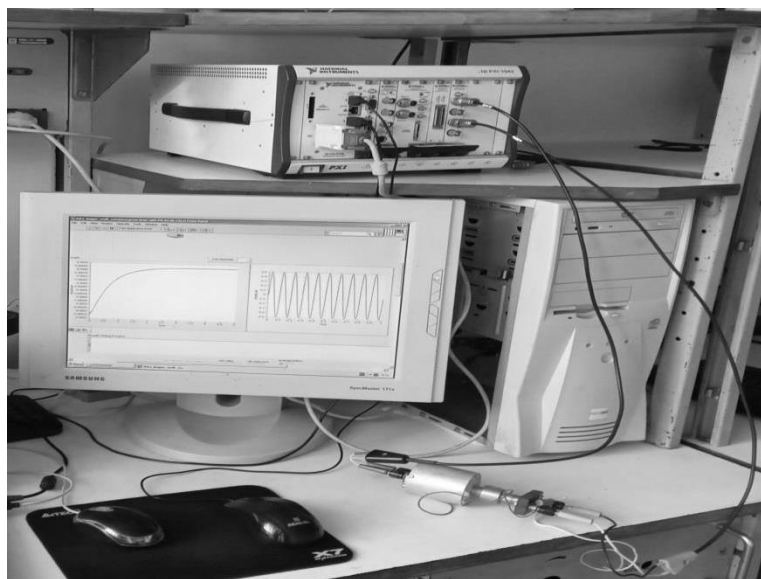


Рисунок 3.22 – Система для вимірювання АФЧХ термопар та значень сталих часу

При пропусканні синусного струму через термопару виникає друга гармоніка ЕРС, яка у 150 – 200 раз менша першої гармоніки напруги на опорі термопарі. Якщо NI PXI-4461 із АЦП на 24 розряди використовувати в режимі аналізатора спектра, то можливе вимірювання другої гармоніки із достатньою роздільною здатністю. При навіть не повній компенсації першої гармоніки, роздільна здатність суттєво підвищиться.

У програмуванні модуля NI PXI-4461 та цифровій обробці даних використано середовище графічного програмування LabVIEW. Для подальшого спектрального аналізу даних використано математичні бібліотека SciPy. Графіки побудовані за допомогою бібліотеки Matplotlib. Моделювання електричних кіл для реалізації інвертора 2 та суматора 4 із метою компенсації першої гармоніки (схема рис. 3.21) проводилось за допомогою програми аналогового та цифрового моделювання електричних кіл Micro Cap 12.

Експериментальні дослідження динамічних характеристик виконувались на декількох хромель-копелевих термопарах за допомогою системи, яка складається із NI PXI-4461, підсилювача та суматора. Оскільки,

ЦАП NI PXI-4461 здатен віддавати струм до 14 мА, для реалізації структурної схеми (рис. 3.21) був змонтований зовнішній підсилювач потужності та суматор для компенсації першої гармоніки на затискачах термопари (рис. 3.23).

При амплітуді першої гармоніки 1,5 В, амплітуда другої гармоніки, яка виникає завдяки ефектам Джоуля (розігрів) та Зеебека (ЕРС) становила 8 мВ, а після підсилення на суматорі 80 мВ, що забезпечувало достатню роздільну здатність при вимірюванні миттєвих значень 24 розрядним АЦП на межі 0,316 В.

Оскільки вихідний опір підсилювача потужності прямує до нуля, для уникнення закоротки ЕРС термопари перед нею включено резистор R8 (рис. 3.23).

Для мінімізації нелінійних спотворень підсилювач потужності працював у режимі «А» [37].

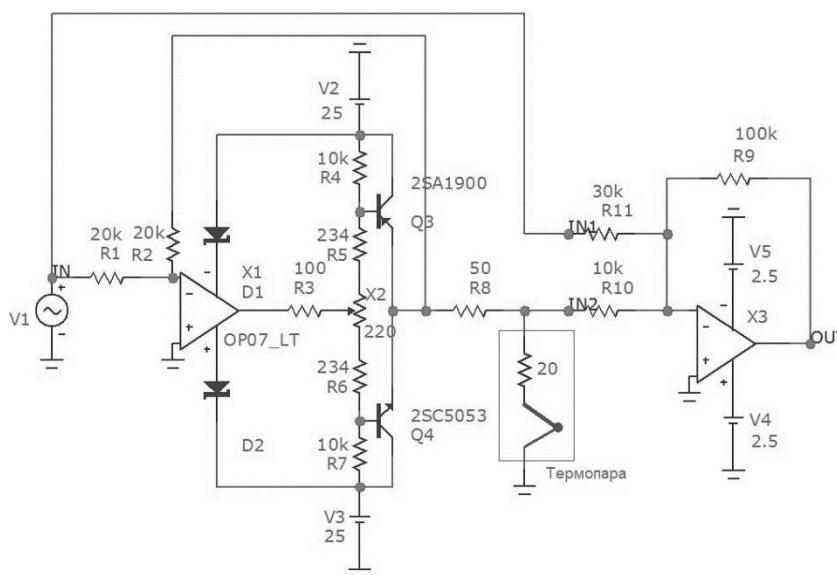


Рисунок 3.23 – Принципова схема, яка реалізує структурну схему (рис. 3.21)

Розроблена система була використана для отримання АФЧХ термопар.

Для технічної реалізації запропонованих нами методів ідентифікації термопар були розроблені та створені високотемпературні термопари (рис. 3.24), виготовленню яких сприяли професори Стадник Б. І. та Лах О. І.

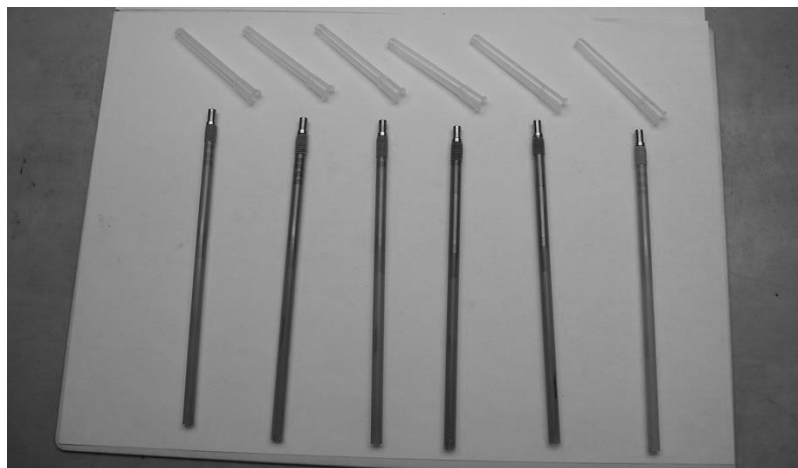


Рисунок 3.24 – Термопары КПП АЕД з дротів W/Re 5 та W/Re 26 діаметром 0,05 мм

Дані термопары (рис. 3.24) були розроблені для отримання перехідної характеристики термопары.

Частотний діапазон вхідного сигналу був підібраний із ультра низьких та низьких частот в діапазоні від 0,01 до 30 Гц. Після початку генерації сигналу на відповідній частоті вибірка починалась тільки через 10 с, для установлення перехідних процесів та використовувався аналоговий тригер для початку вибірки із нуля. Було отримано 20 цілих періодів вхідного та різницевого сигналів, які потім записувались у файли для подальшого аналізу. Вхідні сигнали на всіх частотах були піднесені до квадрату, як математичний аналог роботи термопары. Використавши бібліотеку SciPy, були виконані швидкі перетворення Фур'є вихідних сигналів та квадратів вхідних сигналів. Потім були виділені комплексні значення других гармонік квадратів вхідних сигналів та вихідних сигналів. Масив комплексних значень другої гармоніки вхідного сигналу був поділений на масив комплексних значень другої гармоніки квадратів вхідного сигналу та приведений до найбільшого значення. На основі отриманих даних був побудований годограф АФЧХ термопар (рис. 3.25) [38].

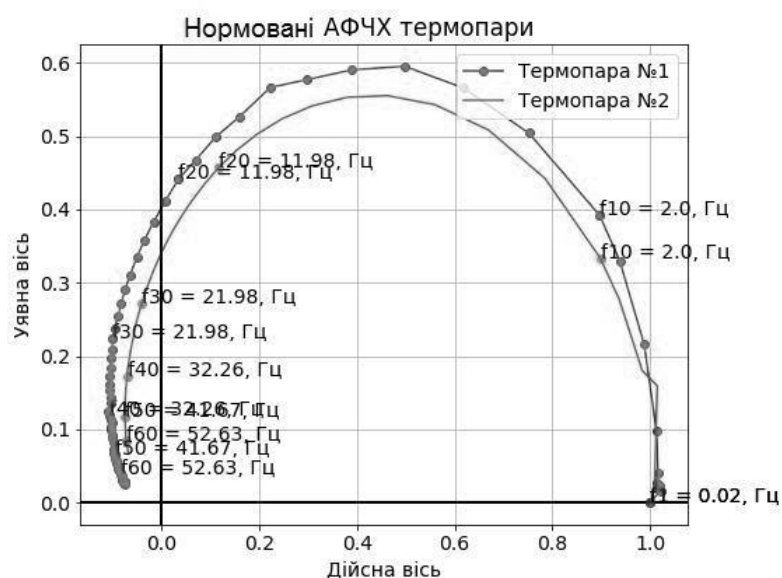


Рисунок 3.25 – Експериментально отримані значення АФЧХ двох термопар

Проаналізувавши рис. 3.25 встановлено, що термопари містять не менше двох сталих часу, оскільки фаза на годографа більша 90° .

Встановивши, порядок моделі термопари можна перейти до апроксимації АЧХ термопари. Для цього, взявши модуль від АФЧХ була отримана АЧХ термопари, а взявши арктангенс АФЧХ отримали ФЧХ термопари (рис. 3.26).

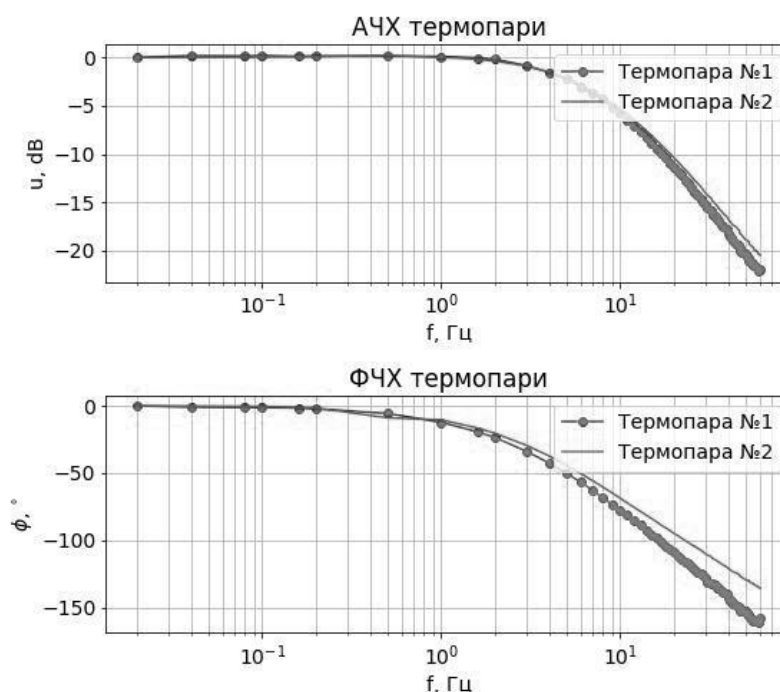


Рисунок 3.26 – Експериментально отримані значення АЧХ та ФЧХ двох термопар

Висновки до розділу 3

Отримано плани експериментів на основі ЛП, послідовностей мають перевагу при апроксимації експериментальних даних для отримання коефіцієнтів моделей, що точніше відображають внутрішню структуру досліджуваних процесів.

