

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**КОЧАН ОРЕСТ ВОЛОДИМИРОВИЧ**

УДК 536.532

**МЕТОДИ І ЗАСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ  
ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИМИ  
ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ З НЕОДНОРІДНИМИ ТЕРМОПАРАМИ**

Спеціальність 05.11.04 – прилади і методи вимірювання теплових величин

05 «Технічні науки»  
(галузь знань)

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на інше джерело  
\_\_\_\_\_ О.В.Кочан

Науковий консультант: Микийчук Микола Миколайович, доктор технічних  
наук, професор

*Ідентичність всіх примірників дисертації*

**ЗАСВІДЧУЮ:**

*Учений секретар*

*спеціалізованої*

*вченої ради*

*/ Я.Т. Луцик/*

Львів – 2020

## АНОТАЦІЯ

**Кочан О. В. Методи і засоби підвищення точності вимірювання температури термоелектричними перетворювачами з неоднорідними термопарами.** Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.11.04 – прилади і методи вимірювання теплових величин – Національний університет "Львівська політехніка", Львів, 2020.

У дисертації отримали подальший розвиток теоретичні засади термоелектричних явищ, що дало змогу виявити явище заміщення похибкою від набутої термоелектричної неоднорідності похибки від дрейфу функції перетворення термопар при зміні профілю температурного поля вздовж їх електродів. Це дало змогу запропонувати новий підхід до метрологічного забезпечення вимірювання температури за допомогою термопар, що мають значну, набуту при тривалій експлуатації при високих температурах, термоелектричну неоднорідність. Розроблено нові методи визначення їх похибки та діагностування стану їх електродів у процесі експлуатації без їх демонтажу та використання робочих еталонів. Також теоретично, імітаційним моделюванням та експериментальними дослідженнями оцінено властивості запропонованих методів, показано що вони дають змогу одночасно підвищити єдність, точність, метрологічну надійність та автономність, а також ефективність вимірювання температури у важливому для енергетики та промисловості діапазоні температур 600 - 1100°C.

**Наукова новизна** одержаних результатів полягає у наступному:

- 1) Вперше запропоновано нову концепцію бездемонтажного калібрування термоелектричного перетворювача для успішної реалізації якої необхідно і достатньо виділити на його термопарі ділянку, в межах якої не відбуваються деградаційні зміни питомої термо-е.р.с., що дає змогу використати цю ділянку для оперативного визначення похибки шляхом цілеспрямованого переміщення зони температурного градієнту у сторону опорної ділянки.
- 2) Отримала подальший розвиток модель, що описує зміни термо-е.р.с.

неоднорідної термопари внаслідок зміни розподілу температури вздовж її електродів, що дало змогу встановити закономірність, яка відображає зв'язок між поточними і максимальними значеннями похибок дрейфу і неоднорідності.

3) Вперше запропоновано оперативний метод визначення похибки термоелектричного перетворювача у процесі експлуатації, зумовленої дрейфом функції перетворення термопари, за допомогою опорної ділянки шляхом цілеспрямованого зміщення зони температурного градієнту таким чином, щоб цей градієнт був прикладений лише до опорної ділянки термопари.

4) Вперше запропоновано оперативний метод діагностування стану електродів термопари у процесі експлуатації, який, завдяки цілеспрямованим змінам температурного поля вздовж її електродів, дає змогу визначити шляхом рішення системи лінійних рівнянь за методом сукупних вимірювань питомому термо-е.р.с. віртуальних ділянок, на які розбита термопара та визначити ступінь їх деградації, щоб зробити обґрунтований висновок про придатність термопари для подальшої експлуатації.

5) Вперше запропоновано метод керування профілем температурного поля за допомогою штучної нейронної мережі несхильний до самозбудження, що забезпечує зменшення тривалості встановлення заданого профілю температурного поля до однієї-двох ітерацій завдяки реалізації розімкнутої системи керування та навчання нейронної мережі безпосередньо на об'єкті керування.

6) Набула подальшого розвитку модель похибки термопари, яка описує залежність похибки термопари від температури та тривалості експлуатації, а також значення температури після зміни профілю температурного поля, що дозволяє спрогнозувати термін придатності термопари до використання.

7) Вперше запропоновано структуру двоконтурної системи вимірювання температури, яка, за рахунок почергової зміни функцій контурів (вимірювання та керування температурною об'єкта або корекція похибок і діагностування стану електродів термопари) забезпечує похибку вимірювання температури в

межах  $1,3^{\circ}\text{C}$  для термопар типу хромель-алюмель.

8) Вперше запропоновано метод встановлення функції перетворення термоелектричного перетворювача за рахунок введення двох додаткових виводів термопари, що дає змогу експериментально підтвердити ефективність запропонованих методів.

**Практична цінність** одержаних результатів полягає у наступному:

1. Відібрано схемотехнічні рішення, які, при використанні у високоточному вимірювальному каналі температури, забезпечують виконання умови, що після корекції похибок термопар їх невиключена похибка повинна залишитися домінуючою;
2. Розроблено конструктивну схему багатозонної печі з керованим профілем температурного поля та оцінено необхідну потужність її нагрівачів і час встановлення профілю температурного поля;
3. Розроблено конструкцію спеціалізованого термоелектричного перетворювача з керованим профілем температурного поля (ТЕП з КПТП), що використовує лише одну нестандартну деталь і забезпечує оперативне діагностування стану своїх електродів;
4. Вдосконалено метрологічний програмний тест каналу вимірювання температури, що дає змогу провести імітаційне моделювання розроблених методів підвищення точності вимірювання температури;
5. Модернізовано спеціалізований стенд для експериментального дослідження розроблених методів підвищення точності вимірювання температури;
6. Отримано результати експериментальних досліджень розроблених методів одночасного підвищення єдності, точності, метрологічної надійності та автономності, а також ефективності вимірювання температури.
7. Показано, що метод визначення термо-е.р.с. ТП з використанням ефекту Пельтьє вимагає дуже високої точності вимірювання термо-е.р.с. ТП та дає змогу оцінити поточні значення похибки ТП лише у зоні її злуту, а не у зоні, яка потрапляє у максимальний градієнт температурного поля та генерує

основну термо-е.р.с.

**У першому розділі** проаналізовано вплив набутої термоелектричної неоднорідності електродів термопар (ТП) на похибку вимірювання температури. Показано, що відомі методи вимірювання підвищених температур (від 600 до 1100°C) за допомогою ТП мають великі похибки через деградацію їх електродів при дії температури і часу експлуатації. Деградація проявляє себе як: 1) похибка від дрейфу функції перетворення (ФП) ТП, тобто поступової зміни ФП ТП під час експлуатації; 2) похибка від набутої при експлуатації термоелектричної неоднорідності – зміни генерованої термо-е.р.с. при зміні профілю температурного поля вздовж електродів ТП (коли вимірювана температура та температура вільних кінців постійні). Остання похибка для найбільш вживаних ТП типу ХА може сягати 11 – 30°C. Вона прихована при експлуатації, тому дуже небезпечна і різко знижує ефективність методів корекції похибки від дрейфу ФП ТП. Методи зменшення похибки ТП спираються на визначення похибки або у різних профілях температурного поля, або на місці експлуатації за допомогою робочого еталону або репера температури. Вони мають високу трудомісткість і використовують еталони у робочих умовах. Треба розробити оперативний метод визначення похибки ТП при їх експлуатації. Аналіз циклу Карно показав високу ефективність такого методу (зокрема, шляхом підвищення коефіцієнта корисної дії теплових електростанцій). Але для відомого методу на базі ефекту Пельтьє не проведено аналіз похибок. Аналіз показав, що для вирішення проблеми точного вимірювання температури неоднорідними ТП слід провести додаткові теоретичні дослідження їх поведінки у температурних полях різного профілю.

**У другому розділі** показано, що метод на базі ефекту Пельтьє вимагає вимірювання мілівольтової напруги з похибкою менше 0,001%, що неприйнятно для промисловості. Розроблена концепція одночасного підвищення єдності, точності, метрологічної надійності та автономності, а також ефективності вимірювання температури за допомогою ТП, яка

спирається на "опорну ділянку", що не деградує (зберігає початкову ФП) бо прилягає до вільних кінців (експлуатується при їх температурі). Для цього визначено загальні залежності зміни ФП ТП під час деградації, проведено теоретичні дослідження поведінки неоднорідних ТП під час зміни профілю температурного поля, показано, що абсолютні максимальні значення похибок від дрейфу ФП ТП та від набутої термоелектричної неоднорідності рівні, а при поступовому пересуванні профілю температурного поля вздовж електродів ТП у сторону вільних кінців похибка від набутої термоелектричної неоднорідності поступово заміщає похибку від дрейфу ФП ТП. Це показує зв'язок між цими похибками як різними проявами однієї причини – деградації електродів ТП при експлуатації. Числове моделювання процесу заміщення підтверджує це явище. Це дало змогу розробити оперативний метод визначення поточної похибки ТП при експлуатації (без її переривання) та без необхідності використання еталонних засобів (при умові визначення похибки ТП перед експлуатацією за допомогою еталонної ТП), що полягає у максимальній зміні профілю температурного поля (поле експлуатації виноситься у сторону вільних кінців так, що у зону градієнту потрапляють лише ділянки ТП, які при експлуатації перебувають при температурі вільних кінців). Єдиною вимогою є сталість температури з'єднання під час визначення поточної похибки ТП. Аналіз показав, що, залежно від розряду еталонної ТП, похибка вимірювання температури не перевищує 1,1 і 1,3°C. Моделювання показало, що максимальний вплив на невиключену похибку вимірювання температури має випадкова похибка каналу вимірювання термо-е.р.с.

**У третьому розділі** розроблено оперативний метод діагностування стану електродів ТП під час експлуатації без необхідності використання еталонних засобів шляхом поступового зміщення профілю температурного поля у сторону вільних кінців. Як міру ступеня деградації електродів ТП запропоновано еквівалентний час експлуатації, що врахує невідповідність швидкості деградації ділянок ТП у даних умовах і в умовах її дослідження при побудові моделі її похибки. При жорстких умовах експлуатації цей час

більший за фізичний, при сприятливих – менший. Для їх визначення складають систему рівнянь (кожне з них відповідає одному профілю температурного поля), рішенням якої будуть значення похибки віртуальних ділянок ТП. Розроблена методика опрацювання даних і проаналізовано різні співвідношення еквівалентних часів експлуатації ділянок. Імітаційне моделювання впливу зовнішніх факторів показало необхідність зменшення похибки керування профілем температурного поля. Проведені дослідження дали змогу розробити спеціалізований термоелектричний перетворювач із самодіагностуванням.

Таким чином, виявлене явище заміщення похибки від дрейфу ФП ТП похибкою від набутої неоднорідності при цілеспрямованих змінах профілю температурного поля вздовж електродів ТП формує нову методологію експлуатації ТП, що спирається на розроблені оперативні методи визначення поточної похибки ТП та діагностування стану її електродів.

**У четвертому розділі** розроблено засоби апаратного, методичного, математичного та системотехнічного забезпечення розроблених оперативних методів. Розроблено: 1) багатозонну трубчасту піч – засіб керування профілем температурного поля стандартного термоелектричного перетворювача; 2) високоточний нейромережевий метод керування профілем температурного поля, не схильний до самозбудження; 3) нейромережеву багатомірну модель похибки ТП за обмеженим обсягом експериментальних даних; 4) структури двоконтурних систем, у яких розроблені методи реалізуються у контурі, що не входить у контур регулювання термоагрегатом і не розхитує систему керування об'єктом. Відібрані кращі технічні рішення компонентів цих систем забезпечили сумарну похибку вимірювання термо-е.р.с. менше  $0,35^{\circ}\text{C}$  (щоби невиключена похибка корекції ТП і надалі домінувала серед похибок компонентів системи).

**П'ятий розділ** присвячено експериментальним дослідженням розроблених оперативних методів. Для цього спочатку вдосконалено стенд дослідження та розроблено ТП, задане значення похибки якої може оперативно

встановлюватися. За їх допомогою проведено експериментальні дослідження розробленого нейромережевого методу керування профілем температурного поля розробленої багатозонної печі (відхилення від заданого профілю не більше  $1,5\text{°C}$ ), впливу змін зовнішньої температури на профіль температурного поля ТП, розміщеної у багатозонній печі (вони зменшуються у приблизно 37 разів), розробленого оперативного методу визначення похибки ТП у процесі експлуатації (отримана максимальна похибка дослідження не більше  $0,3\text{°C}$ ) та розробленого спеціалізованого термоелектричного перетворювача із самодіагностуванням (нестабільність зміни профілю температурного поля не більше 10%).

Проведений аналіз показав, що запропоновані методи та засоби дають змогу одночасно підвищити єдність, точність, метрологічну надійність та автономність, а також ефективність вимірювання температури за допомогою ТП у важливому для енергетики та промисловості діапазоні температур  $600 - 1100\text{°C}$  незважаючи на значну деградацію їх електродів.

**У висновках** сформульовано основні результати дисертації, а **додатки** містять розроблені у середовищі LabVIEW компоненти моделей дослідження похибок ТП, дослідження вдосконаленого методу найменших квадратів, навчальну та тестову вибірки для навчання нейронної мережі моделі похибки ТП, вагові коефіцієнти та зміщення нейронів розробленої нейромережевої моделі похибки широко розповсюджених ТП типу ХА, а також акти впровадження.

**Ключові слова:**

Термоелектричний перетворювач, термопара, деградація електродів термопар, дрейф функції перетворення, похибка від набутої термоелектричної неоднорідності, єдність, точність, метрологічна надійність.



## ABSTRACT

**Kochan O. V. Methods and means for improving the accuracy of temperature measurement by thermoelectric transducers with inhomogeneous thermocouples. Manuscript.**

Thesis for a Doctor of Technical Sciences degree by specialty 05.11.04 – Devices and Methods for Measuring the Thermal Quantities - Lviv Polytechnic National University, Lviv, 2020.

The thesis develops theoretical principles of thermoelectricity, which allows detecting the phenomenon of displacement error due to drift of conversion characteristic by error due to acquired thermoelectric inhomogeneity of thermocouple (TC) legs when the temperature changes along the TC. This allows proposing a new approach to the metrological service of measurements by TCs, which significant thermoelectric inhomogeneity acquired during long-term operation at high temperatures. New methods for determining TC error and testing the condition of TCs in situ without working standards are developed. There are carried out theoretical, modeling and experimental studies to estimate the properties of the proposed methods. It is shown that they allow simultaneously increasing measurement traceability, accuracy, metrological reliability, and self-containment, as well as the efficiency of temperature measurements in the range of 600 - 1100°C important for energy and industry.

**Scientific novelty is:**

1) For the first time there is proposed a new concept of in situ calibration of the TC, for its implementation it is necessary and sufficient to determine the section on its TC which undergoes no degradation of Seebeck coefficient, which allows using this section by purposefully moving the temperature gradient zone towards the reference junction.

2) There is further developed a model describing changes of thermo-emf of inhomogeneous TC versus changes in temperature distribution along its electrodes, which allows establishing the relationship between the current and maximum values of errors due to drift and due to inhomogeneity.

3) For the first time there is proposed an operative method for in-situ determining error due to the TC drift by the means of a reference section and a purposeful shift of the temperature gradient zone so that this gradient applied only to the TC reference section.

4) For the first time there is proposed an operative method of in situ diagnosing the state of the TC legs is proposed, which, due to purposeful changes of temperature field along TC, allows determining, by solving a system of linear equations by the method of aggregate measurements, Seebeck coefficients of sections which the TC is split into and determine the degree of their degradation to make a justified decision about the suitability of the TC for further operation.

5) For the first time there is proposed, a stable method to control the temperature field using an artificial neural network, which reduces the duration of setting a preset temperature field to one or two iterations by implementing an open control system and training the neural network directly on the object of control.

6) There is further developed a model of TC error, which describes the dependence of TC error on temperature and duration of operation, and temperature difference between the current and operation temperatures after changing the temperature field, which allows predicting the future time of operation of the TC.

7) For the first time there is proposed a structure of a two-contour temperature measurement system, which, due to alternate changes of contour functions (measurement and control of object's temperature or error correction and diagnostics of thermocouple legs) provides temperature measurement error of  $1.3^{\circ}\text{C}$  for the type K TC.

8) For the first time there is proposed a method for setting the conversion characteristic of the TC by introducing two additional wires, which allows confirming experimentally the efficiency of the proposed methods.

**The practical utility is:**

1. There are selected circuits, which ensure that, after correcting the TC error, its residual error dominate;

2. There is developed a design of the multi-zone furnace with controlled temperature field and there are estimated the required powers of its heaters and duration of establishing the preset temperature field;

3. There is developed a design of a special TC with controlled temperature field (TCTF), which uses only one original component and provides a diagnosis of the state of TC legs in situ;

4. There is improved a metrological software test for the measuring channel, which allows simulating the methods for increasing accuracy of measurement;

5. There is modernized the experimental apparatus for studying the methods for increasing accuracy of measurement;

6. There are obtained the results of experimental studies of the methods for simultaneous increasing traceability, accuracy, metrological reliability and and self-containment, and efficiency of temperature measurement.

7. It is shown that the method of determining TC thermo-e.m.f. based on the Peltier effect requires high accuracy of measurement of thermo-e.m.f. and allows estimating the current TC error only near the measuring junction, but not in the zone of the maximum temperature gradient that develops the bulk thermo-e.m.f.

**In the first chapter** there is carried out an analysis of the influence of acquired thermoelectric inhomogeneity of TC on the measurement error. It is shown the known methods of measuring temperatures from 600 to 1100°C by TCs have considerable errors due to degradation of legs under the influence of operating temperature and time. This degradation manifests itself as: 1) error due to drift of the conversion characteristics (CC) of TC, that is, the gradual change of TC CC during operation; 2) error of thermoelectric inhomogeneity acquired during operation, i.e., the change of the developed thermo-e.m.f. when changing temperature field along the TC (even if the temperatures of the reference measuring junctions remain constant). The latter for the type K TC can reach 11-30°C. It is hidden during operation, therefore it is dangerous and reduces efficiency of the methods for correcting drift of TCs. The methods of TC error correction are based on calibration in different temperature fields, or at the operation place using a

working standard or temperature fixed point cell. These methods are laborious and require the standard means in operation conditions. It is necessary to develop a method for determining the TC error in situ. The analysis of the ideal Carnot's engine shows this method will be effective. However, the error analysis was not carried out for the method based on the Peltier effect. To solve the problem of accurate temperature measurement by inhomogeneous TCs, one should carry out an additional theoretical studies of their behavior in different temperature fields.

**In the second chapter**, it is shown the method based on the Peltier effect requires measuring voltage of order of millivolts with the error less than 0.001%, which is unacceptable for industry. There is developed a concept for ensuring the accuracy of TCs, which is based on the "reference section" that virtually does not undergo degradation (keeps its initial CC) because it is adjacent to the reference junction (it is operated at its temperature). For this, the dependences of TC CC during degradation are derived, theoretical studies of the behavior of inhomogeneous TCs in changeable temperature fields are considered, it is shown that the maximum values of errors of drift of TC CC and of acquired inhomogeneity are equal, and with the gradual shift of temperature gradient along the TC legs toward the reference junction the latter gradually "replaces" the former. This is confirms the close connection between the errors as various manifestations of degradation of the TC during operation. A simulation confirms the discovered phenomenon. This allows developing a method for determining the current error of the TC in situ (with no interruption of operation) and without working standards (after TC calibration prior operation by a working standard). The only requirement is the constancy of the measuring junction temperature when determining the current error of the TC. The error analysis shows, depending on the tier of the used standard TC, the measurement error does not exceed either 1,1 or 1,3°C. The modeling the influence of external factors shows random error of the measurement channel has the maximum impact.

**In the third chapter** there is considered a method for diagnosing the state of the legs in situ without working standards. As a measure of degradation of the legs,

the equivalent operating time is proposed. In harsh operating conditions the equivalent operating time is greater than the physical one, and in favorable - less. To determine equivalent operating times for TC sections a system of equations is constructed (each equation corresponds to one temperature field). Its solutions is the value of error due to inhomogeneity of TC sections. Different possible values of equivalent operating times of virtual TC sections are considered. The modelling shows the need to subside the error of control of temperature field. The studies allows constructing a special thermocouple with self-testing.

Thus, the phenomenon of "replacement" of error due to drift of TC by error due to inhomogeneity during the purposeful change of the temperature field along the TC legs creates a technique of TC operation, based on the developed methods for determining the current TC error in situ and for diagnosing the state of TC legs.

**In the fourth chapter** the hardware, methodological, mathematical and system means for the proposed methods are developed. There are developed a multi-zone tubular furnace developed to control the temperature field of a regular TC; a neural network method for controlling the temperature field, which is not prone to self-excitation; a neural network multidimension model of TC error is developed, which is based on a limited experimental data; the structure of the two-contour system, in which the developed methods are implemented in a contour that is not involved in the temperature control. The best components of the system were selected, which ensures the total error of the measurement channel is less than  $0,35^{\circ}\text{C}$  (the residual error of after the correction of TC error should still dominate in the measurement system).

**The fifth chapter** describes the experimental studies of the developed methods. The test apparatus is improved and the TC whose error can be changed is developed. They are used to carry out experimental studies of the developed neural network method of control of temperature field for the multi-zone furnace (deviations from a preset temperature do not exceed  $1,5^{\circ}\text{C}$ ), the influence of external temperature on that of the TC within the multi-zone furnace (it is mitigated in approximately 37 times), the method for determining the TC error in situ (the error

of the experimental study does not exceed  $0,3^{\circ}\text{C}$ ) and the special thermoelectric transducer with self-testing (the instability of the temperature field does not exceed 10%).

The carried out analysis shows the proposed methods and means allow simultaneously increasing traceability, accuracy, metrological reliability and self-containment, as well as the efficiency of TC measurements in the range of 600–1100 $^{\circ}\text{C}$ , despite the significant degradation of TC legs.

The conclusions summarize the main results of the dissertation, and appendices contain studies carried out in LabVIEW, the studies of the improved method of least squares, the training and test samples for the neural network to construct the model of TC error, weights and biases of the neurons of the neural network model of TC error for the type K TC, and certificates of implementation.

**Keywords:**

Thermocouple, degradation of thermocouple, drift of the conversion characteristics, error due to thermoelectric inhomogeneity, traceability, accuracy, metrological reliability.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ

1. Кочан, О., Сапожник, Г., Паучок, В., & Майків, І. (2012). Удосконалення метрологічного програмного тесту вимірювального каналу температури. *Вісник Тернопільського національного технічного університету*, 68(№4), 175-185.
2. Васильків, Н., Кочан, В., Кочан, О., Чирка, М. (2012). Дослідження впливу нерівномірності дрейфу термопар на похибку корекції їх неоднорідності. *Вісник Хмельницького національного університету*, 4, 142–149.
3. Кочан, О., Биковий, П., Чирка, М., Кочан, В. (2012). Дослідження впливу швидкості дрейфу термопар на похибку корекції їх неоднорідності. *Науковий вісник Чернівецького університету. Комп'ютерні системи та компоненти*,

3(1), 54-61.

4. Єрмоєнко, В. & Кочан О. (2013). Проблеми використання методу найменших квадратів при дослідженні дрейфу термопар. *Метрологія та прилади*, 2, 98–105.

5. Кочан, О. (2013). Оцінка максимальної потужності нагрівачів термоелектричних перетворювачів з керованим профілем температурного поля. *Вимірювальна техніка та метрологія*, 74, 29-33.

6. Кочан, О. (2013). Піч з керованим профілем температурного поля для компенсації похибки неоднорідності термопар. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, 27–32.

7. Кочан, О. В. (2012). Нейромережевий метод керування для термоелектричного перетворювача з керованим профілем температурного поля. *Адаптивні системи автоматичного управління*, 2(21), 35-45.

8. Кочан В., Яскілка, В. & Кочан, О. (2013). Подавлення завад загального виду у вимірювальних каналах. *Вісник Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя*, 2, 190–196.

9. Кочан, О. В. (2013). Метод умовних найменших квадратів для побудови моделі похибки термопар. *Системи обробки інформації*, 6, 90-95.

10. Кочан, О.В. (2013). Оцінка тривалості самоперевірки термоелектричного перетворювача з керованим профілем температурного поля. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. Серія приладобудування, 46, 70-80.

11. Shu, C., & Kochan, O. (2013). Method of thermocouples self verification on operation place. *Sensors & Transducers*, 160(12), 55-61. **(Scopus, Web of Science)**.

12. Chen, Z., Kochan, O., Jun, S., & Demkiv, T. (2013). Decreasing of Thermocouple Inhomogeneity Impact on Temperature Measurement Error. *Sensors & Transducers*, 160(12), 509-513. **(Scopus)**.

13. Jun, S., & Kochan, O. (2014). Investigations of thermocouple drift irregularity impact on error of their inhomogeneity correction. *Measurement Science*

*Review*, 14(1), 29-34. (**Scopus, Web of Science**).

14. Кочан, О., Васильків, Н., Кочан, В., & Рощупкін, О. (2013). Дослідження невиключеної похибки неоднорідності термоелектричного перетворювача з керованим профілем температурного поля. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, 3, 26-32.

15. Єрмоєнко, В. О., & Кочан, О. В. (2013). Застосування регресійного аналізу для побудови моделі дрейфу функції перетворення термопар. *Математичне та комп'ютерне моделювання. Сер.: Технічні науки*, 8, 50-61.

16. Єрмоєнко, В., & Кочан, О. (2014). Метод умовних найменших квадратів дослідження поліноміальних регресійних моделей без вільного члена. *Вісник Тернопільського національного технічного університету*, 2(74), 244-259.

17. Кочан, О. В. (2014). Бездемонтажний метод тестування стану електродів термоелектричних перетворювачів. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, 4, 96-101.

18. Кочан, О. (2014). Метод визначення похибки термоелектричних перетворювачів на місці експлуатації. *Вимірювальна техніка та метрологія*, 75, 32-39.

19. Су, Ц., Кочан, Р.В. & Кочан, О.В. (2014). Нелінійність аналого-цифрового перетворювача на базі сигма-дельта модулятора другого порядку. *Технічна електродинаміка*, 4, 99-101.

20. Су, Ц., & Кочан, О. (2014). Механизм возникновения приобретенной термоэлектрической неоднородности термопар и его влияние на результат измерения температуры. *Измерительная техника*, (10), 38-41.

21. Су, Ц. & Кочан, О. (2014). Подавление помех общего вида в измерительных каналах. *Приборы и техника эксперимента*, 1, 87-90.

22. Jun, S., & Kochan, O. (2015). The mechanism of the occurrence of acquired thermoelectric inhomogeneity of thermocouples and its effect on the result of temperature measurement. *Measurement Techniques*, 57(10), 1160-1166. (**Scopus, Web of Science**).