На основі експериментальних даних, було встановлено, що із збільшенням діаметру спаю термопар відповідно збільшується інерційність термопар за квадратичним законом.

Використання запропонованого методу ідентифікації динамічних характеристик термопар на основі радіоімпульс струму дозволяє підвищити точність визначення динамічних характеристик термоперетворювачів, а як наслідок і точність вимірювання нестационарної температурм і може бути застосований як в лабораторних вимірюваннях, так і напряду на місці встановлення термопар.

Запропоновано визначати динамічну характеристику термопар на основі їх АФЧХ. Вхідний температурний сигнал створюють шляхом розігріву спаю термопар електричним струмом гармонічної форми. Відношення амплітуд вихідної та вхідної напруг по другій гармоніці дає АЧХ. Різниця їх фаз по другій гармоніці дає ФЧХ. ФЧХ є дуже важливою, тому що дозволяє визначити кількість аперіодичних ланок. При вимірюванні миттєвих значень вихідного сигналу термопар і відомій динамічній характеристиці знаходиться часова залежність вхідного температурного імпульсу.

РОЗДІЛ 4.

ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ВІДНОВЛЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ КОРОТКИХ ТЕПЛОВИХ ІМПУЛЬСІВ

4.1. Визначення сталих часу термопар на основі використання лазерного променя

В найпростішому випадку вимірювання температури, рівняння теплової рівноваги термоперетворювача, враховуючи тільки конвективний теплообмін, можна записати [39]:

$$\tau \frac{dT_u}{dt} + T_u = T_\infty \quad (4.1)$$

де T_∞ - температура середовища; T_u - температура чутливого елемента термоперетворювача; τ - стала часу термоперетворювача. Сталу часу в свою чергу можна записати у вигляді фізичних параметрів чутливого елемента термоперетворювача [39]:

$$\tau = \frac{\rho V c}{h A}, \quad (4.2)$$

де ρ - густина; V - об'єм; c - питома теплоємність; h - коефіцієнт конвективного теплообміну і A - контактна площа поверхні чутливого елемента. Оскільки чутливий елемент термопарних термоперетворювачів в більшості випадків утворений із сплавів різних металів, точні фізичні параметри яких невідомі, то із рівняння (4.2) не можливо визначити сталу часу термоперетворювача. Також неможливо визначити сталу часу використовуючи рівняння (4.1), оскільки дійсна температура середовища T_∞ залишається невідомою [39]. Також, як зазначалось вище, термопара містить декілька сталих часу.

Серед динамічних характеристик, таких як диференційні рівняння, амплітудо- і фазочастотних, перехідних та імпульсно перехідних характеристик, найбільш придатними при експериментальних випробувань термоперетворювачів є передавальна функція [39]:

$$W(p) = \frac{E(p)}{T(p)}, \quad (4.3)$$

де в операторній формі і за нульових початкових умов представлено: $W(p)$ - передавальна функція термоперетворювача; $E(p)$ - вихідний сигнал – термоелектрорушійна сила (термоЕРС); $T(p)$ - вхідний сигнал – температура. Оскільки процес теплообміну термоперетворювача можна описати диференціальним рівнянням з постійними коефіцієнтами, то передавальна функція (4.3) являє собою дрібно раціональну функцію параметра p [39]:

$$W(p) = \frac{b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_1 p + b_0}{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0},$$

при умові, що показники поліномів чисельника і знаменника задовольняють нерівність $m < n$ [39].

Для знаходження передавальної функції термоперетворювача скористаємося методом перехідних функцій. Згідно з цим методом експериментально встановлюють зміну вихідного сигналу термоперетворювача (термоЕРС) в часі, при ступінчатій зміні вхідного сигналу – температури. Отримана залежність термоЕРС від часу є перехідною функцією термоперетворювача [39].

Апроксимація отриманої перехідної характеристики проводиться з використанням методу найменших квадратів, як найбільш універсального і гнучкого підходу у випадку сильно зашумлених сигналів. Апроксимуюча функція підібрана виходячи із суті фізичного процесу та простоти математичних розрахунків. Реакцію термоперетворювача на одиничний стрибок можна описати сумою експонент вигляду [39]:

$$E(t) = c_0 - \sum_{i=1}^n c_i e^{-\frac{t}{\tau_i}}, \quad (4.4)$$

де c_i і τ_i - невідомі коефіцієнти, які знаходяться з використанням методу найменших квадратів; $c_0 = E_0$ - значення термоЕРС термоперетворювача в усталеному режимі [39].

Використовуючи перетворення Лапласа знаходимо операторну форму відповідного впливу і перехідної характеристики:

$$T(p) = \frac{T_0}{p}, \quad E(p) = \frac{c_0}{p} - \sum_{i=1}^n \frac{c_i \tau_i}{\tau_i p + 1}.$$

Виконавши серію перетворень [39], з урахуванням початкових умов, отримаємо передавальну функцію термоперетворювача на основі експериментальної перехідної характеристики:

$$W(p) = \frac{k}{\prod_{i=1}^n (\tau_i p + 1)}, \quad (4.5)$$

де $k = \frac{c_0}{T_0} = \frac{E_0}{T_0}$.

Для підтвердження теоретичних розрахунків був створений експериментальний стенд (рис. 4.1-4.2).

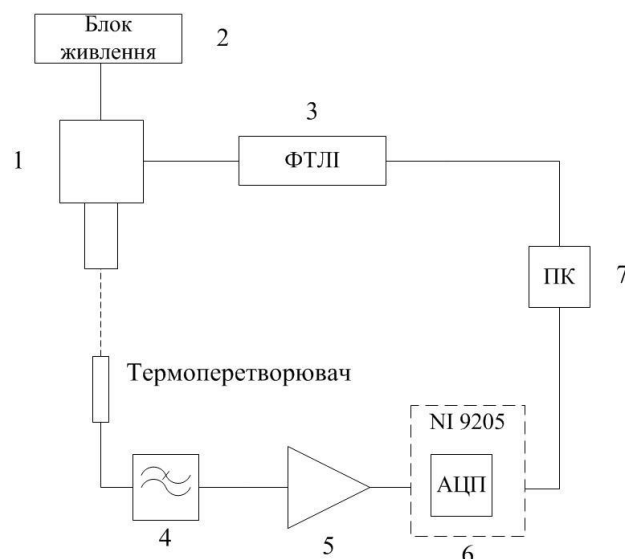


Рисунок 4.1 – Схема експериментального стенду. 1 – генератор оптичного випромінювання; 2 – блок живлення; 3 – формувач тривалості лазерного імпульсу; 4 – фільтр нижніх частот; 5 – підсилювач; 6 – модуль збору даних

NI-9205; 7 – ПК [39]



Рисунок 4.2 – Експериментальний стенд

Для вимірювання температури використовувалась термопара фірми NANMAC модель e20, спай якої створений шляхом шліфування з наступним поліруванням робочої поверхні термопари (рис. 4.3) [39].

E6-20 Series

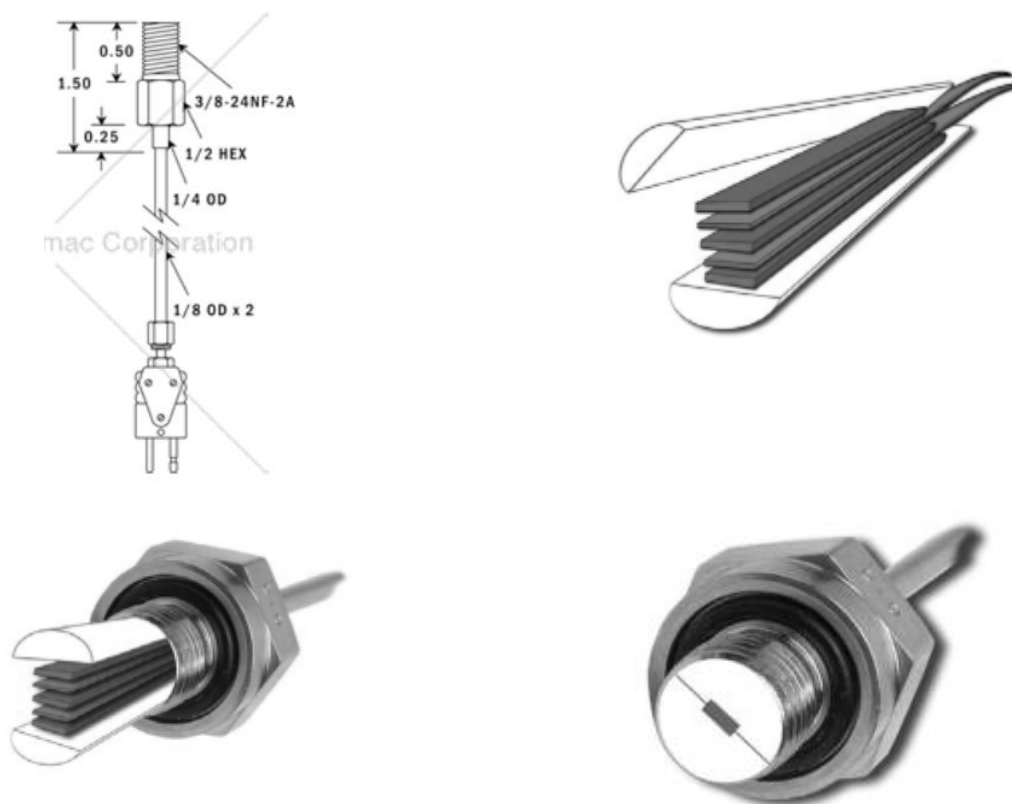


Рисунок 4.3. Габаритні розміри термопари і конструкція спаю термопари

Термопара розрахована на діапазон вимірювання температур від 0 до 2310 °С і максимального значення тиску 25000 psi. В технічній документації виробник не вказав динамічні характеристики термопари. Тому були проведені експериментальні дослідження для визначення динамічних характеристик створенням на спаю термопари ступінчатого тестового впливу двома способами:

- внутрішній розігрів спаю термопари радіоімпульсом струму через провідники термопари;
- зовнішнє опромінення термопари лазерним променем.

Для досліджень була використана термопара типу С (вольфрам/реній-5, вольфрам/реній-26), з діапазоном температури – 0 – 2320 °С. На рис. 4.4 наведено одну з реалізацій перехідної характеристики термопари у абсолютних значеннях та у нормованому вигляді (рис. 4.5) [53].

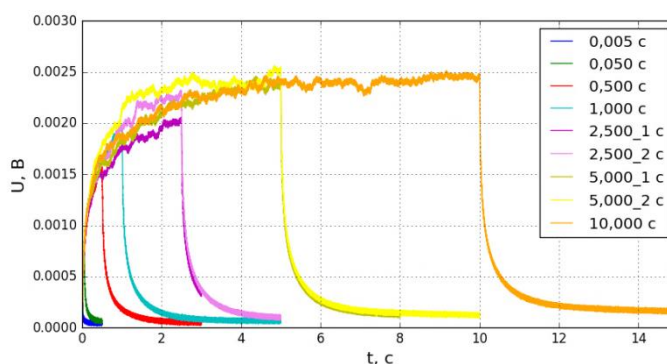


Рисунок 4.4. Експериментальні перехідні характеристики термопари типу С

Експерименти полягали в створенні температурного стрибка на спаю і реєстрації перехідної характеристики (термо-ЕРС). В результаті цих експериментів були отримані сімейства перехідних характеристик (рис. 4.5), при різній тривалості імпульсу і постійній потужності [54].

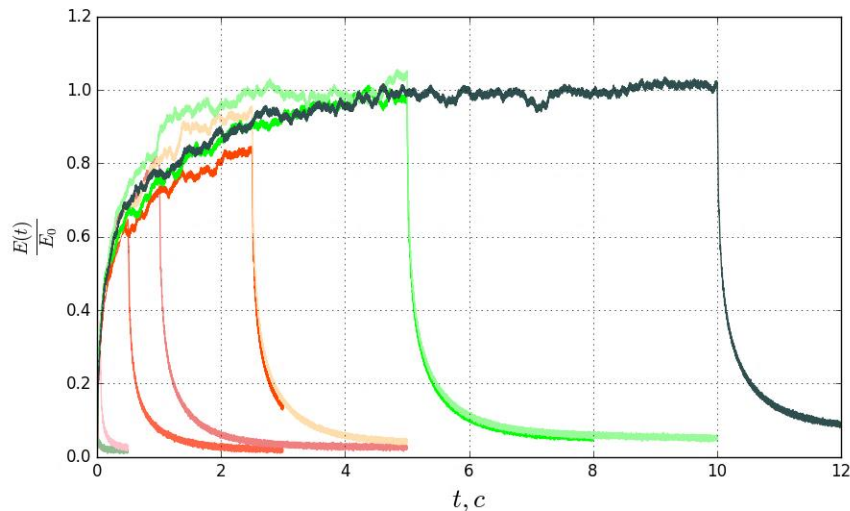


Рисунок 4.5 – Сімейство перехідних характеристик термопарі NANMAC e20, отримані при постійному значенні потужності лазера і різному часі впливу (від 5 мс до 10 с)

Використавши методи фільтрації та нелінійної апроксимації методом найменших квадратів і прийнявши до уваги теоретичні припущення, викладені вище, були отримані моделі перехідних характеристик з різною кількістю експоненціальних доданків. В результаті модель термопарі описується рівнянням (4.1).

Похибки вимірювання термопарами температури газових потоків пов'язані із розподіленістю активної частини термопарі: спай, електроди та подовжувальні проводи. Ця розподіленість призводить до того, що вимірювальний мілівольтовий сигнал піддається впливу зовнішніх завад.

Отримана модель перехідної характеристики термопарі, при тривалості вхідного сигналу 10 с:

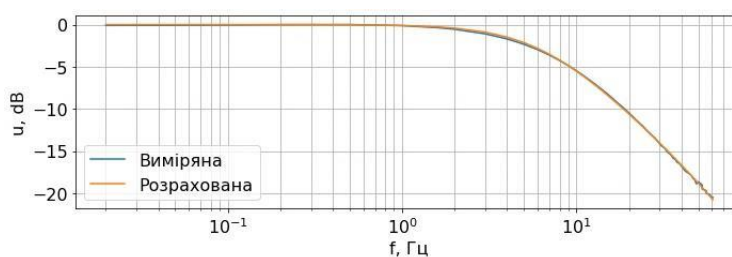
$$E(t) = E_0 \cdot \left(1 - 0,418 \cdot e^{\frac{-t}{1,630}} - 0,393 \cdot e^{\frac{-t}{0,136}} - 0,283 \cdot e^{\frac{-t}{0,012}} + 0,094 \cdot e^{\frac{-t}{0,004}} \right).$$

Підставляючи значення постійних часу в рівняння (4.5) і прийнявши $k = 1$ отримаємо передавальну функцію термопарі типу С:

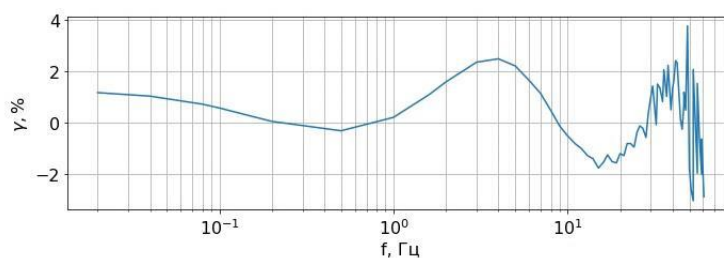
$$W(p) = \frac{1}{(1.630p + 1)(0.136p + 1)(0.012p + 1)(0.004p + 1)}$$

4.2. Визначення сталих часу термопар на основі АФЧХ термопар

Сталі часу термопар визначались шляхом апроксимації рівняння (розділ 3) АЧХ термопар методом найменших квадратів. Використовувалась функція `least_squares` із бібліотеки `SciPy`. Був використаний алгоритм «Trust Region Reflective» призначений для нелінійної оптимізації із обмеженнями. На шукані значення сталих часу були встановлені обмеження недопустимості від'ємних значень. Також, для перевірки правильності обраних моделей, проводилось порівняння апроксимованої та експериментально отриманої АЧХ (рис. 4.6).



а)



б)

Рисунок 4.6 – Графіки експериментальної та апроксимованої АЧХ термопарі із двома сталими часу в децибелах а) та відносна похибка апроксимованої та експериментальної АЧХ б)

Відносна похибка апроксимації розраховувалась за формулою:

$$\gamma_a = 100\% \cdot \left[\frac{u_a(f)}{u_e(f)} - 1 \right],$$

де $u_a(f)$ - апроксимована АЧХ термопари; $u_e(f)$ - експериментальна АЧХ термопари.

В табл. 4.1 наведено результуючі значення сталих часу для моделей з однією, двома та трьома сталими часу за даними експерименту.

Таблиця 4.1. Узагальнена таблиця розрахованих сталих часу термопари

Кількість сталих часу	$\tau_1, \text{с}$	$\tau_2, \text{с}$	$\tau_3, \text{с}$
одна	0,02458		
дві	0,02279	0,00158	
три	0.02279	0.00158	1,11574e-10

За табл. 4.1 видно, що сталою часу τ_3 можна знехтувати та вважати адекватною модель із врахуванням двох сталих часу, що підтвердилось порівнянням експериментально отриманих та розрахованих АЧХ та їх різниці.

Не врахування другої сталої часу призводить до похибки визначення першої сталої часу 8 %.

Були проведені дослідження залежності похибок моделі АЧХ від похибок задання сталої часу $\gamma(\tau_1)$ відносно знайденого значення (табл. 4.1) та відношення сталих часу k , яке визначалось:

$$k = \frac{\tau_2}{\tau_1}.$$

Оскільки для інфранизьких частот динамічна характеристика майже не впливає на результат вимірювання, то дослідження проводились для частот вище частоти зрізу визначеної моделі термопари (табл. 4.1). Результати таких досліджень для частоти $\omega = 40$ рад/с приведені на рис. 4.7. Вплив другої сталої часу для $k = 0,1$ на похибку вимірювання незначний, що обумовлено малістю значення. Із збільшенням відношення k вплив другої сталої часу на похибку вимірювання зростає.

Також можна зробити висновок, що навіть незначні відхилення у значеннях сталої часу або при неврахуванні кількості останніх, призводить до значних похибок у значення ЕРС термопары за умови використання її у перехідному процесі для вимірювання коротких теплових імпульсів.

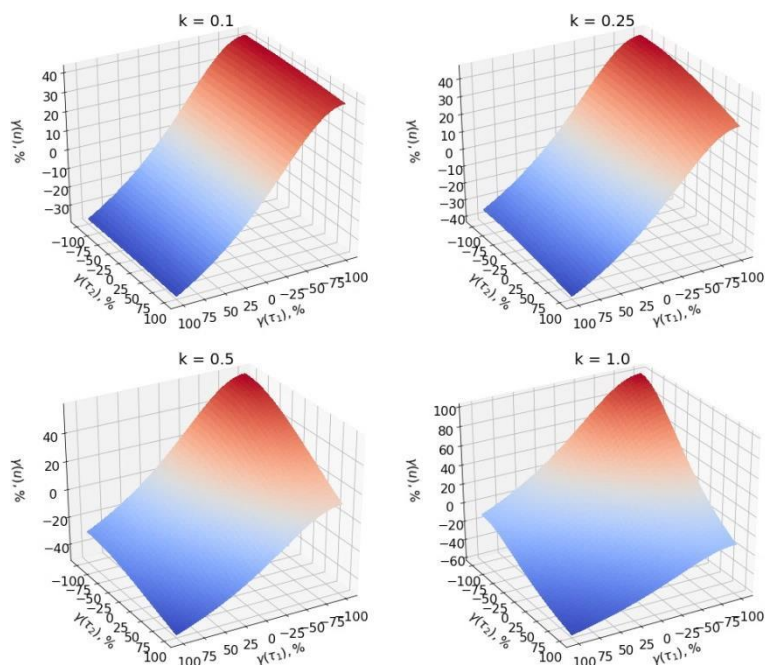


Рисунок 4.7 – Графіки залежності похибок моделі АЧХ від похибок $\gamma(\tau_1)$ та відношення сталих часу k для частоти $\omega = 40$ рад/с

З метою оцінки невизначеності двох розрахованих сталих часу, було проведено декілька експериментів із отримання АЧХ термопары. Вибірка становила 20 отриманих АЧХ, на основі яких були вираховані двадцять вибірок сталих часу. В табл. 4.2 наведені статистичні оцінки вибірки.

Таблиця 4.2. Статистичні значення вибірки

	τ_1	τ_2
$\bar{\tau}$, с	0.022785	0.001577
S, с	0.000045	0.000042
S, %	0.197665	2.664298

На рис. 4.8 наведено гістограми розподілу значень сталих часу на основі отриманої вибірки.

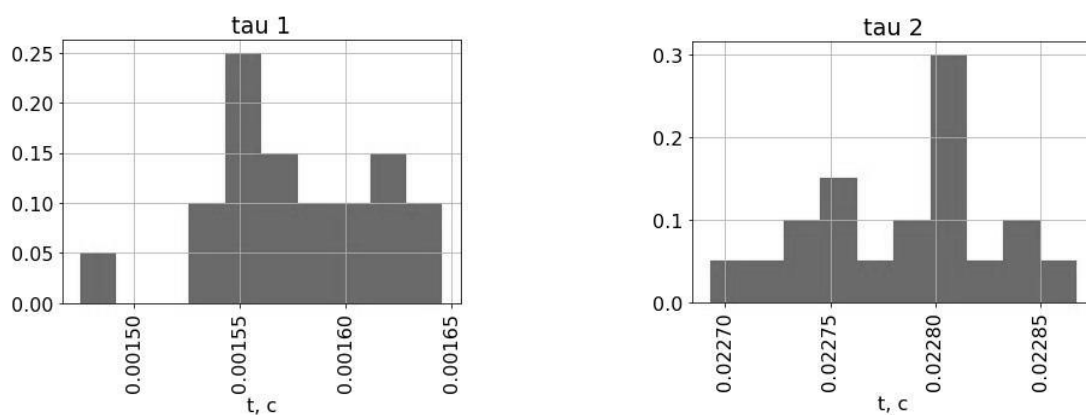


Рисунок 4.8 – Гістограми сталі часу отриманих на основі вибірки із 20 АЧХ

Невизначеність отриманих значень сталих часу становить $u_A(\tau_1) = 0,000009$ с та $u_A(\tau_2) = 0,000010$ с.