23. Jun, S., & Kochan, O. (2015). Common mode noise rejection in measuring channels. *Instruments and Experimental Techniques*, 58(1), 86-89. (**Scopus, Web of Science**).
24. Кочан, Р., Кочан, О., Клим, Г. & Гоц, Н. (2014). Комбінований метод корекції нелінійності АЦП. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка» Автоматика, вимірювання та керування*, 802, 50-54.
25. Єрмоменко, В. & Кочан О. (2014). Дослідження класичних поліноміальних регресійних моделей без вільного члена. частина I. побудова емпірично ефективних оцінок параметрів регресійних моделей. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, 4, 13–23.
26. Су, Ц., Кочан, О., & Йоцов, В. (2015). Методы снижения влияния приобретенной термоэлектрической неоднородности термопар на погрешность измерения температуры. *Измерительная техника*, 3, 52-55.
27. Kochan, O. (2015). The Study of Classical Polynomial Regression Models Without a Constant Term. Building Empirically Effective Estimates of the Parameters of Regression Models. *Sensors & Transducers*, 187(4), 82.
28. Jun, S., Kochan, O. V., & Jotsov, V. S. (2015). Methods of Reducing the Effect of the Acquired Thermoelectric Inhomogeneity of Thermocouples on Temperature Measurement Error. *Measurement Techniques*, 58(3), 327-331. (**Scopus, Web of Science**).
29. Су, Ц., Кочан, О., Васильків, Н., & Кочан, Р. (2015). Метод коррекции погрешности измерений температуры из-за приобретенной неоднородности электродов термопар. *Измерительная техника*, 8, 49-53.
30. Hu, Z., Kochan, R., Kochan, O., Su, J. & Klym, H. (2015). Method of Integral Nonlinearity Testing and Correction of Multi-Range ADC by Direct Measurement of Output Voltages of Multi-Resistors Divider. *AKTA IMEKO*, 4(2), 80-84. (**Scopus**).
31. Jun, S., Kochan, O. V., Vasylykiv, N. M., & Kochan, R. V. (2015). A method of correcting the error of temperature measurements due to acquired inhomogeneity of the electrodes of thermocouples. *Measurement techniques*, 58(8), 904-910.

**(Scopus, Web of Science).**

32. Su, J., Kochan, O., Wang, C. & Kochan, R. (2015). Theoretical and Experimental Research of Error of Method of Thermocouple with Controlled Profile of Temperature Field. *Measurement science review*, 15(6), 304-312. **(Scopus, Web of Science).**

33. Jun, S., Kochan, O., Kochan, V., & Wang, C. (2016). Development and investigation of the method for compensating thermoelectric inhomogeneity error. *International Journal of Thermophysics*, 37(1), 10. **(Scopus, Web of Science).**

34. Jun, S., Kochan, O., & Kochan, R. (2016). Thermocouples with built-in self-testing. *International Journal of Thermophysics*, 37(4), 37. **(Scopus, Web of Science).**

35. Sun, H., Kochan, R., Kochan, O. & Su, J. (2016). Integral nonlinearity of second-order single-bit sigma-delta modulator. *Технічна електродинаміка*, 6, 63-68. **(Scopus).**

36. Mykyuchuk, M., Kochan, R., Kochan, O., Jun, S., Stadnyk, B., & Stolyarchuk, P. (2016). Increasing metrological autonomy of in-plant measuring systems. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 10(32), 193-197. **(Web of Science).**

37. Кочан, О. (2016). Корекція похибок дрейфу та набутої неоднорідності у термоелектричному перетворювачі з керованим профілем температурного поля. *Вимірювальна техніка та метрологія*, 77, 99-108.

38. Liu, Z., Song, W., Kochan, O., Mykyichuk, M., & Jun, S. (2017). Theoretical Study of the Conditions of Maximum Manifestation of the Error Due to Inhomogeneity of Thermocouple Legs. *International Journal of Thermophysics*, 38(6), 88. **(Scopus, Web of Science).**

39. Wang, J., Kochan, O., Przystupa, K., & Su, J. (2019). Information-measuring System to Study the Thermocouple with Controlled Temperature Field. *Measurement Science Review*, 19(4), 161-169. **(Scopus, Web of Science).**

40. Кочан О. (2017). Теоретичні основи оцінки стану електродів термопар у

процесі експлуатації. *Сенсорна електроніка і мікросистемні технології*, 14(3), 79-90.

41. Kochan, O., Su, J., & Kochan, R. (2017). Designing an accurate system for temperature measurements. In *E3S Web of Conferences*, 19(03023), 1-6. (**Scopus, Web of Science**).

42. Chen, J., Su, J., Kochan, O., & Levkiv, M. (2018). Metrological Software Test for Simulating the Method of Determining the Thermocouple Error in Situ During Operation. *Measurement Science Review*, 18(2), 52-58. (**Scopus, Web of Science**).

43. Jotsov, V., Kochan, O. & Su, J. (2018). Decreasing Influence of the Error Due to Acquired Inhomogeneity of Sensors by the Means of Artificial Intelligence. In: *Sgurev V., Jotsov V., Kacprzyk J. (eds) Practical Issues of Intelligent Innovations. Studies in Systems, Decision and Control*, (Vol. 140, pp. 89-130). Springer. (**Scopus**).

#### **Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:**

44. Kochan, R., Kochan, O., Sapojnyk, G. & Chyrka, M. (2011). Investigation of Histogram Method Implementation for High Resolution ADC Testing. In: *Proceedings of the International Conference IDAACS 2011* (pp. 43–49). Praha, Czech Republic. (**Scopus**).

45. Кочан, О., Васильків, Н., Кочан, В. & Рошупкін, О. (2012). Дослідження невиключеної похибки неоднорідності термоелектричного перетворювача з керованим профілем температурного поля. У *Збірник праць Міжнародної науково-технічної конференції "Температура"* (сс. 150-152). Львів.

46. Єрмоменко, В., Кочан, О. (2013). Метод умовних найменших квадратів для побудови моделі похибки термопар. В *Збірник праць III Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів „Сучасні комп'ютерні інформаційні технології”* (сс. 29-30). Тернопіль.

47. Єрмоменко, В., Кочан, О. (2013). Побудова моделі дрейфу функції перетворення термопар за допомогою регресійного аналізу. В *Збірник праць III Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів „Сучасні*

комп'ютерні інформаційні технології” (сс. 31-32). Тернопіль.

48. Мачужак, В., Кочан В., Кочан О. (2013). Метод керування профілем температурного поля. В *Збірник праць III Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів „Сучасні комп'ютерні інформаційні технології”* (сс. 103-104). Тернопіль.

49. Kochan, O., Sapojnyk, H., & Kochan, R. (2013). Temperature field control method based on neural network. In *Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS), 2013 IEEE 7th International Conference* (Vol. 1, pp. 21-24). Berlin. **(Scopus)**.

50. Kochan, R., Kochan, O., Chyrka, M., Su, J. & Bykovyy, P. (2013). Approaches of Voltage Divider Development for Metrology Verification of ADC. In: *Proceedings of the 2013 IEEE 7 International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems IDAACS'2013* (pp. 70-76). Berlin, Germany. **(Scopus)**.

51. Yeromenko, V., & Kochan, O. (2013). The conditional least squares method for thermocouples error modeling. In *Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS), 2013 IEEE 7th International Conference* (Vol. 1, pp. 157-162). Berlin, Germany. **(Scopus)**.

52. Кочан, О. (2013). Модель похибки термометричних перетворювачів на базі методу умовних найменших квадратів. В *Збірник праць Міжнародної науково-технічної конференції «Системи 2013. Термографія і термометрія, метрологічне забезпечення вимірювань та випробувань»* (сс. 149). Львів.

53. Кочан, О. (2013). Метод самодіагностики термоелектричних перетворювачів на місці їх експлуатації. В *Збірник праць Міжнародної науково-технічної конференції «Системи 2013. Термографія і термометрія, метрологічне забезпечення вимірювань та випробувань»* (сс. 199). Львів.

54. Єрмоменко, В. & Кочан, О. (2014). Метод умовних найменших квадратів для побудови моделі похибки термопар. В *Abstracts of conf. reports Dynamical system modeling and stability investigation: XVI International Conference: Modeling and Stability* (pp. 192). Kiev.

55. Chen, Z., Kochan, R., Kochan, O. & Yaremchuk, I. (2014). Investigation of Integral Nonlinearity of Third Order Sigma-Delta Modulator. In: *Proceedings of the International Conference TCSET'2014* (pp. 129-130). Lviv-Slavske.
56. Lei, M., Kochan, O., Kochan, R., Sapojnyk, H. (2014). Neural Network Method for Temperature Field Control. In *Proceedings of the International Conference TCSET'2014*, (pp. 232). Lviv-Slavske.
57. Lin, Q., Kochan, R., Kochan, O. & Klym, H. (2014). Approach of Testing Signals Generation for ADC Metrology Verification. In: *Proceedings of the International Conference TCSET'2014*, (pp. 247-248). Lviv-Slavske.
58. Єршоменко, В.О. & Кочан, О.В. (2014). Побудова емпірично ефективних оцінок параметрів класичної поліноміальної регресії моделі без вільного члена. У: *матеріали П'ятнадцятої міжнародної наукової конференції ім. акад. Михайла Кравчука. Т. 3. Теорія ймовірностей та математична статистика* (сс. 57-58). Київ.
59. Єршоменко, В.О. & Кочан, О.В. (2014). Емпірично ефективні оцінки параметрів класичної поліноміальної регресійної моделі без вільного члена. У: *Матеріали IV Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів Сучасні комп'ютерні інформаційні технології АСІТ'2014* (сс. 22-24). Тернопіль.
60. Кочан, Р.В., Кочан, О.В., Клим, Г.І. & Гоц, Н.Є. (2014). Нелінійність АЦП на базі сигма-дельта модулятора третього порядку. У: *Збірнику матеріалів міжнародної наукової координаційної наради "Інформаційні проблеми комп'ютерних систем, юриспруденції, енергетики, економіки, моделювання та управління" ICSM-2014* (сс. 97-101). Тернопіль.
61. Су, Ц., Кочан, Р.В. & Кочан, О.В. (2014). Нелінійність аналого-цифрового перетворювача на базі сигма-дельта модулятора другого порядку. У: *збірнику XIII Міжнародної науково-технічної конференції "Проблеми сучасної електротехніки-2014"* (сс. 101). Київ.
62. Ma, N., Kochan, O., Su, J., Kochan, V. (2014). Decreasing of thermocouple inhomogeneity impact on temperature measurement error. In *Proceedings of the*

*13th IMEKO TC10 Workshop on Technical Diagnostics Advanced measurement tools in technical diagnostics for systems' reliability and safety* (pp. 105-110). Warsaw. **(Scopus)**.

63. Hu, Z., Kochan, R., Kochan, O., Su, J. & Klym, H. (2014). Method of Integral Nonlinearity Testing and Correction of Multi-Range ADC by Direct Measurement of Output Voltages of Multi-Resistors Divider. In: *Proceedings of the 13<sup>th</sup> IMEKO TC10 Workshop on Technical Diagnostics Advanced measurement tools in technical diagnostics for systems' reliability and safety* (pp. 76-80). Warsaw. **(Scopus)**.

64. Su, J., Kochan, O. & Kochan, R. (2015). Evaluation of error of method of thermocouple with controlled profile of temperature filed. In: *Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Conference Measurement 2015* (pp. 301-304). Smolenice, Slovakia.

65. Hu, Z., Kochan, R., Kochan, O., Klym, H. & Su J. (2015). Integral nonlinearity correction of multi-range adc by iterative applying of multi-resistors divider. In: *Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Conference Measurement 2015* (pp. 29-32). Smolenice, Slovakia.

66. Li, J., Kochan, R., Kochan, O. & Klym, H. (2015). Integral Nonlinearity Correction of ADC Using Multi-Resistors Voltage Divider. In: *Proceedings of the 2015 IEEE 8 International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems IDAACS'2015* (pp. 767-772). Warsaw, Poland. **(Scopus, Web of Science)**.

67. Shu, C., Kochan, O., Kochan, V., & Vasylykiv, N. (2015). The method of self-testing of thermocouples in situ. In *Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS), 2015 IEEE 8th International Conference* (Vol. 2, pp. 773-778). Warsaw, Poland. **(Scopus, Web of Science)**.

68. Кочан, О.В. & Микийчук, М.М. (2016). Застосування нейронних мереж для зменшення похибок вимірювання температури термоелектричними перетворювачами. У: *Матеріали XVI міжнародної науково-технічної конференції «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних*

*процесах БОТТІ-2016»* (сс. 16-18). Одеса (Затока).

69. Hu, Z., Su, J., Jotsov, V., Kochan, O., Mykyichuk, M., Kochan, R & Sasiuk, T. Data Science Applications to Improve Accuracy of Thermocouples. In: *Proceedings 2016 IEEE 8th International Conference on Intelligent Systems* (pp. 180-188). Sofia, Bulgaria. **(Scopus, Web of Science)**.

70. Kochan, R, Ganczarczyk, T., Kochan, O. & Klym, H. (2016). Integral Nonlinearity of Third Order Single Bit Sigma-Delta Modulator. In: *Proceedings of 16th International Conference on Control, Automation and Systems ICCAS 2016* (pp. 1591 – 1593). Gyeongju, South Korea. **(Scopus)**.

71. Jun, S., Kochan, O., & Levkiv, M. (2017). Metrological software test for studying the method of thermocouple error determination during operation. In *Measurement, 2017 11th International Conference* (pp. 171-174). Smolenice, Slovakia. **(Scopus)**.

72. Kochan, O., Su, J., Kochan, R. (2017). Designing an accurate system for temperature measurements. In *Book of abstracts of the International conference Energy, Environment and Material systems (EEMS)* (pp. 103-104). Polanica Zdroj.