4.3. Отримання спектрального складу напруги струморозігрівуючої термопару із термозалежних дротів

При визначенні динамічних характеристик термопару у вигляді АФЧХ з'ясувалось, що крім очікуваної першої та другої гармонік у напрузі на затискачах термопару, присутня ще третя гармоніка. Співвідношення гармонік було наступне:

$$u_{f_1} : u_{f_2} : u_{f_3} = 1,5 : 0,008 : 0,01.$$

Перша гармоніка очевидна та виникає згідно закону Ома, як добуток струму на опір підвідних проводів термопару, опір контакту при з'єднанні проводів для отримання спаю, а також ефектами Пельть'є та Томсона. Наявність другої гармоніки пояснюється розігрівом спаю та підвідних проводів. Температура спаю згідно ефекту Джоуля пропорційна потужності, що виділяється у спаї, а при розігріві спаю квадратом струму, що протікає через термопару, якщо струм має синусну форму, то його квадрат пропорційний сумі постійної складової та косинусної складової на частоті другої гармоніки:

$$i = I_m \frac{1 - \cos(2\omega t)}{2}.$$

Третя гармоніка може виникати у тому випадку, коли опір підвідних провідників та спаю є термозалежними.

Для пояснення причин виникнення третьої гармоніки представимо еквівалентну схему термопар, у вигляді послідовно включених опорів термопар та джерела ЕРС Зеєбека (рис. 4.9).

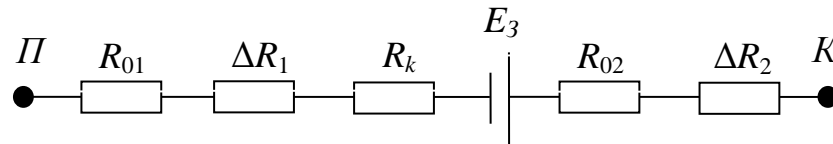


Рисунок 4.9. Еквівалентна схема термопар

R_{01} , R_{02} - початковий опір контактних провідників;

ΔR_1 , ΔR_2 - приріс опорів контактних провідників від їх розігріву;

R_k - опір контакту;

E_3 - електрорушійна сила Зеєбека;

Π , K – початок та кінець зображеної на рис. 4.9 ланки.

Термозалежний опір, як правило, представляється виразом:

$$R(\theta) = R_0(1 + \alpha\theta + \beta\theta^2 + \gamma\theta^3 + \dots). \quad (4.6)$$

На практиці використовують спрощену модель опору провідників, враховуючи тільки лінійну частину (4.7).

$$R(\theta) = R_0(1 + \alpha\theta). \quad (4.7)$$

Якщо прийняти таку спрощену модель, то на інфранизькій частоті, коли можна знехтувати реактивними складовими опором та пропускати через ланку струм синусної форми, напруга на затискачах буде:

$$U_{PK} = I_m \sin(\omega t) \left[R_{01} \left[1 + k_1 \alpha_1 (I_m \sin(\omega t))^2 \right] + \right. \\ \left. + R_{02} \left[1 + k_2 \alpha_2 (I_m \sin(\omega t))^2 \right] + R_k \right] \pm k_3 (I_m \sin(\omega t))^2 \quad (4.8)$$

де $k_1 \alpha_1$ - температурний коефіцієнт опору першого проводу;

$k_2 \alpha_2$ - температурний коефіцієнт опору другого проводу;

k_3 - коефіцієнт Зеєбека термопар;

R_k - опір контакту термопар.

Розкривши дужки у формулі (4.8) отримаємо (4.9).

$$U_{ПК} = I_m \sin(\omega t)(R_{01} + R_{02} + R_k) + I_m^3 \sin^3(\omega t)(R_{01}k_1\alpha_1 + R_{02}k_2\alpha_2) \pm \pm k_3 I_m^2 \sin^2(\omega t) \quad (4.9)$$

де

$$\begin{aligned} \sin^2(\omega t) &= 0,5(1 - \cos(2\omega t)) \\ \sin(\omega t)\cos(2\omega t) &= 0,5(\sin(3\omega t) - \sin(\omega t)) \\ \sin^3(\omega t) &= 0,25(0,75\sin(\omega t) - \sin(3\omega t)). \end{aligned} \quad (4.10)$$

Після перетворень (4.9), із урахуванням (4.10), отримаємо рівняння (4.11) спектрального складу напруги на ланці рис. 4.9.

$$U_{ПК} = I_m \sin(\omega t) \left[R_{01} + R_{02} + R_k + 0,75 I_m^2 (R_{01}k_1\alpha_1 + R_{02}k_2\alpha_2) \right] \pm \pm k_3 I_m^2 \sin(2\omega t) - 0,25 I_m^3 (R_{01}k_1\alpha_1 + R_{02}k_2\alpha_2) \sin(3\omega t) \quad (4.11)$$

Із рівняння (4.11) видно, що напруга на затискачах термопарі представлена трьома гармонічними складовими на частотах ω , 2ω , 3ω . Найбільша складова напруги має місце на частоті першої гармоніки. Набагато менша складова утворена завдяки ефекту Зеебека із коефіцієнтом k_3 представлена другою гармонікою.

Причому, коефіцієнт Зеебека k_3 залежність від матеріалів термопар та має найменше значення для високотемпературних термопар, типу Вольфрам-Реній та найбільше значення для низькотемпературних напівпровідникових термопар.

Третьою гармонікою представлена складова, зумовлена температурною залежністю опору проводів термопар. Наприклад, дріт із константану має практично температурно незалежний опір, платиновий та мідний дроти характеризується великою температурною залежністю, приблизно 4 % на 10°C приросту температури.

Застосування процедури спектрального аналізу дозволяє виокремити напругу другої гармоніки, яка використовується для побудови АФЧХ, знаходячи відношення амплітуди другої гармоніки, яка створюється «природнім» шляхом термопарі до амплітуди другої гармоніки вхідного

сигналу, створеної шляхом піднесення до квадрату миттєвих значень вхідного сигналу.

Напруга третьої гармоніки при високій роздільній здатності спектроаналізатора практично не впливає на визначення АЧХ термопари через її не велику питому вагу. Як відомо, роздільна здатність спектроаналізатора обернено пропорційна часові аналізу (довжині вибірки):

$$\Delta f = \frac{1}{T_a}$$

Тому, при експериментальних дослідженнях час аналізу обирався не менше 20...100 періодів напруги на кожній частоті. Сам аналіз проводиться на середній частині вибірки, а частота дискретизації набагато перевищувала частоту сигналу.

Окрім цього, початок створення масиву миттєвих значень для подальшого спектрального аналізу співпадав із переходом через нуль сигналу на затискачах термопари та закінчувався у момент переходу через нуль напруги заданого числа періодів аналізованих сигналів. Для цього використовується спеціальний тригер переходу через нуль при наростанні сигналів.

Як було вище зазначено та експериментально підтверджено амплітуда першої гармоніки у 100-200 раз перевищує амплітуду другої гармоніки. Тому, спеціально для покращення динамічного діапазону аналізу, спеціально створена схема для подавлення першої гармоніки не шляхом фільтрації, а шляхом компенсації протифазною напругою аналоговим способом до рівня, близького до амплітуди другої гармоніки та подальшому підсиленні.

Таке налаштування експериментальної системи дозволило задіяти максимальну кількість розрядів (близько 20) двадцяти чотирьох розрядного АЦП для вимірювання миттєвих значень напруги, яка аналізується.

Для створення максимально синусного сигналу у цифроаналоговому перетворювачі були задіяні максимально можлива кількість його розрядів у NI PXI-4461 їх 24.

При ступінчатій апроксимації синусоїди найближча вища гармоніка має номер

$$N = pn \pm 1,$$

де p – натуральний ряд чисел; n – кількість точок дискретизації на період. Якщо $p=1$, а $n=1000$, то найближчі гармоніки будуть мати номери 999 та 1001.

Нелінійні спотворення виникають не тільки через ступінчасту апроксимації синусоїди, але і через подальше підсилення. У наслідок чого можуть з'явитись другі, треті і т.д. гармоніки.

Тому, для проведення експериментальних досліджень створений підсилювач із глибоким зворотнім зв'язком $k\beta \gg 1000$ двохтактні вихідні каскади, які налаштовані на режим роботи «А», із попереднім налаштуванням зміщення вихідного сигналу до рівня менше $|\pm 5 \text{ мВ}|$, із можливістю забезпечення амплітуди вихідної напруги $\pm 10 \text{ В}$.

Виміряні нелінійні спотворення вихідної напруги $\pm 10 \text{ В}$ при струмові навантаження $\pm 0,2 \text{ А}$ та роботі на термо незалежний опір не перевищували - 90 дБ.

4.4. Удосконалена методика вимірювання температури коротких теплових імпульсів

В розділі 2 було зазначено, що в якості моделі термопари була вибрана лінійна стаціонарна система. Як відомо з теорій цифрової обробки сигналів, реакція такої системи на вхідний сигнал описується рівнянням згортки (4.12). Для цього потрібно мати інформацію про вхідний сигнал та імпульсну характеристику термопари. В розділі 3 було розглянуто методи ідентифікації термопар, для отримання, якраз, їх імпульсної характеристики [40].

Відновлення форми вхідного імпульсу температури за значеннями термоЕРС та даними про імпульсну характеристику термопари дозволить виконувати вимірювання температури коротких теплових імпульсів

термопарами у перехідному режимі їх роботи. Схема відновлення зображена на рис. 4.10.

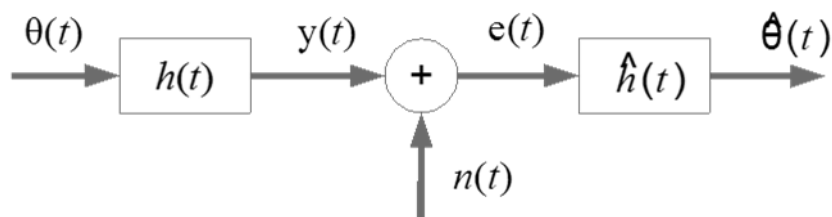


Рисунок 4.10 – Схема динамічного вимірювання температури термопарою

Вхідний температурний імпульс $\theta(t)$, вимірюється термопарою із імпульсною характеристикою $h(t)$. Результатом вимірювання є термоЕРС $e(t)$. Цей сигнал складається із інформативної частини $y(t)$, яка є реакцією термопар на вхідну дію температури та не інформативної частини — адитивного шуму ($n(t)$). Застосовуючи методи ідентифікації динамічних характеристик [39-41] отримується оцінка імпульсної характеристики термопар ($\hat{h}(t)$). Задача відновлення вхідного сигналу відноситься до категорії розв'язання обернених задач вимірювання. Для відновлення форми температурного імпульсу існують різні методи вирішення обернених задач. Використання кожного методу залежить від конкретної задачі вимірювання. Застосувавши алгоритм відновлення отримують оцінку вхідного температурного імпульсу ($\hat{\theta}(t)$) [40].

У випадку, коли найбільша стала часу термопар набагато менша за час зміни значення температури, тобто коли термопара знаходиться в термодинамічній рівновазі з об'єктом вимірювання, відновлення форми температурного імпульсу є тривіальною задачею. Для цього використовують статичну характеристику термопар, яка є поліноміальним рівнянням. Підставляючи значення термо-ЕРС в рівняння отримують оцінку температури на вході термопар з певною статичною похибкою.

Динамічна зміна температури вносить додаткову динамічну похибку в результат вимірювання. Дана похибка виникає через теплову інерційність термопар. У випадку динамічних вимірювань термопара знаходиться в

перехідному режимі і не досягає термодинамічної рівноваги. Тому для отримання оцінки значення температури потрібно використовувати динамічну модель термопар. Процес вимірювання температури, в цьому випадку, описується рівнянням згортки [42].

$$e(t) = \int_0^t \theta(\tau)h(t - \tau)d\tau. \quad (4.12)$$

Оскільки, вихідний сигнал термопар (термо-ЕРС), представлений в дискретній формі, то будемо використовувати дискретне рівняння згортки (4.13).

$$e[i] = \sum_{k=0}^i \theta[k]h[i - k]. \quad (4.13)$$

Пряма задача — знаходження реакції термопар на відомий вхідний сигнал, за відомої імпульсної характеристики системи. В часовій області можна замінити рівняння (4.13) використовуючи оператор згортки (4.14):

$$e(t) = \theta(t) * h(t). \quad (4.14)$$

Для виконання оберненої задачі знаходження температури $\theta(t)$, за відомого значення термо-ЕРС $e(t)$ та імпульсної характеристики $h(t)$ термопар використовуємо метод деконволюції. Суть цього метода — відновлення форми вхідного сигналу, спотвореного лінійною вимірювальною системою. Для застосування даного методу потрібно мати інформацію про вплив вимірювальної системи на вхідний сигнал. Як зазначалось вище, потрібно знати імпульсну характеристику системи (в часовій області, або передавальну характеристику в комплексній області). Вхідний сигнал відновлюється згортою вихідного сигналу системи та фільтру, частотні характеристики якого обернені до частотних характеристик системи. Фільтр обернений до імпульсної характеристики системи, в загальному, є вкладним завданням, оскільки неможливо відновити частотні складові, які були повністю подавлені вимірювальною системою. Ще одним недоліком є той факт, що операція деконволюції підсилить шуми, наявні у вимірюваному сигналі [42].

Дослідимо використання методу деконволюції у випадку вимірювання температури термопарою. Потрібно розробити фільтр, імпульсна характеристика якого є оберненою до імпульсної характеристики термопарі $h^{-1}(t)$. Застосовуючи цей фільтр до значень термо-ЕРС можна знайти значення температури. Рівняння (4.15) описує цю процедуру.

$$e(t) * h^{-1}(t) = \theta(t) * h(t) * h^{-1}(t) = \theta(t). \quad (4.15)$$

Оскільки зворотна задача є, в загальному випадку, некоректно поставленою, то вираз $h(t) * h^{-1}(t) = \delta(t)$ не завжди буде виконуватись. Будь-які похибки в оцінці імпульсної характеристики фільтру $h^{-1}(t)$ приведуть до значних похибок у відновленому сигналі.

В реальних вимірюваннях будь-який сигнал на виході термопарі буде містити похибки, які, в загальному випадку, можна описати як шум. Тоді рівняння (4.14) міститиме адитивний шум (4.15).

$$e(t) = \theta(t) * h(t) + n(t). \quad (4.15)$$

В цьому випадку $h^{-1}(t)$ фільтру повинен не тільки коригувати вплив термопарі на вхідний сигнал, але також зменшити шум, який міститься в сигналі термо-ЕРС. Рівняння (4.16) описує дану тезу.

$$e(t) * h^{-1}(t) = (\theta(t) * h(t) + n(t)) * h^{-1}(t) = \theta(t). \quad (4.16)$$

Наявний шум в сигналі термо-ЕРС багаторазово підсилиться при виконанні згортки з фільтром і результатний сигнал $\theta(t)$ буде повністю спотворений і не відповідатиме вхідному сигналу $\theta(t)$.

Застосування цього методу для відновлення імпульсу температури потребує знання імпульсної характеристики термопарі із найменшою похибкою. Сигнал термоЕРС потрібно відфільтрувати для зменшення шуму або апроксимувати з використанням методу найменших квадратів. Також після відновлення сигналу температури його потрібно обробити для позбавлення від похибок які виникли при використанні даної процедури [40].

Проведено оцінювання якості відновлення температурного сигналу шляхом розрахунку приведеної похибки (приведеної до амплітуди температурного сигналу) за формулою:

$$\delta_{\theta} = \frac{|\theta - \hat{\theta}|}{|\theta_{\text{amp}}|} 100$$

де θ — вхідний температурний сигнал, $\hat{\theta}$ — відновлений температурний сигнал, θ_{amp} — амплітуда вхідного сигналу, δ_{θ} — приведена похибка відновлення сигналу. Результати відновлення приведено на рис. 4.11-4.12. Середньоквадратичне відхилення дійсного сигналу температури та відновленого у результаті відновлення становило $\sigma=3,44e^{-13}$. Як бачимо, похибка відновлення відповідає похибці чисельного розрахунку.

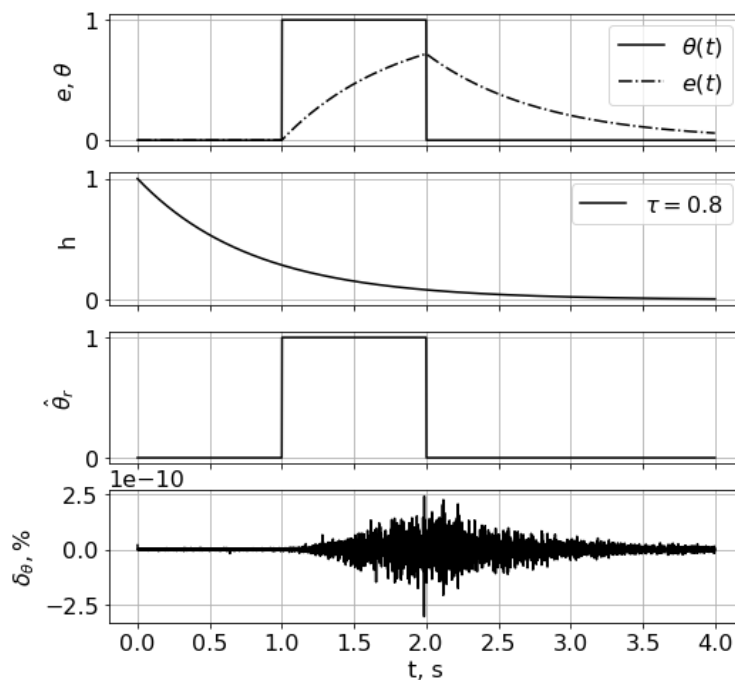


Рисунок 4.11 – Відновлення температурного сигналу за відомими термо-ЕРС та імпульсною характеристикою термопари методом деконволюції [42]

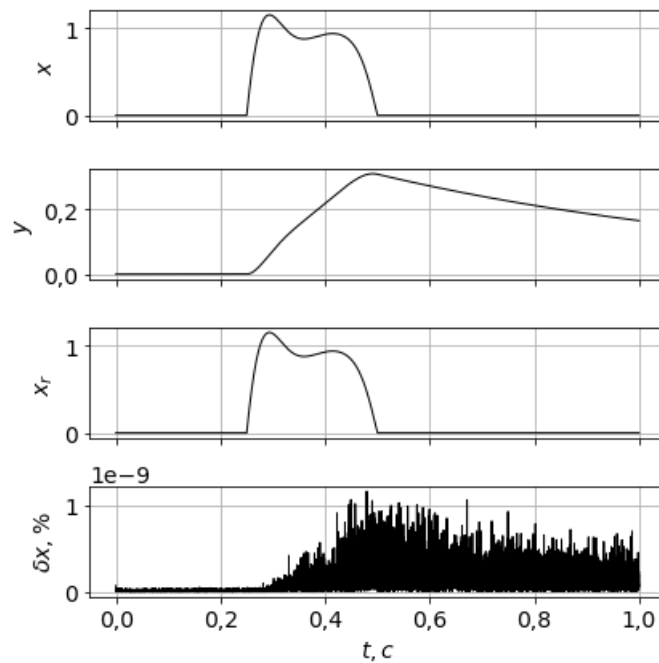


Рисунок 4.12 – Відновлення довільного температурного сигналу при неповному масиві термо-ЕРС [42]

Усі вимірні сигнали містять похибки викликані тими чи іншими чинниками. Проте, оскільки описані у даній роботі методи ідентифікації дозволяють досить точно ідентифікувати динамічні характеристики термопари, то важливим кроком відновлення форми вхідного сигналу залишається зменшення впливу похибок вимірюваного сигналу на результат відновлення [40].

Так, відновлення сигналу температури із використанням викладеного методу, для вхідного імпульсу температури у вигляді модифікованого рівняння Гауса (4.17), показало наступне.

$$\theta(t) = \theta_0 e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (4.17)$$

де θ_0 - амплітуда температурного імпульсу. Для зручності розрахунків приймемо $\theta_0 = 1$. Сам імпульс є частиною досить великої вибірки (рис 4.14). Для цього до і після імпульсу додано нулі для відтворення форми реального сигналу. Величина вибірки $n = 10000$ точок. Тривалість вимірювання — 3 с. Час дискретизації — 0,001 с.

Термопара описувалась імпульсною характеристикою із однією сталою часу, $\tau=0,5$ (4.8); нормалізованою відповідно до $\frac{h_0}{\tau} = 1$.

$$h(t) = \frac{h_0}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (4.8)$$

Вибірка імпульсної характеристики була рівна вибірці температурного сигналу.

Додавши до сигналу термо-ЕРС шум із нормальним законом розподілу із параметрами розподілу $m=0$, $S=0.001\theta_{\text{amp}}$, стандартний метод деконволюції не дозволив відновити сигнал (рис. 4.13) [42].

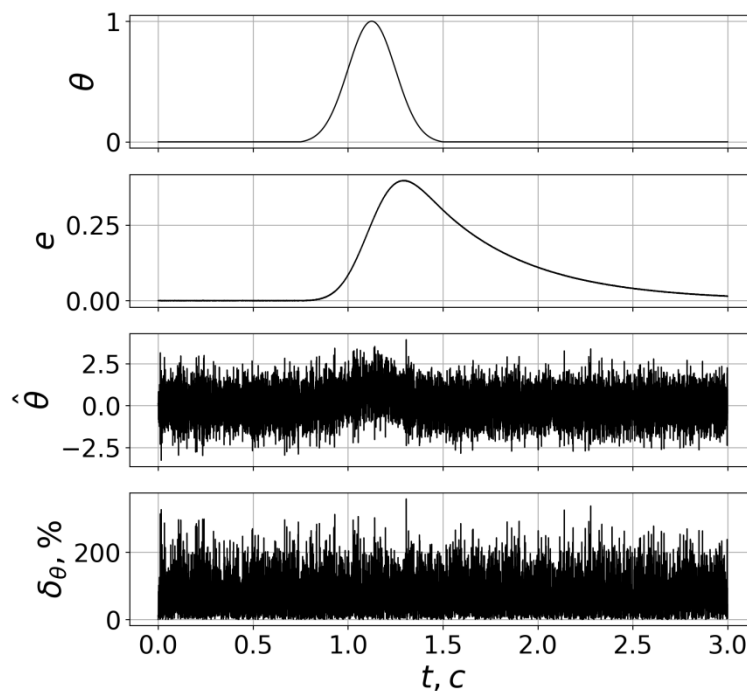


Рисунок 4.13 – Відновлення імпульсу температури за наявності незначного шуму в сигналі термо-ЕРС [42]

Як видно з рис. 4.13 наявність навіть незначних похибок в сигналі термо-ЕРС не дозволяє відновити вхідний температурний імпульс, навіть при точно відомій імпульсній характеристиці термопарі. Для рішення цієї задачі потрібно позбавитись від шуму в сигналі термо-ЕРС. Можливі два підходи до рішення задачі. Перший полягає у фільтруванні сигналу. Другий, у використанні методів апроксимації. У дослідженні використовувався перший підхід, із допомогою фільтру Савіцького-Голея [43-44]. Даний фільтр є

різновидом методів згладжування сигналів. Згладжування відбувається шляхом побудови апроксимаційних поліномів для послідовних наборів сусідніх точок. Для побудови поліномів використовується метод найменших квадратів [42].