73. Kochan, O., Kochan, R., Kochan, V., & Su, J. (2017, September). Thermocouple with adjustable error. In *Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS), 2017 9th IEEE International Conference* (Vol. 2, pp. 684-689). Bucharest, Romania. **(Scopus, Web of Science)**.

74. Кочан О., Гусіна Є., Стадник А. & Рудник П. Розроблення теоретичних основ оцінки стану електродів термопар у процесі експлуатації. У *Актуальні проблеми автоматики та приладобудування: матеріали міжнародної науково-технічної конференції* (сс. 167-168.).

75. Кочан О., Гусіна Є., Стадник А. & Рудник П. Метрологічний програмний тест дослідження методу визначення похибки термоелектричних перетворювачів у процесі експлуатації. *Актуальні проблеми автоматики та приладобудування: матеріали міжнародної науково-технічної конференції* (сс. 169-170.).

**Публікації, які додатково відображають наукові результати дисертації**

76. Кочан, О. & Кочан, Р. *Спосіб корекції похибки головної терморари. Пат. Україна 102981. G01K7/02.*
77. Кочан, О., Кочан, Р. & Кочан, В. *Піч з керованим профілем температурного поля Пат. Україна 105700. G01K 7/02.*
78. Кочан, О., Кочан, Р. & Кочан В. *Пристрій для вимірювання температури в електронечках опору. Пат. України 104099. G01K7/01.*
79. Кочан, О. *Спосіб самодіагностики терморар на місці експлуатації та пристрій для його реалізації. Пат. Україна 104952. G01K13/00.*
80. Кочан, О. & Кочан, Р. *Термоелектричний перетворювач із можливістю імітації заданої похибки. Пат. України 115846.*
81. Кочан, О. & Кочан, Р. *Термоелектричний перетворювач із можливістю імітації заданої похибки. Пат. України 115931.*
82. Кочан, О. & Кочан, Р. *Система вимірювання та регулювання температури. Пат. України 115927.*
83. Кочан, О., Кочан, Р. & Кочан В. *Спосіб керування профілем температурного поля багатозонного об'єкта та пристрій для його реалізації. Пат. Україна 105541. G01K13/00.*



## ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ.....	2
ABSTRACT.....	9
СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ.....	14
СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ .....	28
ВСТУП.....	29
<b>Розділ 1. АНАЛІЗ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ПІДВИЩЕНИХ ТЕМПЕРАТУР ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ.....</b>	<b>43</b>
1.1 Похибки вимірювання температури термоелектричними термометрами .....	43
1.2 Вплив набутої термоелектричної неоднорідності термопар на методи підвищення точності вимірювання температури .....	53
1.3 Оцінка стану метрологічного забезпечення температурних вимірювань .....	66
1.4 Вибір напрямку подальших досліджень.....	75
1.5 Висновки до першого розділу .....	83
<b>Розділ 2. ОПЕРАТИВНИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ПОХИБКИ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА.....</b>	<b>84</b>
2.1 Концепція забезпечення точності вимірювання температури термоелектричними перетворювачами .....	84
2.2 Дослідження поведінки неоднорідних термопар при зміні профілю температурного поля.....	100
2.3 Дослідження залежності визначення похибки термопар від профілів температурного поля.....	118
2.4 Оперативний метод визначення похибки термоелектричного перетворювача .....	124
2.5 Дослідження впливу зовнішніх факторів на похибку методу оперативного визначення похибки головної термопарі.....	134
2.6 Висновки до другого розділу .....	146
<b>Розділ 3. ОПЕРАТИВНІ МЕТОДИ ДІАГНОСТУВАННЯ СТАНУ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА.....</b>	<b>148</b>
3.1 Оперативний метод діагностування стану електродів термопар на базі ефекту Пельтьє .....	148
3.2 Теоретичні основи оперативного методу діагностування стану електродів термопар.....	155
3.3 Критерій оцінки стану електродів ТП .....	162
3.4 Оперативний метод діагностування стану електродів термопар .....	165
3.5 Імітаційне дослідження методу діагностування .....	176

3.6	Спеціалізований термоелектричний перетворювач з оперативним діагностуванням стану електродів .....	185
3.7	Висновки до третього розділу .....	195
Розділ 4. РЕАЛІЗАЦІЯ МЕТОДІВ ОПЕРАТИВНОГО МЕТРОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИМІРЮВАННЯ ПІДВИЩЕНИХ ТЕМПЕРАТУР .....		
4.1	Піч з керованим профілем температурного поля .....	197
4.2	Нейромережевий метод керування профілем температурного поля .....	209
4.3	Математична модель похибки термопар .....	216
4.4	Структури систем, що реалізують розроблені методи .....	233
4.5	Висновки до четвертого розділу .....	244
Розділ 5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗРОБЛЕНИХ МЕТОДІВ 245		
5.1	Обладнання для проведення експериментальних досліджень .....	245
5.2	Експериментальні дослідження нейромережевого методу керування профілем температурного поля .....	257
5.3	Експериментальні дослідження впливу профілю температурного поля об'єкта на профіль температурного поля ТЕП з КПТП .....	261
5.4	Експериментальні дослідження оперативного методу визначення похибки термопар .....	267
5.5	Експериментальні дослідження спеціалізованого ТЕП з оперативним діагностуванням стану електродів .....	273
5.6	Покращення стану метрологічного забезпечення температурних вимірювань .....	281
5.7	Висновки до п'ятого розділу .....	289
	ВИСНОВКИ .....	290
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	294
	Додаток А - Підпрограма опрацювання даних у LabView .....	327
	Додаток Б - Підпрограма опрацювання даних у LabView .....	328
	Додаток В - Підпрограма опрацювання даних у LabView .....	329
	Додаток Д - Підпрограма опрацювання даних у LabView .....	330
	Додаток Е - Підпрограма опрацювання даних у LabView .....	331
	Додаток Ж - Підпрограма опрацювання даних у LabView .....	332
	Додаток И - Підпрограма опрацювання даних у LabView .....	333
	Додаток К - Підпрограма опрацювання даних у LabView .....	334
	Додаток Л - Підпрограма опрацювання даних у LabView .....	335
	Додаток М - Підпрограма опрацювання даних у LabView .....	336

Додаток Н - Підпрограма опрацювання даних у LabView .....	337
Додаток П - Підпрограма опрацювання даних у LabView .....	338
Додаток Р - Дослідження моделей похибки ТП на базі методу .....	339
найменших квадратів .....	339
Додаток С - Дослідження методу найменших квадратів .....	342
Додаток Т - Дослідження вдосконаленого методу найменших квадратів .	346
Додаток У - Таблиці результатів інтерполяції експериментальних досліджень похибки термопар типу ХА .....	352
Додаток Ф - Тестова вибірка для нейронної мережі моделі похибки ТП типу ХА .....	355
Додаток Х - Навчальна вибірка для нейронної мережі моделі похибки ТП типу ХА.....	358
Додаток Ц - Вагові коефіцієнти та зміщення навченої нейронної мережі.	360
Додаток Ч - Вимірювання та корекція температури вільних кінців термопар .....	361
Додаток Ш - Акт впровадження з Люблінської політехніки .....	362
Додаток Щ - Акт впровадження компанії TPV Display Technology .....	363
Додаток Ю - Акт впровадження з СКБ МП.....	364
Додаток Я - Акт впровадження у навчальний процес.....	366
Додаток АА - СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ .....	367

**СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ**

АЦП	– аналого-цифровий перетворювач
БВП	– багатоточкова вимірювальна підсистема
ВК	– вимірювальний канал
ККД	– коефіцієнт корисної дії
НМ	– нейронна мережа
П	– підсилювач
ПП	– подовжувальні провідники термопар
СКТВК	– схема компенсації температури вільних кінців
ТЕП	– термоелектричний перетворювач
ТЕП з КПТП	– термоелектричний перетворювач з керованим профілем температурного поля
Термо-е.р.с	– термоелектрична електрорушійна сила
ТП	– термопара
ТПП	– термопара платина-платинородій
ТПР	– термопара платинородій -платинородій
ТХА	– термопара хромель-алюмель
ТХК	– термопара хромель-копель
ФП	– функція перетворення
ЦАП	– цифро-аналоговий перетворювач
ХА	– хромель-алюмель

## ВСТУП

**Актуальність роботи.** У загальному числі вимірювань температура займає четверте місце (після вимірювань часу, маси та лінійних розмірів), а у промисловості частота прямих та інших вимірювань температури є ще вищою (до 70% вимірювань на об'єктах енергетики) [1 - 4]. Від точності та метрологічної надійності температурних вимірювань часто залежать економічна ефективність технологічних процесів та коефіцієнт їх корисної дії, якість продукції та безпека дуже різноманітних технологічних об'єктів [3 - 5]. Тому вимоги до цих параметрів невинно зростають. Діапазон вимірюваних температур для промислових термоагрегатів доволі широкий – від мінус 200°C до вище 2000°C [1, 2]. Це привело до появи дуже великої кількості видів сенсорів (первинних вимірювальних перетворювачів, давачів) температури (здіяні майже всі фізичні ефекти), а також типів сенсорів у кожному виді [6].

У промисловості (енергетиці, металургії, металообробці) найчастіше висока точність потрібна у діапазоні від 500...600 до 1000...1100°C, який назвемо діапазоном підвищених температур. Для цього діапазону особливо широкого вибору видів сенсорів, що випускаються промисловістю, немає. При температурах від 600°C традиційно використовуються лише оптичні пірометри, термоелектричні перетворювачі (ТЕП) на базі різного типу термопар (ТП) як чутливих елементів та платинові термометри опору (до 650°C) [1 - 7].

Слід відзначити, що безконтактні методи вимірювання температури теоретично мають перевагу над контактними – на їх сенсори підвищена температура прямо не діє. Згідно з [6, 8, 9], до цих методів відносяться оптичні, лазерні та акустичні. Хоча інструментальні похибки оптичних пірометрів на сьогодні доволі низькі, їх методичні похибки, викликані особливостями спектру випромінювання об'єкта вимірювання та відхиленням його властивостей від властивостей абсолютно чорного тіла, а також домішками (частинки пилу, кіптяви тощо) у проміжному середовищі та його спектральними характеристиками, дуже великі [1 - 6, 10 - 18]. Тому оптичні

пірометри для точного вимірювання підвищених температур придатні лише у лабораторних умовах. Розроблений недавно [19] метод вимірювання температури через випромінювання нагрітим тілом електромагнітних хвиль у субміліметровому діапазоні має суттєві переваги лише при вимірюванні дуже високих температур – до  $100000^{\circ}\text{C}$ . Таке випромінювання для підвищених температур має доволі малу потужність, тому похибка вимірювання у цьому діапазоні велика. Недавно появились лазерні методи вимірювання температури [9, 20, 21], похибки яких, згідно з [9, 20, 21], сягають 5 – 15% від вимірюваного значення, лише у спеціальних умовах – 1%. Акустичні методи вимірювання температури [6, 22] використовують для визначення розподілу температури газу у деякому об'ємі. Їх похибки визначають флуктуації локальної температури газу, нестабільність його складу та дія сторонніх шумів. Згідно з [6, 9], похибка цих методів сягає 4% (тобто до  $40^{\circ}\text{C}$  при вимірюваній температурі  $1000^{\circ}\text{C}$ ), що неприйнятно.

Таким чином, аналіз похибок вимірювання температури безконтактними методами у промислових умовах показав їх суттєві недоліки, пов'язані в основному з методичними похибками. Тому, незважаючи на їх переваги, на сьогодні підвищені температури частіше вимірюють контактними методами.

Щодо контактних методів, то платинові термометри опору не випускаються для вимірювання температур вище  $650^{\circ}\text{C}$  [23 - 31] – адже згідно з [32] при вищих температурах різко зростає дрейф їх ФП. Термошумова термометрія на сьогодні не вийшла з етапу лабораторних досліджень [33 - 40]. Ультразвукові термометри [22, 41 - 43] також серійно не випускаються, хоча у [44] відзначено перспективність їх використання у атомній енергетиці. Таким чином, ТЕП на сьогодні єдині сенсори, легко доступні для відносно точного вимірювання підвищених температур [1 - 10, 12, 13, 26, 27, 45 - 47].

Але аналіз показує, що на сьогодні на похибку вимірювання підвищених температур найбільше впливає похибка сенсорів – ТЕП (точніше їх чутливих елементів – ТП), вона практично завжди беззаперечно домінує у складі

похибок вимірювальних каналів (ВК) [48, 49]. Хоча від відкриття термоелектричних явищ пройшло майже 200 років [50], а пропозиція їх використання для вимірювання температури налічує майже 150 років [51], процес вдосконалення ТЕР і ТП не закінчився і сьогодні. Це підтверджується як наявністю доволі великої кількості публікацій у науково-технічних виданнях та проведенням спеціалізованих періодичних науково-технічних конференцій (ТЕМРМЕКО), де кількість доповідей стабільно перевищує дві сотні, так і постійним виділенням спеціальних завдань у дорожніх картах [52, 53], які розробляє Європейська асоціація національних метрологічних інститутів (ЄВРАМЕТ) [54]. Проблема розроблення нових ТП вищої точності була включена у дорожню карту [52] опубліковану у 2009 році. Але, як зазначається у останній дорожній карті [53], прогресу в цій сфері майже не досягнуто – «перша дорожня карта [52] іноді мала оптимістичний погляд щодо часу наукового і технологічного прогресу, який мав бути досягнутим, щоби зробити можливими очікуваний прогрес у термометрії». Тому проблема далі залишається включеною у список актуальних проблем термометрії у найближче десятиліття.