На рис. 4.14 зображено результат відновлення сигналу температурного імпульсу. Після використання фільтру і проведення деконволюції відновлений сигнал містить шум. Для збільшення відношення сигнал-шум застосуємо фільтр Савіцького-Голея до відновленого сигналу. В результаті, приведена похибка відновлення імпульсу температури склала 5 % (рис. 4.14) [42].

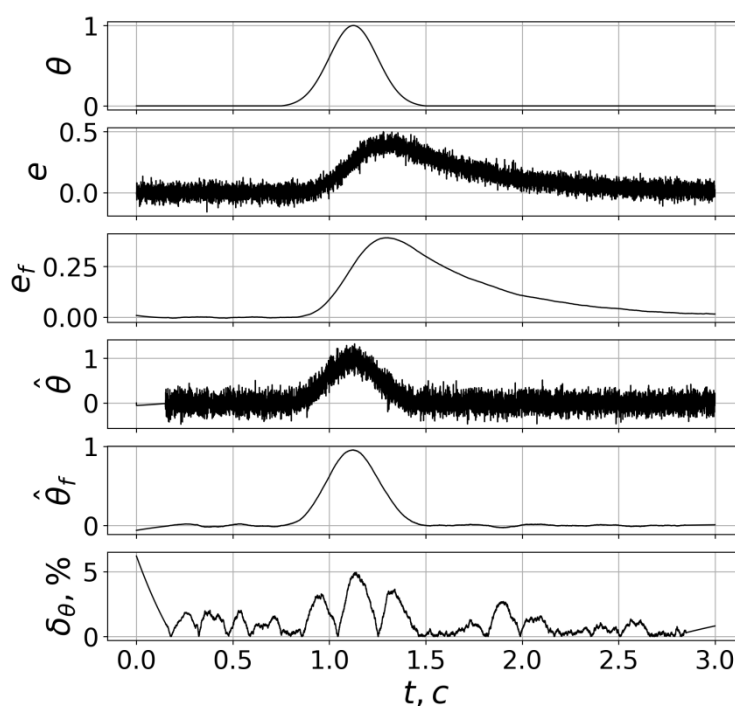


Рисунок 4.14 – Відновлення імпульсу температури з використанням фільтру Савіцького-Голея [42]

Даний метод є ефективним при відомій імпульсній характеристиці терморпарі. Для зменшення похибки відновлення температурного імпульсу можна використовувати методи нелінійної апроксимації.

Для реалізації представленого методу відновлення температурного імпульсу, розроблено портативний пристрій вимірювання температури коротких теплових імпульсів, який зменшує динамічну похибку вимірювання

температури у реальному часі та дозволяє апаратним шляхом виконати відновлення вхідного сигналу шляхом включення у зворотну ланку динамічної характеристики термопари (рис. 4.15).

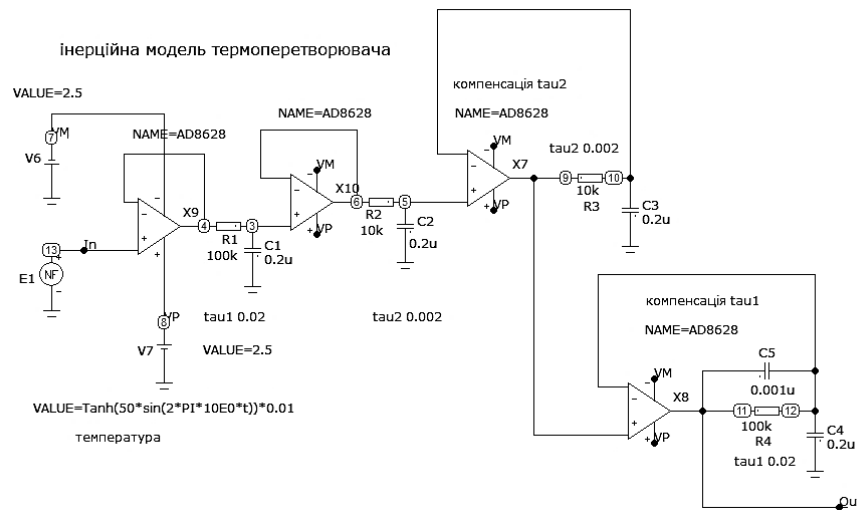


Рисунок 4.15 – Електрична модель портативного вимірювача температури коротких теплових імпульсів

На рис. 4.16 наведено графіки відновлення моделлю портативного вимірювача вхідного температурного імпульсу.

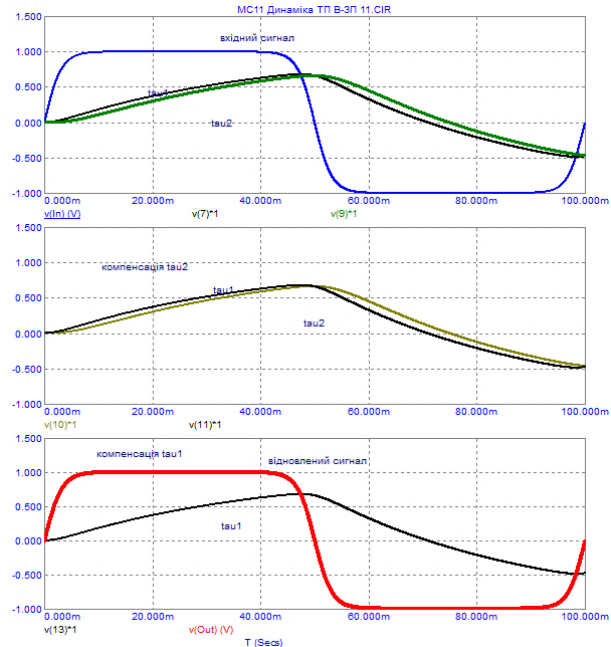


Рисунок 4.16 – Графіки відновлення моделлю портативного вимірювача вхідного температурного імпульсу

Висновки до розділу 4

У розділі розглянуто методи ідентифікації динамічних характеристик термопар із використанням теплового розігріву лазерним променем та електричним струмом.

Розроблений метод розігріву лазерним променем має практичне значення при ідентифікації динамічних характеристик термоперетворювачів різних типів, в широкому діапазоні температур і значень сталих часу термоперетворювачів. Отримані перехідні характеристики містять всю необхідну інформацію для ідентифікації динамічних характеристик термоперетворювачів. Моделі передавальних функцій, отримані даним методом, можна використати для вирішення зворотної задачі вимірювання – знаходження поточної температури вхідного імпульсу за поточним значенням вихідної термоЕРС в перехідному режимі. Даний метод дозволяє підвищити точність вимірювання швидкозмінних високотемпературних процесів.

Досліджено вплив спектрального складу напруги, яка розігріває термопару із термозалежних дротів, на визначення динамічних характеристик термопари у вигляді АФЧХ. Встановлено, що крім очікуваної першої та другої гармонік у напрузі на затискачах термопари, присутня третя гармоніка зумовлена температурною залежністю опору проводів термопар. Напруга третьої гармоніки практично не впливає на розігрів термопари через її не велику питому вагу.

Розроблено метод ідентифікації термопар шляхом визначення АФЧХ термопари за допомогою струму інфранизької частоти, який має перевагу над іншими методами у стабільності отримання значень сталих часу.

Розроблено портативний пристрій вимірювання температури коротких теплових імпульсів, який зменшує динамічну похибку вимірювання температури у реальному часі та дозволяє апаратним шляхом виконати відновлення вхідного сигналу шляхом включення у зворотну ланку динамічної характеристики термопари

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі отримали подальший розвиток методи вимірювання нестационарної температури контактними засобами, за рахунок розвитку методів ідентифікації динамічних характеристик термопар, теоретичного та практичного дослідження нових підходів до ідентифікації динамічних характеристик, які засновані на внутрішньому розігріві термопари гармонічним струмом, але із використанням розроблених методів отримання динамічних характеристик, використання розробленого підходу до відновлення сигналу температури за вимірними значеннями термо-ЕРС, які дозволяють підвищити точність вимірювання температури коротких теплових імпульсів, що є важливим при вимірюванні температури вибухів, при дослідженні систем від'єднання літальних апаратів, зарядів піропатронів, вимірюванні температури газових потоків на виході камер згорання. Основні наукові та практичні результати роботи полягають у наступному.

1. Удосконалено метод ідентифікації динамічних характеристик термопар, заснований на зовнішньому розігріві спаю термопари лазерним променем шляхом створення квазіступінчатого сигналу температури, що дозволяє отримати режим устанавлення сигналу термо-ЕРС на виході термопари.

2. Розроблено та впроваджено метод ідентифікації динамічних характеристик термопар шляхом внутрішнього розігріву спаю термопари струмом гармонічної форми із періодом, що на декілька порядків менший від найменшої передбачуваної сталої часу, що забезпечує дію на спай температурного сигналу у формі стрибка, що дозволяє отримати повну перехідну характеристику.

3. Розроблено та впроваджено метод ідентифікації динамічних характеристик термопар, заснований на визначенні сталих часу термопар шляхом аналізу амплітудо-фазочастотних характеристик термопар по другій гармоніці, яку отримують внутрішнім розігрівом спаю термопари гармонічним струмом. За даними експериментальних досліджень, даний

метод дозволяє отримати відносну стандартну невизначеність найбільшої сталої часу, що не перевищує 0,3%. Використання неповної моделі динамічної характеристики та неврахування інших сталих часу призводить до похибки визначення однієї сталої часу у 8%.

4. Розроблено метод вимірювання поточної температури коротких теплових імпульсів, який відрізняється можливістю відновлювання форми температури короткого теплового імпульсу за вимірними значеннями термо-ЕРС термопари, за рахунок включення у зворотній зв'язок операційного підсилювача апаратурно-реалізованої динамічної характеристики термопари. На відміну від існуючих методів, відносна стандартна невизначеність вимірювання температури короткого теплового імпульсу становить 5%.

5. Для збільшення швидкодії термопари, окрім зменшення маси спаю, доцільно використовувати перехідний режим роботи термопари, із якого, при знанні її динамічних характеристик, можливо установити температуру теплового імпульсу як функцію часу. Доцільно, до документації термопар, окрім статичних додавати їх динамічні характеристики. За даними експериментальних досліджень, динамічна характеристика у вигляді АФЧХ знаходиться із достатньо високою точністю.