А похибки ТП доволі високі та давно не змінювалися. Основні сплави для електродів ТП [1, 2, 5 - 7, 8, 12, 32, 47, 55 - 60] були розроблені десятки років тому. Єдиним відносно новим типом ТП для підвищених температур є ніхросіл-нісіл [12], створені на базі ТП хромель-алюмель (ХА). Вони мають у 2 - 3 рази нижчу швидкість дрейфу функції перетворення (ФП) у деяких умовах [12, 61]. Але, незважаючи на це, найпоширенішими залишаються ТП типу ХА. Спроби розроблення ТП на базі нових аморфних матеріалів (металевого скла) [62 - 66] та інтерметалічних напівпровідників [67] не привели до поширення нових типів ТП. Розроблені останнім часом методи стабілізації ФП ТП [68 - 78] теж не привели до появи ТП, електроди яких не деградують при експлуатації.

Основними похибками ТП на сьогодні вважаються:

1. великі початкові відхилення їх ФП від номінальної – для ТП типу ХА

досягають  $5,5^{\circ}\text{C}$  при  $600^{\circ}\text{C}$  та  $8^{\circ}\text{C}$  при  $1100^{\circ}\text{C}$  [1, 27, 45, 46];

2. значний дрейф ФП ТП (поступова зміна ФП ТП у процесі тривалої експлуатації при підвищених і високих температурах через деградацію їх електродів) – для ТП типу ХА досягає  $0,5^{\circ}\text{C}$  при  $600^{\circ}\text{C}$  та  $10^{\circ}\text{C}$  при  $1100^{\circ}\text{C}$  за час експлуатації 1000 годин [27, 32, 47];
3. велика похибка від набутої у процесі тривалої експлуатації при високих температурах термоелектричної неоднорідності електродів, що проявляє себе як зміна термо-е.р.с. ТП, яка деградувала у процесі тривалої експлуатації при підвищених і високих температурах, при зміні профілю температурного поля вздовж її електродів (навіть при сталих температурах робочого з'єднання і вільних кінців) [79 – 85].

Похибка першого виду відносно легко коригується за результатами калібрування перевірки [86 - 88]. Методи корекції похибок другого виду узагальнено у [48] та розвинуто у [49, 89 - 93]. Їх висока точність базується на калібруванні за допомогою робочих еталонів (ТЕП або ТП) [47, 49, 89, 94] або калібруванні за допомогою температурного репера [95 - 101] на місці експлуатації. Робочі еталони та калібратори температури проходять калібрування згідно із схемою передачі значення еталону Кельвіна [102, 103]. Розвиток у [48, 89 – 93, 104] полягав у дослідженні пропозиції будувати індивідуальну математичну модель дрейфу ФП ТП за результатами калібрувань, зокрема, за допомогою нейронних мереж [90 - 93]. Тому точність і метрологічна надійність методів, поданих у [48, 49, 89, 97], потенційно дуже висока. Однак це стосувалося лише об'єктів вимірювання температури, профіль температурного поля яких має високу стабільність. При зміні профілю температурного поля вздовж електродів ТП починає проявляти себе третій вид похибки – від набутої термоелектричної неоднорідності електродів. А такі зміни появляються дуже часто, особливо під час експлуатації великих термоагрегатів, що стоять окремо (не у опалюваному приміщенні).

Про вплив на результат вимірювання температури третього виду похибки – від термоелектричної неоднорідності електродів ТП – відомо вже



понад 110 років [79]. Ця похибка проявляє себе як залежність генерованої ТП термо-е.р.с. від змін профілю температурного поля вздовж її електродів навіть при сталих температурах її з'єднаних і кінців. Вдосконалення технології виробництва електродів ТП і контролю їх якості привело до того, що похибка від початкової (при випуску) термоелектричної неоднорідності електродів ТП стала доволі малою – не більше  $1-2^{\circ}\text{C}$  [80, 82, 105 - 108]. Але при тривалій експлуатації ТЕП при підвищених і високих температурах у ТП наростає набута термоелектрична неоднорідність електродів, яка значно перевищує початкову [109 - 113]. Згідно з [114] для ТП типу ХА вона за 500 годин експлуатації може сягати  $11^{\circ}\text{C}$ , а згідно з [115] – до  $30^{\circ}\text{C}$ . Через те, що похибка від набутої термоелектричної неоднорідності термоелектродів проявляє себе лише у нестабільному профілі температурного поля об'єкта вимірювання, її вважають особливо небезпечною [113]. Цю похибку у науково-технічних публікаціях називали "скринькою Пандори" [115], попереджали [113] про її небезпеку (але єдину рекомендацію – "замінити ТП" – не супроводжували рекомендації коли саме це слід робити). А у [116] прямо заборонено проводити метрологічну перевірку ТЕП і ТП, які побували у експлуатації. Згідно з [116] така метрологічна перевірка (та її використання для корекції похибок ТП) веде лише до "уявного підвищення точності".

Вдосконаленням ТЕП займалися школа Львівської Політехніки та львівське науково-виробниче об'єднання «Термоприлад». Із закордонних слід відзначити компанії «Термоелектра» (м. Пійнакер, Нідерланди), «Айсотеч» (м. Саутпорт, Англія), ЕДЛ (м. Денвіл, США), Тестемп (м. Літлхемптон, Англія), Нінгбо Електрик Еплаенс (м. Чжецзян, Китай), Пентронік (м. Вестервік, Швеція), Роегі (м. Ізерлон, Німеччина), Пиріндус (м. Брюссель, Бельгія), Юст Сенсор Технік (м. Ухань, Китай), Джуліані Джузеппе (м. Мезеро, Італія), Текно Маріне Системс (м. Генуя, Італія), інститут «ГИПРОЦВЕТМЕТОБРАБОТКА» (м. Москва, Росія) виробнича компанія «Тесей» (м. Обнінск, Росія),.

Однак на сьогодні не випускаються прилади і системи, де передбачена

корекція похибок ТП. Розробники вторинних приладів або випускають прилади невисокої точності [117, 118] (посилаючись на те, що сенсори мають набагато більші похибки) або високоточні прилади вимірювання термо-е.р.с. а не температури [118, 119]. Висока точність останнього носить хіба рекламний характер, адже підключення вільних кінців (скоріше подовжувальних проводів) двох ТП передбачено до не захищених клем на різних краях передньої панелі приладу, а сенсор температури вільних кінців знаходиться в корпусі приладу. Тобто навіть оцінка лише похибки корекції температури вільних кінців (навіть не враховуючи похибки ТП) виходить більшою за нормовану похибку вимірювання температури (очевидно, що насправді нормується похибка вимірювання термо-е.р.с., перерахована у значення температури).

Окремо стоїть розроблений у [120] та розвинутий у [121, 122] метод визначення похибки ТП на місці експлуатації шляхом пропускання струму через ТП у двох напрямках і вимірюванні змін температури робочого кінця під дією ефекту Пельтьє. Але варіант, поданий у [120] не враховує нагрів струмом електродів ТП (тепло Джоуля), а лише дію ефекту Пельтьє. Нагрів електродів ТП струмом враховано у [121, 122], але там не проведено аналіз похибок, що не дає змогу адекватно оцінити метод. Така оцінка, проведена у подальшому, показує практичну непридатність методу для використання у промисловості.

Таким чином, склалася ситуація, при якій розробники не ризикують нормувати високу точність вимірювання саме температури, незважаючи на відомі методи корекції похибок ТП. Це може бути пов'язано з тим, що відомі методи корекції не всіх похибок ТП, зокрема, достатньо надійні методи корекції або компенсації похибки від набутої термоелектричної неоднорідності термоелектродів появилися недавно [114, 123 – 128]. Але і ці методи самі по собі, хоч і дають змогу значно зменшити вплив похибки від набутої термоелектричної неоднорідності електродів ТП на результат вимірювання температури, з точки зору виробників систем вимірювання температури, не достатньо досліджені та доволі трудомісткі. При цьому

вторинні прилади, які використовують ці методи, повинні передбачати створення можливості забезпечення високої точності вимірювання саме температури (а не термо-е.р.с.). Тому, зважаючи на неодноразові згадування проблеми створення "точних термопар" та "стійких термопар" у дорожніх картах [52, 53], створення високоточних систем вимірювання температури ТП, електроди яких деградували у процесі експлуатації, є актуальною проблемою. При цьому, через трудомісткість зменшення впливу похибок ТП на результат вимірювання температури, необхідно виконати умову (правило) – невиключена похибка ТП (залишкова похибка ТП, отримана після застосування методів корекції її похибок) повинна і надалі домінувати серед похибок компонентів ВК температури. Адже досягнення високої точності вимірювання термо-е.р.с., лінеаризації, корекції або компенсації температури вільних кінців тощо вимагає на сьогодні значно менших затрат.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дана дисертація виконана в рамках: Дорожніх карт Європейської термометрії випущених Європейською асоціацією національних метрологічних установ (ЄВРАМЕТ) у 2009 і 2014 роках; науково-дослідної теми Функціональні наноматеріали для адаптивного роботизованого інформаційно-вимірювального комплексу оборонного спрямування (2019-2020р., № держреєстрації 0119U100435); гранту фонду докторантських наукових досліджень Університету технології провінції Хубей (№ BSQD14037). У їх виконанні здобувач приймав участь як безпосередній виконавець.

**Мета і завдання дослідження.** Метою дисертаційної роботи є створення методів і засобів, які забезпечують одночасне підвищення єдності, точності, метрологічної надійності та ефективності вимірювання підвищених температур засобами термоелектричної термометрії за рахунок нових оперативних методів визначення похибки термопар та діагностування стану її електродів у процесі експлуатації.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні задачі:

1) провести аналіз єдності, точності, метрологічної надійності та ефективності

сучасних методів та засобів вимірювання підвищених температур за допомогою ТЕП та вибрати напрям подальших досліджень;

2) розробити концепцію одночасного забезпечення єдності, точності, метрологічної надійності та автономності, а також ефективності вимірювання підвищених температур за допомогою ТЕП у промислових умовах;

3) провести моделювання поведінки неоднорідної термопари в умовах змін профілю температурного поля;

4) розробити та дослідити оперативний метод визначення похибки неоднорідних ТП у процесі їх експлуатації;

5) розробити та дослідити оперативний метод діагностування стану електродів ТП у процесі їх експлуатації;

6) розробити методи та засоби апаратного та алгоритмічного забезпечення запропонованих оперативних методів визначення похибки ТП та діагностування стану їх електродів у процесі експлуатації;

7) розробити обладнання для проведення експериментальних досліджень розроблених оперативних методів визначення похибки ТП та діагностування стану їх електродів у процесі експлуатації та провести такі експериментальні дослідження;

8) запропонувати структуру інформаційно-вимірювальної підсистеми системи керування температурою промислових термоагрегатів, яка забезпечує одночасне підвищення єдності, точності, метрологічної надійності та ефективності вимірювання підвищених температур за рахунок використання запропонованих оперативних методів визначення похибки ТП та діагностування стану їх електродів у процесі експлуатації;

9) провести аналіз прогресу, досягнутого у покращенні єдності, точності, метрологічної надійності та ефективності засобів вимірювання підвищених температур за допомогою ТЕП, що використовують розроблені оперативні методи визначення похибки ТП та діагностування стану їх електродів у процесі експлуатації.

**Об'єкт дослідження** – процес вимірювання температури

термоелектричними перетворювачами.

**Предмет дослідження** – науково-технічні засади підвищення точності термоелектричної термометрії.

### **Наукова новизна**

Вперше:

- 1) Вперше запропоновано нову концепцію бездемонтажного калібрування термоелектричного перетворювача для успішної реалізації якої необхідно і достатньо виділити на його термопарі ділянку, в межах якої не відбуваються деградаційні зміни питомої термо-е.р.с., що дає змогу використати цю ділянку для оперативного визначення похибки шляхом цілеспрямованого переміщення зони температурного градієнту у сторону опорної ділянки.
- 2) Отримала подальший розвиток модель, що описує зміни термо-е.р.с. неоднорідної термопари внаслідок зміни розподілу температури вздовж її електродів, що дало змогу встановити закономірність, яка відображає зв'язок між поточними і максимальними значеннями похибок дрейфу і неоднорідності.
- 3) Вперше запропоновано оперативний метод визначення похибки термоелектричного перетворювача у процесі експлуатації, зумовленої дрейфом функції перетворення термопари, за допомогою опорної ділянки шляхом цілеспрямованого зміщення зони температурного градієнту таким чином, щоб цей градієнт був прикладений лише до опорної ділянки термопари.
- 4) Вперше запропоновано оперативний метод діагностування стану електродів термопари у процесі експлуатації, який, завдяки цілеспрямованим змінам температурного поля вздовж її електродів, дає змогу визначити шляхом рішення системи лінійних рівнянь за методом сукупних вимірювань питомої термо-е.р.с. віртуальних ділянок, на які розбита термопара та визначити ступінь їх деградації, щоб зробити обґрунтований висновок про придатність термопари для подальшої експлуатації.
- 5) Вперше запропоновано метод керування профілем температурного поля за допомогою штучної нейронної мережі неохильний до самозбудження, що

забезпечує зменшення тривалості встановлення заданого профілю температурного поля до однієї-двох ітерацій завдяки реалізації розімкнутої системи керування та навчання нейронної мережі безпосередньо на об'єкті керування.

6) Набула подальшого розвитку модель похибки термопари, яка описує залежність похибки термопари від температури та тривалості експлуатації, а також значення температури після зміни профілю температурного поля, що дозволяє спрогнозувати термін придатності термопари до використання.