6. Результати роботи впроваджені при розробці та виготовленні вимірювальної системи відокремлюваного елемента.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ultrafast Photodetectors. URL: https://www.alphalas.com/images/stories/products/laser_diagnostic_tools/Ultrafast_Photosensors_UPD_ALPHALAS.pdf [Online; accessed 2018-10-29].
2. Спосіб прямого визначення динамічних характеристик термоперетворювачів: пат. 95326 Україна. № 201405589; заявл. 26.05.2014; опубл. 25.12.2014, Бюл. № 24.
3. Устройство для определения динамических характеристик поверхностных термометров сопротивления: авт.св-во 161539 СССР, G 01 K 15/00. № 826108/26–10; заявл. 21.03.1963; опубл. 19.03.1964, Бюл.№7.
4. Устройство для определения динамических характеристик термоприемников: авт.св-во 581391 СССР, G 01 K 15/00. № 2035376/18–10; заявл. 17.06.1974; опубл. 25.11.1977, Бюл.№43.
5. Способ калибровки и поверки датчиков температурных пульсаций: авт.св-во 365590 СССР, G01K 15/00, G01K 7/02. № 1419535/18–10; заявл. 31.03.1970; опубл. 08.01.1973, Бюл.№6.
6. Hashemian H.M. Maintenance of process instrumentation in nuclear power plants / H.M. Hashemian. - Springer, 2006. - 308 p.
7. Research on measuring time constant of NANMAC thermocouple / Feng Hao [et al.] / Journal of Measurement Science and Instrumentation. – China: 2014. – 5(4). – P. 1-4.
8. Туз Ю.М. Еталонні теплові випромінювачі./ Ю. М. Туз, С. А. Шурпач, О. В. Козир // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах: матеріали XIII міжнар. наук.-техн. конференції (6-12 червня 2014 р., м. Одеса); Одес. нац. акад. зв'язку ім. О.С.Попова. – Одеса-Хмельницький: ХНУ, 2014. – 4 с.
9. Zhang Z. Radiometric Temperature Measurements. I. Fundamentals / Z. Zhang, B. Tsai, G. Machin. // Experimental Methods in the Physical Sciences. – Academic Press, 2009. – Vol. 42. – 376 p.

10. Туз Ю. М. Вимірювання температури полум'я оптичними методами / Ю. М. Туз, О. В. Козир // Наук.-техн. конф. викладачів, науковців, аспірантів та студентів присвячена Дню Науки – 2014, 26-28 травня 2014 р.: зб. тез доп. – К., 2014. – С. 85-88.

11. Infrared Thermometer Handbook. URL: https://www.lumasenseinc.com/uploads/Products/Technology_Overview/Technical_Literature_pdf/EN-Infrared-Thermometer_Handbook.pdf [Online; accessed 2018-12-02].

12. IR Temperature Sensing — Pyrometry. URL: <https://www.lumasenseinc.com/EN/products/technology-overview/our-technologies/irtemp-pyrometry/infrared-temperature-sensing-pyrometry.html> [Online; accessed 2018-12-02].

13. Магунов А. Н. Спектральная пирометрия (обзор) / А. Н. Магунов // Приборы и техника эксперимента. –2009.–№4. – С. 5–28.

14. NTC thermistor. URL: <http://www.resistorguide.com/ntc-thermistor/> [Online; accessed 2018-11-03].

15. What Is An NTC Thermistor. URL: <https://www.ametherm.com/thermistor/what-is-an-ntc-thermistor> [Online; accessed 2018-11-03].

16. Вимірювання температури: теорія та практика. / Я.Т. Луцик, О.П. Гук, О.І. Лах, Б.І. Стадник. – Львів: Видавництво «БескидБіт», 2006. – 560 с.

17. Nicholas J. V. Traceable temperatures. 2nd ed. / J. V. Nicholas, D. R. White. – John Wiley & Sons Ltd, 2001. – 441 p.

18. Туз. Ю.М. Автоматизація аналізу вимірювальних пристроїв [Текст]: Монографія / Ю.М. Туз, Ю.С. Шумков, О.В. Козир// За заг. ред. Ю.М. Туза. – К.: «Корнійчук», 2014. – 172 с

19. ДСТУ ГОСТ 8.009:2008 (ГОСТ 8.009-84, IDT). Державна система забезпечення єдності вимірювань. Нормовані метрологічні характеристики засобів вимірювань [Текст]. – Чинний від 2008-10-01. – М.: Стандартиформ, 2006. – 26 с.

20. Похил П. Ф. Методы исследования процессов горения и детонации / П. Ф. Похил, В. М. Мальцев, В. М. Зайцев. М.: Наука, 1969. – 301 с.

21. Радченко С. Г. Применение ЛПт равномерно распределенных последовательностей для решения прикладных задач моделирования / С. Г. Радченко, О. В. Козир // Математичні машини і системи. – 2014. - № 1. – С. 151-158.

22. Соболев И.М. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями / И.М. Соболев, Р.Б. Статников. – [2-е изд., перераб. и доп.]. – М.: Дрофа, 2006. – 175 с. Розділ-2-2. Соболев И.М. Многомерные квадратурные формулы и функции Хаара / Соболев И.М. – М.: Физматлит, 1969. – 288 с.

23. Радченко С.Г. Методология регрессионного анализа / Радченко С.Г. – К.: Корнійчук, 2011. – 376 с.

24. Радченко С. Г. Планы экспериментов для получения моделей высокой точности / С. Г. Радченко, О. В. Козир // Математичні машини і системи. – 2014. - № 2. – С. 117-127.

25. Анго Андре. Математика для электро- и радиоинженеров/ А. Анго. – М. : Издательство “Наука”, 1965. – 780 с.

26. Справочник по радиотехнике в трех томах / Под общей ред. А. А. Куликовского // Том 1. - Энергия, 1967. - 648 с.

27. Ярышев Н. А. Теоретические основы измерения нестационарной температуры / Н. А. Ярышев. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. – 256 с. – (2-е изд., перераб.).

28. Eroding Junction Thermocouple – Maintenance. [Электронный ресурс] : [Веб-сайт]. – Електронні дані. – NANMAC Corporation. – Режим доступу: <https://growwithimg.wpengine.com/nanmac/wp-content/uploads/sites/53/2017/11/eroding-thermocouple-maintenance.pdf> (дата звернення 29.07.2018) – Назва з екрану.

29. OMEGA ENGINEERING, INC. [Електронний ресурс] : [Веб-сайт]. – Електронні дані. – OMEGA Engineering 2003-2018. – Режим доступу: <https://www.omega.com/techref/ThermocoupleResponseTime.html> (дата звернення 19.07.2018) – Назва з екрана.
30. Jones E, Oliphant E, Peterson P, et al. SciPy: Open Source Scientific Tools for Python, 2001-, <http://www.scipy.org/> [Online; accessed 2018-08-03].
31. Travis E, Oliphant. A guide to NumPy, USA: Trelgol Publishing, (2006).
32. Jupyter Notebooks – a publishing format for reproducible computational workflows / Thomas Kluyver [et al] // Ebook: Positioning and Power in Academic Publishing: Players, Agents and Agendas. - 2016. - P. 87-90. - DOI:10.3233/978-1-61499-649-1-87
33. Fernando Pérez, Brian E. Granger, IPython: A System for Interactive Scientific Computing, Computing in Science and Engineering, vol. 9, no. 3, pp. 21-29, May/June 2007, doi:10.1109/MCSE.2007.53. URL: <https://ipython.org>
34. Hunter J.D. Matplotlib: A 2D graphics environment / J.D. Hunter // Computing In Science & Engineering. - Vol. 9, Issue 5. - P. 90–95. - DOI:10.1109/MCSE.2007.55.
35. Ідентифікація статичних та динамічних характеристик термоперетворювачів : автореф. дис ... канд. техн. наук : 05.11.04 / Володимир Петрович Столярчук . – Львів : Б.В., 2012 . – 19 с.
36. Туз Ю.М. Автоматизированная система идентификации динамических параметров термопар / Ю.М. Туз, О.В. Козырь, А.В. Порхун // «Инженерные и научные приложения на базе технологий NI NIDays-2015»: Сборник трудов XIV международной научно-практической конференции, Москва 27 ноября 2015 г. – М.: ДМК-пресс, 2015. С. 237-239.
37. Tesyk Yu.F. Investigation of characteristics of precision amplifiers / Yu.F. Tesyk, R.M. Moroz, Yu.M. Tuz, O.V. Kozyr // Technical Electrodynamics. Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine. - No 6, 2020. P. 87 – 93. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.06.087>

38. Туз Ю. М. Особливості вимірювання температури коротких теплових імпульсів / Ю. М. Туз, О. В. Козир // XII Міжнародна науково-технічна конференція «МЕТРОЛОГІЯ ТА ВИМІРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА (МЕТРОЛОГІЯ – 2020) (СЕКЦІЯ 7. ТЕРМОМЕТРІЯ), 6–8 жовтня 2020 р. Харків. : тези доп. / Національний науковий центр «Інститут метрології». – Харків, 2020. – С. 106

39. Туз Ю. М. Ідентифікація динамічних характеристик термоперетворювачів / Ю.М. Туз, О.В. Козир, Т.В. Червона // Механіка гіроскопічних систем. – 2015. - № 30. С. 53-61, DOI: <https://doi.org/10.20535/0203-377130201570288>.

40. Козир О.В. Вимірювання нестационарної температури контактним методом / О.В. Козир // Інформаційні системи, механіка та керування. - 2017. - № 17. С. 134-143. DOI: <https://doi.org/10.20535/2219-3804172017100686>
<http://ismc.kpi.ua/article/view/100686>

41. Туз Ю. М. Спосіб визначення динамічних характеристик термопар за допомогою радіоімпульсу струму / Ю. М. Туз, О. В. Козир, А. В. Порхун. // Системи обробки інформації. – 2016. – №6. – С. 164–166.

42. Козир О.В. Відновлення форми температурного імпульсу за допомогою метод деконволюції/ О.В. Козир // Механіка гіроскопічних систем. - 2017. - № 34. С. 89-97. DOI: <https://doi.org/10.20535/0203-3771342017130269> <http://mgsys.kpi.ua/article/view/130269>

43. Savitzky A. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures / A. Savitzky, M. J.Golay // Anal. Chem. - 1964. Vol. 36. Pp. 1627–1639.

44. Madden H. Comments on the Savitzky-Golay convolution method for least squares fit smoothing and differentiation digital data / H. Madden // Anal. Chem. 1978. Vol. 50. Pp. 1383–1386.

45. Туз Ю.М. Безконтактные методы измерения температуры пламени / Ю.М. Туз, С.А. Шурпач, О.В. Козырь // Метрологія та прилади. – 2014. – № 1, II (45). С. 228—233.

46 Туз Ю. М. Автоматизація аналізу вимірювальних пристроїв / Ю. М. Туз, О. В. Козир // X Міжнар. наук. техн. конф. «Метрологія та вимірювальна техніка», 5–7 жовт. 2016 р., Харків : тези доп. / ННЦ Інститут метрології. – Харків, 2016. – С. 48–49.

47. Туз Ю, М. Автоматизація аналізу вимірювальних пристроїв / Ю. М. Туз, О. В. Козир // Механіка гіроскопічних систем. – 2016. - № 31. С. 87-94. DOI: <http://dx.doi.org/10.20535/0203-377131201683588>

48. Козир О.В. Математичне моделювання перехідних характеристик термопар / О.В. Козир // Інформаційні системи, механіка та керування. – 2018. - № 19. С. 101-114. <https://doi.org/10.20535/2219-3804192018162296>
<http://ismc.kpi.ua/article/view/162296>

49. Козир О.В. Дослідження моделей перехідної характеристики термопар / О. В. Козир, Ю. М. Туз // Механіка гіроскопічних систем. – 2019. № 20. С. 13-22. <https://doi.org/10.20535/2219-3804202019194307>

50. Туз Ю.М. Математична модель формування випробувальних сигналів експоненціальними сплайнами / Ю. М. Туз, Ю. С. Шумков, О. В. Козир // «Technical Using of Measurement-2020»: Тези доповідей VI Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених у царині інформаційно-вимірювальних технологій та метрології, 4–7 лютого 2020 року. Академія метрології України. – Львів: ТЗОВ «Галицька видавнича спілка», 2020. – С. 152-156.