7) Вперше запропоновано структуру двоконтурної системи вимірювання температури, яка, за рахунок почергової зміни функцій контурів (вимірювання та керування температурною об'єкта або корекція похибок і діагностування стану електродів термопари) забезпечує похибку вимірювання температури в межах  $1,3^{\circ}\text{C}$  для термопар типу хромель-алюмель.

8) Вперше запропоновано метод встановлення функції перетворення термоелектричного перетворювача за рахунок введення двох додаткових виводів термопари, що дає змогу експериментально підтвердити ефективність запропонованих методів.

### **Практична цінність**

1) Відібрано схемотехнічні рішення, які, при використанні у високоточному вимірювальному каналі температури, забезпечують виконання умови, що після корекції похибок ТП її невиключена похибка повинна залишитися домінуючою;

2) Розроблено конструктивну схему багатозонної печі з керованим профілем температурного поля та оцінено необхідну потужність її нагрівачів і час встановлення профілю температурного поля;

3) Розроблено конструкцію спеціалізованого ТЕП з керованим профілем температурного поля (ТЕП з КПТП), що використовує лише одну нестандартну деталь і забезпечує оперативне діагностування стану своїх електродів;

4) Вдосконалено метрологічний програмний тест каналу вимірювання

температури, що дає змогу провести імітаційне моделювання розроблених методів підвищення точності вимірювання температури;

5) Модернізовано спеціалізований стенд для експериментального дослідження розроблених методів підвищення точності вимірювання температури;

6) Отримано результати експериментальних досліджень розроблених методів підвищення точності вимірювання температури;

7) Показано, що метод визначення термо-е.р.с. ТП з використанням ефекту Пельтьє вимагає дуже високої точності вимірювання термо-е.р.с. ТП та дає змогу оцінити поточні значення похибки ТП лише у зоні її злуту, а не у зоні, яка потрапляє у максимальний градієнт температурного поля та генерує основну термо-е.р.с.

Результати дисертації впроваджено у компанії TPV Display Technology (Wuhan) Co., Ltd міста Ухань, Провінція Хубей, Китайська Народна Республіка (акт № 1946/03 від 20.03.2019), та у Приватному акціонерному товаристві «СКБ мікроелектроніки у приладобудуванні» (від 12.09.2019). Також результати дисертації впроваджено у навчальний процес у Люблінській політехніці, механічний факультет, кафедра автоматизації, місто Люблін, Воєводство Любельське, Республіка Польща (акт від 21.12.2018) та у національному університеті «Львівська політехніка» (6.12.2019).

**Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій.** Наукові положення, висновки і рекомендації дисертації обґрунтовані коректним використанням математичного апарату та достатньою повнотою теоретичних та експериментальних досліджень. Їх достовірність підтверджена розробленням відповідних методик досліджень та хорошою збіжністю результатів експериментів з результатами теоретичних оцінок.

**Особистий внесок здобувача.** Усі основні наукові результати дисертації, представлені до захисту, отримані автором особисто. У роботах, які опубліковані у співавторстві, дисертанту належать постановка задач, концепції та принципи побудови сенсорів та систем, розробка методів і

методик експериментальних досліджень, побудова математичних моделей, принцип оптимізації функції найменших квадратів з накладанням додаткової умови рівності нулю суми залишків, комп'ютерне моделювання, основні математичні викладки, аналіз результатів. Зокрема, у [19, 24, 30, 35, 39, 44, 50, 55, 57, 60, 61, 63, 65, 66, 70] – опрацювання результатів імітаційних досліджень; [14, 45] – методика досліджень невиключеної похибки неоднорідності ТЕП з КПТП; [1, 42, 71, 75] – структура метрологічного програмного тесту; [2, 13] – методика дослідження впливу нерівномірності та швидкості дрейфу ТП на корекцію їх похибки від набутої неоднорідності; [3] – методика дослідження впливу швидкості процесу дрейфу ФП ТП на корекцію їх похибки від набутої неоднорідності; [4, 51, 54, 58, 59] – принцип пошуку оптимуму функції найменших квадратів з накладанням додаткової умови рівності нулю суми залишків; [15, 16, 25, 46, 47] – побудова моделі дрейфу ФП ТП засобами регресійного аналізу; [48, 49, 56, 83] – нейромережвий метод керування профілем температурного поля; [12, 33, 62, 77] – структура багатозонної печі; [11, 76] – метод визначення похибки ТЕП на місці експлуатації; [26, 28] – класифікація методів зменшення похибки ТЕП; [32, 64] – методика експерименту і математична модель; [29, 31] – метод корекції похибки від набутої неоднорідності електродів ТП; [34, 67] – метод діагностування електродів ТП; [43, 68, 69] – методика застосування нейронних мереж для корекції похибок ТП; [36] – створення математичної моделі; [41, 72, 82] – структура двоконтурної системи вимірювання температури; [73, 80, 81] – метод встановлення заданої похибки ТП; [38, 74] – розроблення теоретичних основ оцінки стану електродів ТП; [8, 21, 23, 78] – метод зменшення впливу завод загального виду; [20, 22] – аналіз причин виникнення похибки від набутої неоднорідності електродів ТП.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення та результати виконаних у дисертації досліджень доповідалися та обговорювалися на 23 міжнародних та всеукраїнських науково-технічних конференціях, симпозіумах та семінарах: "International Conference on Intelligent Data



Acquisition and Advanced Computing Systems" IDAACS'2011 - IDAACS'2017 (Praha, Czech Republic, 2011; Berlin, Germany, 2013; Warsaw, Poland, 2015; Bucharest, Romania, 2017); Міжнародна науково-технічна конференція "Температура" (Львів 2012); Всеукраїнська школа-семінар молодих вчених і студентів "Сучасні комп'ютерні інформаційні технології" (Тернопіль, 2013, 2014); Міжнародна науково-технічна конференція "Системи 2013. Термографія і термометрія, метрологічне забезпечення вимірювань та випробувань" (Львів, 2013); "International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering TCSET'2014" (Lviv-Slavske, 2014); "Dynamical system modeling and stability investigation: XVI International Conference on Modeling and Stability" (Kyiv, 2013); "15-та міжнародна наукова конференція ім. акад. Михайла Кравчука" (Київ, 2014); Міжнародна науково-координаційна нарада "Інформаційні проблеми комп'ютерних систем, юриспруденції, енергетики, економіки, моделювання та управління ICSM-2014" (Тернопіль, 2014); Міжнародна науково-технічна конференція "Проблеми сучасної електротехніки" ПСЕ2014-ПСЕ2016 (Київ, 2014, 2016); 13th IMEKO TC10 Workshop on Technical Diagnostics Advanced measurement tools in technical diagnostics for systems' reliability and safety (Warsaw, Poland, 2014). "International Conference "Measurement", Measurement-2015 – Measurement-2017 (Smolenice, Slovakia, 2015, 2017); "Перший науковий семінар: Кіберфізичні системи: досягнення та виклики" (Львів 2015); XVI міжнародна науково-технічна конференція "Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах ВОТТП-2016" (Одеса, Затока), 2016); "16th International Conference on Control, Automation and Systems ICCAS 2016" (Gyeongju, Korea, 2016); "IEEE 8th International Conference on Intelligent Systems" (Sofia, Bulgaria, 2016); "International conference Energy, Environment and Material systems (EEMS)" (Polanica Zdroj, Poland, 2017), Міжнародна науково-технічна конференція "Актуальні проблеми автоматички та приладобудування" (Харків, 2017).

**Публікації.** Основні матеріали дисертації викладено у 83 наукових

працях, серед них 43 статті, з них 20 входять до переліку фахових видань (з них одноосібних – 9), 11 індексовані у Scopus і у Web of Science, 5 лише у Scopus, 1 лише у Web of Science, 4 – у РИНЦ, 2 – у закордонних журналах. Доповідей на наукових конференціях 32, з них 4 індексовані у Scopus і у Web of Science, 8 лише у Scopus. Патентів України – 8.

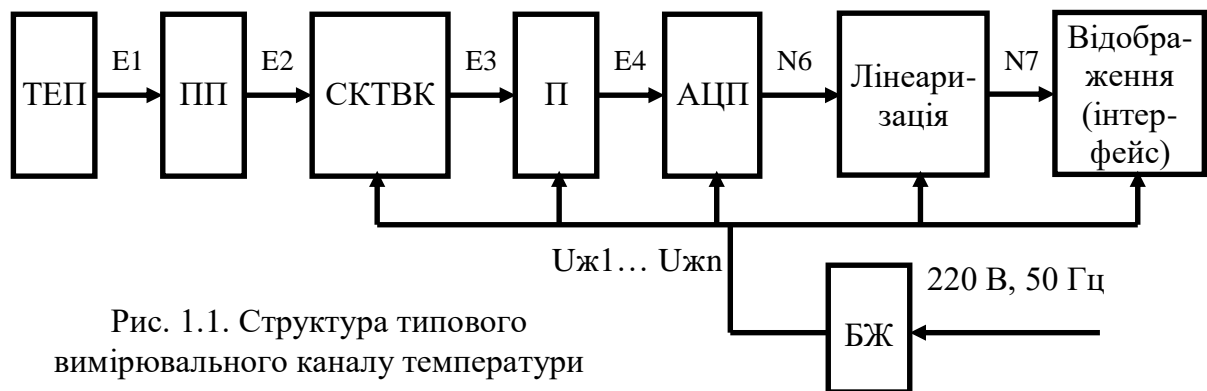
## **Розділ 1. АНАЛІЗ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ПІДВИЩЕНИХ ТЕМПЕРАТУР ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ**

### **1.1 Похибки вимірювання температури термоелектричними термометрами**

ТЕП потенційно мають високу точність – вони, разом із засобами створення фазових переходів чистих металів, раніше служили для відтворення міжнародної практичної температурної шкали, тобто використовувалися як еталони при вимірюванні температури [8, 34]. Їх недоліками можна вважати низьку чутливість, нелінійність функції перетворення (ФП) та необхідність врахування температури вільних кінців. Однак, при сьогоdnішньому розвитку як аналогової, так і цифрової мікроелектроніки, ці недоліки не є суттєвими. Окремо стоїть питання про точність промислових вимірювань температури за допомогою розповсюджених ТЕП – часто вона недостатня [51]. Але слід відзначити, що похибки ТЕП в основному інструментальні. Методичні похибки при вимірюванні температури за допомогою ТЕП у переважній більшості випадків мають лише теплове походження, є систематичними (виключаючи динамічні похибки, притаманні також іншим методам вимірювання температури) та доволі добре вивченими [137]. Тому методи вимірювання температури за допомогою ТЕП слід зарахувати до перспективних.

Для створення нових методів і засобів високої точності для вимірювання підвищених температур за допомогою ТЕП слід спочатку розглянути існуючі засоби вимірювання температури та використовувані у них методи забезпечення точності вимірювання. На рис. 1.1 подана узагальнена структурна схема типового каналу цифрового вимірювання температури за допомогою ТЕП [6]. Вимірювальний канал складається із самого ТЕП, подовжувальних проводів ПП (лінії зв'язку), схеми корекції або компенсації температури вільних кінців СКТВК, підсилювача П, аналого-цифрового перетворювача АЦП, а також блоків лінеаризації, відображення або

інтерфейсу та живлення БЖ. На сьогодні лінеаризацію зазвичай виконують обчислювальним шляхом, найчастіше за допомогою мікроконтролера [6]. Засіб відображення використовують практично лише автономні засоби вимірювання температури [126, 127]. Більшість каналів вимірювання температури у промисловості реалізують модулі інформаційно-вимірювальних і керуючих систем [125], які не мають спеціального цифрового табло. Тоді такі модулі оснащують інтерфейсом для зв'язку з комп'ютером (вищим ієрархічним рівнем системи) [6, 125]. Інтерфейс найчастіше реалізує той самий мікроконтролер, що і лінеаризацію.



Важливою складовою каналу вимірювання температури є блок живлення. Це пов'язано із завадами загального виду [138, 139]. Всі сенсори температури, особливо ТП, мають низьку чутливість [1, 48, 49]. А опір ізоляції при високих температурах значно знижується [139]. Тому між нагрівачем об'єкта вимірювання температури та мережею живлення засобів вимірювання температури виникають вирівнювальні струми [138 - 140], що створюють спади напруги на опорі електродів ТП, які впливають на результат вимірювання температури. Експериментальні дослідження, проведені у [139], показали, що похибка від завад загального виду може сягати десятків градусів. Наприклад, у вимірювальному модулі I7018, як це показано у [52], завади загального виду можуть викликати непрацездатність вимірювального каналу, що пов'язано із значною прохідною ємністю блока живлення та неправильною реалізацією схеми симетрування входу.

Розглянемо похибки, які вносять у результат вимірювання температури

всі компоненти вимірювального каналу. Першим компонентом вимірювального каналу є ТЕП, чутливим елементом якого є ТП [6, 8]. У табл. 1.1 приведено основні типи ТП, що випускаються промисловістю, та їх допустимі похибки [48, 49].

Як видно з табл. 1.1, похибки ТП суттєво залежать від типу ТП і вимірюваної температури. Слід відзначити, що в табл. 1.1 вказані тільки границі допустимих відхилень ФП ТП від номінальної при їх випуску з виробництва [48, 49]. Методи корекції цієї похибки розглянуті у [94-96], вони зводяться до переходу до індивідуальної ФП ТП за результатами її калібрування. Але, як вказано у [124] такий метод ефективний лише для нових ТП (щойно випущених з виробництва). Причини такого обмеження будуть розглянуті у наступному параграфі.

Табл. 1.1. Типи ТП, що випускаються промисловістю, та їх похибки

Тип термопари (позначення НСХ перетворення)	Клас допуску	Діапазон вимірювань, °С	Границі допустимих відхилень, °С (згідно із стандартом)	Границі допустимих абсолютних відхилень, °С
1	2	3	4	5
ТПП (S, R)	2	Від 0 до 600	1,5	1,5
	1	Від 600 до 1600	0,0025*t	від 1,5 до 4
		Від 0 до 1100	1,0	1,0
		Від 1100 до 1600	1,0+0.003* *(t-1100)	від 1,0 до 2,5
ТПР (В)	3	Від 600 до 800	4,0	4,0
		Від 800 до 1800	0,005*t	від 4 до 9
	2	Від 600 до 1800	0,0025*t	від 1,5 до 4,5

1	2	3	4	5
ТХА ТНН (К,N)	2	Від 333,4 до 1300	0,0075*t	Від 2,5 до 9,75
	1	Від 375 до 1300	0,004*t	Від 1,5 до 5,2
ТХК (L)	2	Від 300 до 800	0,7+0.005*t	Від 2,2 до 4,7
ТХК (E)	2	Від 333,4 до 900	0,0075*t	Від 2,5 до 6,75
	1	Від 375 до 800	0,004*t	Від 1,5 до 3,2
ТВР (A)	3	Від 1000 до 2500	0,007*t	Від 7 до 17,5
	2	Від 1000 до 2500	0,005*t	Від 5 до 12,5
ТЗК (J)	2	Від 333,4 до 900	0,0075*t	Від 2,5 до 6,75
	1	Від 375 до 750	0,004*t	Від 1,5 до 3

Як було вказано раніше, для ТП також характерними є ще інші види похибок. Тривалий вплив на електроди ТП високої температури експлуатації веде до їх деградації (забруднення термоелектродів за рахунок дифузії сторонніх домішок, окислення та інших хімічних перетворень компонентів сплавів термоелектродів, наростання міжкристалічних напружень, змін параметрів кристалічної ґратки, появи дислокацій), що, в свою чергу, веде до дрейфу (поступової зміни у часі) ФП ТП [12, 34, 50, 141, 142].

Вибіркові максимальні значення дрейфу найбільш вживаних ТП, згідно із [29, 34], представлено в табл. 1.2. Як видно з табл. 1.2, похибка від дрейфу ФП ТП може суттєво перевищити границі допустимих відхилень ФП ТП від номінальних при їх випуску. Методами корекції похибки від дрейфу ФП ТП присвячені методи, досліджені у [51] та вдосконалені у [97 - 101]. Їх ефективність буде розглянута у наступному параграфі.

Табл. 1.2. Похибка дрейфу ТП при експлуатації при високій температурі

Тип термопар	Температура експлуатації	Час експлуатації	Значення похибки дрейфу
ТПП	700°C	2000 годин	4°C
	700°C	8000 годин	8°C
	900°C	2000 годин	5,5°C
	900°C	8000 годин	9,5°C
ТХА	700°C	2000 годин	13°C
	700°C	8000 годин	19°C
	900°C	2000 годин	18°C
	900°C	8000 годин	25°C

Крім того, ТП притаманна ще одна похибка, пов'язана із деградаційними процесами, які проходять у їх електродах – похибка від набутої у процесі тривалої експлуатації при високій температурі термоелектричної неоднорідності електродів. Механізм її виникнення та впливу на результат вимірювання температури будуть розглянуті у наступному параграфі. Тут лише відзначимо, що ця похибка може бути досить великою. За даними [122], вона, для найбільш розповсюджених ТП типу ХА, може сягати 11°C (при експлуатації на протязі 500 годин при температурі 800°C), а, за даними [123], – до 30°C. Зменшенню впливу набутої термоелектричної неоднорідності присвячені методи, досліджені у [122, 133]. Їх ефективність також буде розглянута у наступному параграфі.

Наступним джерелом похибки для традиційних засобів вимірювання температури за допомогою ТП є подовжувальні (компенсаційні) проводи [6, 29, 59]. Їх допустимі відхилення від номінальної ФП, згідно із даними [29], приведені в табл. 1.3. Не дивлячись на те, що максимальна температура експлуатації подовжувальних проводів не перевищує 100°C, їх допустима похибка сумірна з похибками ТП.

Як схему компенсації температури вільних кінців СКТВК найчастіше

використовують незрівноважений рівноплечий міст [8]. З точки зору похибки, яку вносить СКТВК у похибку результату вимірювання температури, вибір такої схеми є невдалим.

Табл. 1.3. Допустимі похибки подовжувальних (компенсаційних) проводів

Тип термопар	Діапазон температур	Допустиме відхилення термо-е.р.с.	Відповідне значення похибки
ТПП	Від 0 до 100°C	$\pm 0,03$ мВ	$\pm 3^\circ\text{C}$
ТХА	Від 0 до 100°C	$\pm 0,15$ мВ	$\pm 3,75^\circ\text{C}$
ТХК	Від 0 до 100°C	$\pm 0,3$ мВ	$\pm 4,25^\circ\text{C}$

Крім інструментальних похибок, викликаних відхиленнями опору резисторів моста та давача температури (зазвичай низькоомного мідного термоперетворювача опору), цій схемі притаманна також методична похибка, викликана тим, що другі похідні ФП моста і ТП мають різні знаки. Цей стан відображений на рис. 1.2, де видно, що ТП мають додатну другу похідну ФП за температурою, а мостова схема – від'ємну. Для діапазону зміни температури вільних кінців від 0 до 40°C різниця між ФП моста і ТП для ТП типу ПП перевищує 1°C, а для типу ХА – 0,7°C. При використанні більш лінійного нерівноплечого моста цю похибку можна зменшити до 0,7°C та 0,5°C, що також суттєво для високоточних систем вимірювання температури. У [143] було запропоновано використати мости з двома термоперетворювачами опору. Такі схеми дають змогу добитися різниці між ФП моста і ТП не більше 0,06°C. Але такі схеми дуже складні у налаштуванні. Крім того, кількість елементів схеми у них зростає, тим самим, при використанні резисторів і сенсорів аналогічного типу, зростає інструментальна похибка. З точки зору систем вимірювання температури, мостові схеми мають ще один недолік – значний вплив опору проводів підключення термоперетворювача опору та їх температурних змін на ФП моста [28, 144, 145].

Наступним елементом структурної схеми рис. 1.1 є підсилювач П. Для



його побудови на сьогодні використовують мікросхеми дешевих прецизійних операційних підсилювачів. Успіхи мікроелектроніки привели до появи операційних підсилювачів, зокрема, фірми Analog Devices [146], які (наприклад, OP177 [147]) мають амплітуду шумів на рівні 0,3-0,5 мкВ, дрейф напруги зміщення на рівні 0,05-0,1 мкВ/°C та 0,5 мкВ/місяць, що годиться для систем вимірювання температури високої точності (хоча часто ці похибки коригують шляхом автоматичного встановлення нуля [148] на рівні засобу вимірювання). Таким чином, на сьогодні створення підсилювача для високоточних систем вимірювання температури не є проблемою.

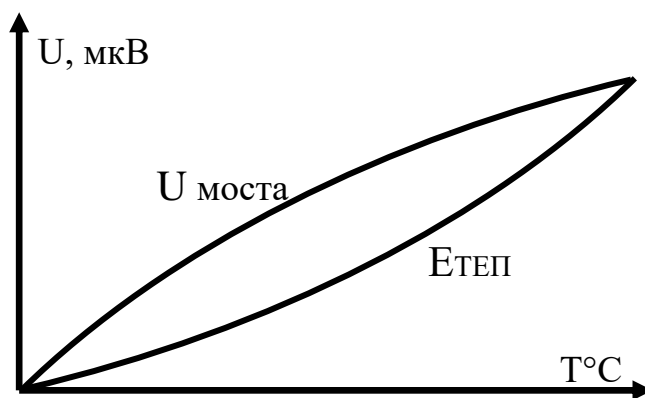


Рис. 1.2. Характер ФП рівноплечого незрівноваженого моста та ТП при компенсації температури вільних кінців ТП

Також на сьогодні не є проблемою прецизійний АЦП [149]. Ряд фірм, зокрема, Analog Devices [146], випускають 24-х розрядні сигма-дельта АЦП, наприклад, AD7714 [150], які мають діапазони до 20 мВ, характеризуються амплітудою шумів на рівні 0,15-0,5 мкВ та нелінійністю на рівні 0,0015%. Вони мають вбудовані функції автоматичного встановлення нуля та калібрування, їх треба лише програмно дозволити виконувати [150]. Таким чином, їх похибка в основному визначається якістю ключа закорочення входу при встановленні нуля та похибками джерела напруги калібрування [148]. Слід зазначити, що на сьогодні фірма Analog Devices [146] випускає дешеві мікроконвертори, наприклад, ADuC834 [151], які поєднують у своєму складі прецизійний 24-х розрядний сигма-дельта АЦП, широко вживаний

мікроконтролер серії MCS51 та інші пристрої (цифро-аналогові перетворювачі, інтерфейси тощо). При цьому найнижчий діапазон перетворення АЦП складає 20 мВ, що дає змогу відмовитися від використання підсилювача П. Мікроконвертори є оптимальною базою для вимірювальних модулів, зокрема, систем вимірювання температури високої точності.

Але на сьогодні багато приладів і вимірювальних модулів, що взаємодіють з ТЕП і ТП, мають низьку точність вимірювання термо-е.р.с. [125, 126], що веде до низької точності вимірювання температури та недоцільності використання методів корекції похибок компонентів вимірювального каналу. Ті ж засоби, що забезпечують високу точність вимірювання термо-е.р.с., часто мають великі похибки інших компонентів схеми. Наприклад, прилад вимірювання температури PJ6301 [127] фірми Termoelectra забезпечує високу точність вимірювання термо-е.р.с., але дві ТП, з якими він працює, підключаються до відкритих клем, розміщених на різних краях передньої панелі приладу, а датчик температури вільних кінців знаходиться всередині корпусу. Крім того, всі засоби та системи вимірювання температури, що випускаються серійно, не передбачають корекції похибок ТП. Навіть якщо у вимірювальних модулях типу NI9214 [125] передбачено можливість опрацювання результатів вимірювань за допомогою середовища розроблення програм LabView, алгоритми та програмне забезпечення модулів не передбачають корекції похибки ТП.

Як видно з проведеного аналізу найбільш суттєвих похибок ТП і приладів, що їх використовують, точність вимірювання температури з їх допомогою є доволі низькою і часто не відповідає потребам користувачів [6, 9]. Такий стан привів до інтенсивних наукових досліджень в області термоелектричних явищ і методів підвищення точності вимірювань з допомогою ТП. Використовувалися як конструктивно-технологічні, так і структурно-алгоритмічні методи підвищення точності. В основному вони концентрувались у наступних напрямках:

1. розроблення сплавів для ТП [58 – 86, 176];

2. розроблення та дослідження методів контролю якості термопарного дроту [59, 65-67, 76, 79, 81, 120];
3. розроблення матеріалів захисної арматури для ТЕП [60, 77, 79, 82];
4. розроблення методів калібрування ТП і ТЕП, як у лабораторних умовах, так і на місці експлуатації [13, 50, 94-96, 102, 110, 152 - 154], а також їх калібрування [103 – 111];
5. розроблення методів корекції динамічної похибки ТЕП [155, 156];
6. розроблення методів корекції початкового відхилення ФП ТП від номінальної [94 – 96];
7. розробка методів корекції похибок від дрейфу ФП ТП під дією температури експлуатації [51, 52, 94, 95, 97 – 101, 157];
8. розроблення методів корекції температури вільних кінців [143, 158 – 163];
9. розроблення методів лінеаризації ФП ТП [96, 143, 159];
10. розроблення вторинних приладів і систем для вимірювання температури з допомогою ТЕП [5, 6, 28, 52, 143, 161, 163-175].
11. розроблення методів та засобів корекції похибок та метрологічного забезпечення вторинних приладів і систем для вимірювання температури з допомогою ТЕП [177-184];
12. розроблення методів та засобів корекції похибок ТП ТЕП [50, 94-108, 112, 116, 122, 129-133, 139, 143, 145, 148, 149, 152, 153, 158, 159, 175, 185, 186].

Висока інтенсивність наукових досліджень у галузі термоелектричної термометрії підтверджується доволі великою кількістю публікацій у науково-технічних виданнях і проведенням спеціалізованих періодичних науково-технічних конференцій (ТЕМРМЕКО), де кількість доповідей стабільно перевищує дві сотні.

Однак, не дивлячись на досить велику інтенсивність і різносторонню спрямованість наукових досліджень, похибки ТЕП, що випускаються промисловістю, залишаються досить великими [48, 49]. Склалася ситуація,

при якій виробники не ризикують нормувати високу точність вимірювання саме температури, незважаючи на відомі методи корекції похибок ТП. Але відомі методи корекції не всіх похибок ТП. Зокрема, достатньо надійні методи корекції або компенсації похибки від набутої термоелектричної неоднорідності електродів появилися недавно [131, 134]. Крім того, ці методи, з точки зору виробників систем вимірювання температури, доволі трудомісткі та мало досліджені.

Тому, зважаючи на неодноразові згадування проблеми створення "точних термопар" та "стійких термопар" у дорожніх картах [55, 56], актуальним є створення високоточних систем вимірювання температури за допомогою ТЕП з неоднорідними ТП. Як вже було вказано, проблема розроблення нових термопар вищої точності була включена у дорожні карти як 2009 року [55], так 2014 року [56]. У розділі оцінки зробленої дорожньої карти [56] вказано на практичну відсутність прогресу – «перша дорожня карта [55] іноді мала оптимістичний погляд ... ». Тому проблема підвищення точності вимірювання температури за допомогою неточних, неоднорідних ТП надалі включена у список актуальних проблем термометрії.