51. Спосіб визначення динамічних характеристик термоперетворювачів: пат. 109832 Україна. № 201602293; заявл. 10.03.2016; опубл. 12.09.2016, Бюл. № 17. 4 с.

52. Пристрій для визначення динамічних характеристик термопар: пат. 110516 України. № 201604176; заявл. 15.04.2016; опубл. 10.10.2016, Бюл. № 19. 4 с.

53. Спосіб визначення динамічних характеристик термоперетворювачів: пат. 110515 України. № 201604174; заявл. 15.04.2016; опубл. 10.10.2016, Бюл. № 19. 4 с.

54. Пристрій для визначення динамічних характеристик термоперетворювачів: пат. 112499 України. № 201604190; заявл. 18.04.2016; опубл. 26.12.2016, Бюл. № 24. 4 с.

ДОДАТОК А
СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА ВІДОМОСТІ ПРО
АПРОБАЦІЮ РОБОТИ

Публікації у фахових видання категорії «А»:

1. Tesyk Yu.F. Investigation of characteristics of precision amplifiers / Yu.F. Tesyk, R.M. Moroz, Yu.M. Tuz, O.V. Kozyr // Technical Electrodynamics. Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine. - No 6, 2020. P. 87 – 93. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.06.087> .
(Наукометрична база **Scopus**)

Публікації у фахових виданнях:

2. Туз Ю.М. Безконтактные методы измерения температуры пламени / Ю.М. Туз, С.А. Шурпач, О.В. Козыр // Метрологія та прилади. – 2014. – № 1, II (45). С. 228—233.

3. Радченко С. Г. Применение равномерно распределенных последовательностей для решения прикладных задач моделирования / С. Г. Радченко, О. В. Козир // Математичні машини і системи. – 2014. - № 1. – С. 151-158.

4. Радченко С. Г. Планы экспериментов для получения моделей высокой точности / С. Г. Радченко, О. В. Козир // Математичні машини і системи. – 2014. - № 2. – С. 117-127.

5. Туз Ю. М. Спосіб визначення динамічних характеристик термопар за допомогою радіоімпульсу струму / Ю. М. Туз, О. В. Козир, А. В. Порхун. // Системи обробки інформації. – 2016. – №6. – С. 164–166.
http://nbuv.gov.ua/UJRN/soi_2016_6_44

6. Козир О.В. Вимірювання нестационарної температури контактним методом / О.В. Козир // Інформаційні системи, механіка та керування. - 2017. - № 17. С. 134-143. DOI: <https://doi.org/10.20535/2219-3804172017100686>,
<http://ismc.kpi.ua/article/view/100686> .

7. Козир О.В. Відновлення форми температурного імпульсу за допомогою метод деконволюції/ О.В. Козир // Механіка гіроскопічних систем. - 2017. - № 34. С. 89-97. DOI: <https://doi.org/10.20535/0203-3771342017130269>, <http://mgsys.kpi.ua/article/view/130269> .

8. Козир О.В. Математичне моделювання перехідних характеристик термопар / О.В. Козир // Інформаційні системи, механіка та керування. – 2018. - № 19. С. 101-114. <https://doi.org/10.20535/2219-3804192018162296> , <http://ismc.kpi.ua/article/view/162296> .

9. Козир О.В. Дослідження моделей перехідної характеристики термопар / О. В. Козир, Ю. М. Туз // Механіка гіроскопічних систем. – 2019. № 20. С. 13-22. <https://doi.org/10.20535/2219-3804202019194307>

Монографії:

10. Автоматизація аналізу вимірювальних пристроїв: монографія / Туз Ю.М., Шумков Ю.С., Козир О.В. – Київ, 2014. – 172 с.

Патенти:

11. Спосіб визначення динамічних характеристик термоперетворювачів: пат. 109832 Україна. № 201602293; заявл. 10.03.2016; опубл. 12.09.2016, Бюл. № 17. 4 с.

12. Пристрій для визначення динамічних характеристик термопар: пат. 110516 України. № 201604176; заявл. 15.04.2016; опубл. 10.10.2016, Бюл. № 19. 4 с.

13. Спосіб визначення динамічних характеристик термоперетворювачів: пат. 110515 України. № 201604174; заявл. 15.04.2016; опубл. 10.10.2016, Бюл. № 19. 4 с.

14. Пристрій для визначення динамічних характеристик термоперетворювачів: пат. 112499 України. № 201604190; заявл. 18.04.2016; опубл. 26.12.2016, Бюл. № 24. 4 с.

Матеріали конференцій:

15. Туз Ю. М. Особливості вимірювання температури коротких теплових імпульсів / Ю. М, Туз, О. В. Козир // XII Міжнародна науково-технічна конференція «МЕТРОЛОГІЯ ТА ВИМІРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА (МЕТРОЛОГІЯ – 2020) (СЕКЦІЯ 7. ТЕРМОМЕТРІЯ), 6–8 жовтня 2020 р. Харків. : тези доп. / Національний науковий центр «Інститут метрології». – Харків, 2020. – С. 106

16. Туз Ю. М. Вимірювання температури полум'я оптичними методами / Ю. М. Туз, О. В. Козир // Наук.-техн. конф. викладачів, науковців,

аспірантів та студентів присвячена Дню Науки – 2014, 26-28 травня 2014 р.: зб. тез доп. – К., 2014. – С. 85-88.

17. Козир О.В. Вимірювання імпульсу температури термопарами / О.В. Козир // XXI наук.-техн. конф. студ. та молодих учених «Гіротехнології та конструювання літальних апаратів»: Тези доп. учасн. – К.: ІВЦ “Видавництво «Політехніка»”, 2018. – С. 33 – 34.

18. Туз Ю.М. Автоматизація аналізу вимірювальних пристроїв / Ю.М. Туз, О.В. Козир // X Міжнар. наук. техн. конф. «Метрологія та вимірювальна техніка», 5–7 жовт. 2016 р., Харків : тези доп. / ННЦ Інститут метрології. – Харків, 2016. – С. 48–49.

19. Туз Ю.М. Математична модель формування випробувальних сигналів експоненціальними сплайнами / Ю. М. Туз, Ю. С. Шумков, О. В. Козир // «Technical Using of Measurement-2020»: Тези доповідей VI Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених у царині інформаційно-вимірювальних технологій та метрології, 4–7 лютого 2020 року. Академія метрології України. – Львів: ТзОВ «Галицька видавнича спілка», 2020. – С. 152-156.

20. Козир О.В. Вимірювання нестационарної температури високотемпературних газових потоків / О. В. Козир // XI Міжнар. наук.-техн. конф. «Гіротехнології, навігація, керування рухом керування рухом і конструювання авіаційно-космічної техніки» (секція Інформаційні технології), 13-14 квітня 2017 р., Київ : збір. доп. / КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ, 2017. –С 68 – 71.

Особистий внесок здобувача.

Наукові положення та результати, викладені в дисертації, отримані автором особисто. Роботи [6-8, 17, 20] виконані без співавторів. У наукових працях, опублікованих у співавторстві, автору належить: у роботі [1] - дослідження прецизійних підсилювачів; [2] – аналіз та класифікація методів вимірювання температури; [3-4] – розробка планів експериментів на основі ЛПтау рівномірно розподілених послідовностей для пошуку оптимальних значень параметрів моделей та їх статистичне дослідження; [5, 11-12] –

розробка методу та системи ідентифікації динамічних характеристик на основі використання радіоімпульсу струму; [9] – дослідження динамічних моделей термопар; [10] – дослідження методів автоматизації аналізу моделей термоперетворювачів; [13-14] – розроблено та досліджено метод та пристрій ідентифікації динамічних характеристик термопар із використанням квазіступінчатого лазерного променя; [15] – розробка та дослідження методу ідентифікації динамічних характеристик термопар на основі АФЧХ по другій гармоніці, шляхом розігріву термопар гармонічним струмом інфранизької частоти; [16] - досліджено оптичні методи вимірювання температури полум'я; [18] – досліджено властивості визначників, створено рівняння похибок в матричній формі з можливістю точного представлення сумарної похибки незалежно від розміру похибок складових структурної схеми; [19] - досліджено моделі випробувальних сигналів на основі експоненціальних сплайнів.

ДОДАТОК Б
АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ ТА ВИКОРИСТАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ
ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Затверджую
Директор корпорації "Науковий парк
"Київська Політехніка"



Віктор Камаєв

«26» січня 2021 р.

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи
старшого викладача кафедри інформаційно-вимірювальних
технологій КПІ ім. Ігоря Сікорського
Козиря Олега Васильовича

Даним актом підтверджується, що методи ідентифікації динамічних характеристик термопар та метод вимірювання температури коротких теплових імпульсів, який розроблений старшим викладачем кафедри інформаційно-вимірювальних технологій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Козирем Олегом Васильовичем у рамках виконання його кандидатської дисертації, використано при створенні інформаційно-вимірювальної системи збору та аналізу параметрів польоту відокремлюваного елемента у рамках договору Договором №27/01-НП між корпорацією "Науковий парк "Київська Політехніка" м. Київ та КБ «Південне» м. Дніпро, що діяв протягом 2015 – 2017 років.

Розроблені методи визначення динамічних характеристик термопар забезпечують вимірювання температури коротких теплових імпульсів у перехідному режимі, коли вихідна ЕРС термопари запізнюється відносно часової характеристики температури вибуху. Розроблений автором метод використовувався для вимірювання температури вибуху піропатрону, системи від'єднання елемента від ракетносія, що дозволило підвищити точність вимірювання траєкторії польоту відокремлюваного елемента.

Головний конструктор
робіт за договором №27/01-НП

Самарцев Ю.М.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Декан приладобудівного факультету
 Національного технічного університету
 України «Київський політехнічний
 інститут імені Ігоря Сікорського»
 доктор технічних наук, професор
 Григорій ТИМЧИК



2021 р.

АКТ

впровадження у навчальний процес результатів дисертаційної роботи старшого викладача кафедри інформаційно-вимірювальних технологій Козиря Олега Васильовича за темою «Підвищення точності вимірювання температури коротких теплових імпульсів»

Комісія у складі завідувача кафедри ІВТ, д.т.н., професора Єременка В.С., професора кафедри ІВТ, д.т.н., доц. Шевченка К.Л., доцента кафедри ІВТ, к.т.н., доц. Самарцева Ю.М. склала цей акт про використання результатів дисертаційної роботи Козиря О.В. у навчальному процесі кафедри інформаційно-вимірювальних технологій КПІ ім. Ігоря Сікорського.

Розроблені методи ідентифікації динамічних характеристик термодпар та метод вимірювання температури коротких теплових імпульсів, моделюючі програми та програмне забезпечення автоматизації аналізу вимірювальних пристроїв, експериментальні установки для ідентифікації динамічних характеристик термодпар використовуються при проведенні лекційних та лабораторних занять із дисциплін «Методи та засоби вимірювань-3. Автоматизація аналізу вимірювальних пристроїв», «Структурно-алгоритмічні методи підвищення точності», «Програмні засоби аналізу даних», «Комп'ютерне моделювання» та у дипломному проектуванні за спеціальністю 152 - Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка.

Голова комісії _____, д.т.н., проф.. Володимир ЄРЕМЕНКО

Члени комісії _____, д.т.н., доц. Костянтин ШЕВЧЕНКО

_____, к.т.н., доц. Юрій САМАРЦЕВ