Дорожні карти [55, 56] формулюють основні проблеми, вирішення яких веде до покращення метрологічних характеристик каналів вимірювання температури за допомогою ТП, наступним чином:

- 1) Створення нових ТП та покращення існуючих;
- 2) Створення сенсорів з метрологічним самопідтвердженням;
- 3) Забезпечення простежуваності результатів вимірювання на місці експлуатації;
- 4) Створення фінансово ефективних метрологічних процедур.

Слід відзначити також, що при розробленні нових методів і засобів точного вимірювання температури за допомогою ТП, зважаючи на високу трудомісткість зменшення впливу похибок ТП на результат вимірювання температури, треба, щоби невиключена похибка ТП (залишкова похибка ТП, отримана після застосування методів корекції її похибок) і надалі домінувала

серед похибок решти компонентів вимірювального каналу температури. Адже досягнення високої точності вимірювання решти компонентів вимірювального каналу температури вимагає значно менших затрат. Тому слід також звернути увагу на всі компоненти вимірювальних каналів, до яких підключені ТП.

Таким чином, в даному параграфі, на основі аналізу даних про характеристики ТЕП та їх чутливого елемента – ТП, показано, що ці найбільш вживані сенсори підвищених температур мають досить велику похибку вимірювання (вона є найбільшою у каналі вимірювання температури), викликану деградацією електродів ТП. Коли методи корекції одного з проявів цієї деградації, дрейфу ФП ТП, доволі добре розвинуті, то методи корекції іншого необхідно додатково дослідити.

## **1.2 Вплив набутої термоелектричної неоднорідності термопар на методи підвищення точності вимірювання температури**

Як було показано у § 1.1, не дивлячись на велику інтенсивність і різносторонню спрямованість наукових досліджень, похибки промислових ТЕП залишаються великими та практично незмінними десятки років [48, 49]. Однією з причин такого стану можна вважати те, що ТП, які довго експлуатувалися при високій температурі, притаманна похибка від набутої термоелектричної неоднорідності їх електродів [87 - 93, 113 - 121, 123, 124]. Тому необхідно провести аналіз властивостей цієї складової похибки вимірювання температури.

Виникнення похибки від набутої термоелектричної неоднорідності електродів ТП пов'язане з тим, що швидкість протікання деградаційних процесів у електродах ТП, які є причиною змін її ФП, залежить від температури [34, 50, 121, 123, 124, 141, 142]. Тому відхилення термо-е.р.с. окремих ділянок ТП, яку генерують її електроди, для тих ТП, що експлуатувалися тривалий час, залежить не тільки від різниці температур на межі ділянок, а і від температури, при якій ці ділянки знаходяться в даний

момент, бо деградація змінює чутливість (термоелектричну здатність) ділянок електродів не тільки при температурі експлуатації, а і при всіх інших температурах. Тобто, якщо ТП деградує, то для кожної ділянки міняється її ФП в цілому. Тому сумарна термо-е.р.с. всіх ділянок, що дрейфували (термо-е.р.с. ТП в цілому), стає залежною не лише від різниці температур між злупом і вільними кінцями, а і від розподілу температури вздовж електродів [122, 132]. Це означає, що вихідна термо-е.р.с. ТП, які довго експлуатувалися, може змінюватися навіть при відсутності змін температури злупу і вільних кінців ТП, виключно через зміну розподілу температури вздовж електродів ТП, тобто зміну профілю температурного поля вздовж її електродів. Вплив останнього на результат вимірювання скритий від безпосереднього спостереження, а тому мало досліджений і небезпечний [121]. Тому розглянемо механізм виникнення похибки від набутої в процесі тривалої експлуатації при високій температурі термоелектричної неоднорідності електродів ТП [104, 122, 185-188].

На рис. 1.3 подано ТП, розміщену в профілі ABCD температурного поля експлуатації. Нехай ділянки  $i$  першого  $E1$  і другого  $E2$  електродів ТП постійно експлуатуються при температурі  $T1$  на протязі часу експлуатації  $\tau$ . У них, згідно із [34, 50, 58, 60, 76, 84, 117], протікають деградаційні процеси:

- Хімічні – окислення компонентів сплавів електродів і їх домішок;
- Фізичні – рекристалізація, наростання міжкристалічних напружень;
- Дифузійні – забруднення із арматури і зовнішнього середовища.

Ці деградаційні процеси проходять неоднаково для різних електродів ТП при різних температурах (у різних ділянках) і впливають на ФП ТП теж неоднаково. Їх прояв у процесі експлуатації як зміну в часі генерованої ТП термо-е.р.с. при незмінній температурі її злупу та вільних кінців, називають дрейфом ФП ТП. Результати дослідження дрейфу ФП ТП, опубліковані у ряді робіт [34, 50, 141, 142], вказують на наявність загального тренду дрейфу ФП, що залежить від умов експлуатації та індивідуальних особливостей кожної ТП). Опубліковані у [34, 50, 141, 142] результати вказують на близьку до пропорційної залежність швидкості протікання деградаційних процесів від

температури та часу експлуатації для ділянок електродів ТП.

На рис. 1.3б і 1.3в показано орієнтовні залежності функції дрейфу термо-е.р.с. електродів хромель і алюмель від температури для деякого фіксованого часу експлуатації [47, 141, 142]. Слід відзначити, що, як це видно з рис. 1.3б і 1.3в, навіть при експлуатації ділянки при одній фіксованій температурі, в результаті деградаційних процесів міняється вся ФП даної ділянки. З рис. 1.3 видно також, що зміна профілю температурного поля вздовж електродів ТП теж приведе до зміни генерованої термо-е.р.с. тими ділянками електродів, температура яких змінилася під час зміни профілю температурного поля [122].

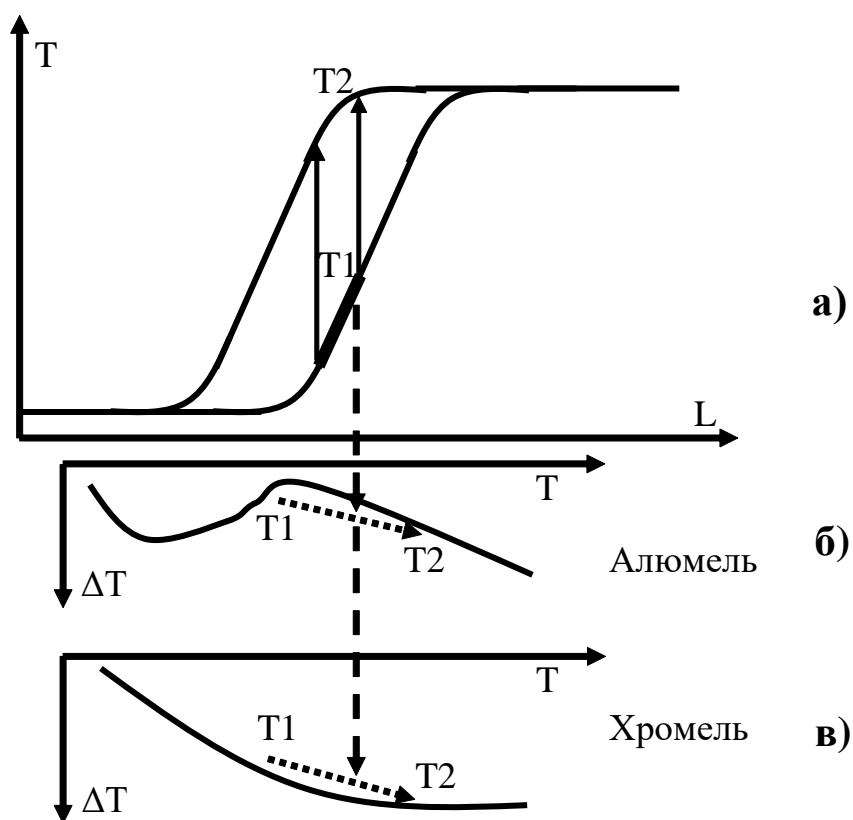


Рис. 1.3. Механізм впливу набутої в процесі експлуатації термоелектричної неоднорідності електродів ТП на генеровану термо-е.р.с.

Наприклад, відзначені на рис. 1.3а ділянки від електродів хромель і алюмель, в результаті зміни профілю температурного поля перейдуть з температури  $T_1$  в температуру  $T_2$  (показано стрілками на рис. 1.3а). Тоді зміниться похибки електрода хромель (показано стрілкою на рис. 1.3б) та похибка електрода алюмель (показано стрілкою на рис. 1.3в). Таким чином,

похибка ТП в цілому, як сума похибок всіх ділянок, що входять у її склад, при зміні профілю температурного поля вздовж електродів ТП змінюється, (тобто змінюється генерована нею термо-е.р.с.), незважаючи на те, що температури з'лиуту та вільних кінців (як це видно з рис. 1.3а) не змінилися. Це і є похибка від набутої у процесі експлуатації при високій температурі термоелектричної неоднорідності електродів ТП [122].

Очевидно, що якби деградаційні процеси в електродах не проходили, не було б дрейфу ФП ТП, тобто їх ФП би не мінялася у процесі експлуатації. Однак тоді не було б і похибки від набутої в процесі експлуатації неоднорідності електродів – відхилення термо-е.р.с. кожної ділянки ТП після довільного часу експлуатації відповідало б початковому відхиленню, викликаному ліквідацією в сплавах, з яких виготовлені електроди.

Слід відзначити, що ділянки ТП експлуатуються при температурах, які визначаються їх місцем в складі електродів і профілем температурного поля експлуатації. Тому параметри представлених на рис. 1.3б і 1.3в залежностей відхилень термо-е.р.с. від номінального значення будуть різними для кожної ділянки [122]. Крім того, аналогічні ділянки різних ТП, навіть ті, які експлуатуються в однакових умовах, будуть мати різні відхилення термо-е.р.с. від номінальної, через те, що процеси деградації мають стохастичний характер. Але в той же час стан електрода, в якому проходять перелічені вище процеси деградації, не змінюється раптово або хаотично – масив реалізацій дрейфу має основний тренд, що відбиває загальний характер протікання деградаційних процесів, і випадкову складову, що відбиває індивідуальні особливості протікання деградаційних процесів у даному середовищі [51]. Тому, в процесі вдосконалення методів корекції похибок ТП, викликаних дрейфом їх ФП [50, 141, 142], спочатку були розроблені методи корекції згідно із загальним трендом [51, 94, 95], а потім розроблялися і вдосконалювалися методи індивідуальної корекції [97 - 101].

Як показано в [188], дрейф ФП ТП і похибка, викликана набутою термоелектричною неоднорідністю електродів ТП, є різними проявами впливу



на генеровану термо-е.р.с. одних і тих же деградаційних процесів. Тому дрейф і похибка від набутої неоднорідності мають між собою тісний однозначний зв'язок [122, 133 188]. Це впливає з того, що при розгляді механізму впливу набутої неоднорідності електродів на генеровану ТП термо-е.р.с. при описі рис. 1.3 використано результати експериментальних досліджень дрейфу ФП електродів ТП (див. рис. 1.3б і 1.3в) [141, 142].

У [133, 188] доведено, що для неоднорідних електродів ТП максимальні значення похибки від набутої термоелектричної неоднорідності та від дрейфу ФП рівні. Це підтверджує тісний однозначний зв'язок між цими похибками. Також це дає змогу вивчати похибку від набутої термоелектричної неоднорідності ТП за результатами досліджень їх дрейфу.

Для дослідження похибки від набутої термоелектричної неоднорідності ТП розглянемо залежності, які її характеризують. Для цього розіб'ємо кожен електрод на віртуальні ділянки (як це було зроблено в [104, 122]) і допустимо, що різницею інтенсивності протікання деградаційних процесів в межах однієї ділянки можна нехтувати. Якщо спрямувати різницю температур  $T_{k+1} - T_k$  на кінцях ділянок, на які розбита ТП, до нуля, то можна визначити сумарну е.р.с.  $E_{\Sigma}$  кожного електрода як [6, 12]

$$E_{\Sigma} = \int_{T_0}^{T_{RK}} (e_N + \Delta e_k) dt = \int_{T_0}^{T_{RK}} e_N dt + \int_{T_0}^{T_{RK}} \Delta e_k(t) dt = E_{\Sigma N} + \int_{T_0}^{T_{RK}} \Delta e_k(t) dt, \quad (1.1)$$

де  $T_{RK}$  – значення температури зльоту ТП;  $T_0$  – значення температури вільних кінців ТП (для спрощення прийmemo, що  $T_0 = 0^{\circ}\text{C}$ );  $E_{\Sigma N}$  – номінальне значення термо-е.р.с., яку генерує термоелектрод під дією заданої різниці температур  $T_{RK} - T_0$ ;  $e_N$ ,  $\Delta e_k$  – номінальна питома термо-е.р.с. ділянок та її індивідуальні відхилення.

Інтеграл (1.1) визначає сумарну похибку даного електрода  $\Delta E_{\Sigma}$ . При цьому слід відзначити, що індивідуальне відхилення питомої е.р.с.  $k$ -тої ділянки  $\Delta e_k$  є функцією наступних змінних [34, 50, 58, 104, 117, 141, 142]:

1. індивідуальних відхилень хімічного складу матеріалу електрода від номінального складу сплаву, що викликані ліквідацією компонентів сплаву та наступним волочінням термопарного дроту;
2. індивідуальної температури експлуатації  $T_E$  кожної ділянки електрода;
3. часу  $\tau_E$  експлуатації кожної ділянки електрода при її температурі  $T_E$ ;
4. поточної температури  $T_D$  (температури діапазону, [104]), при якій знаходиться кожна ділянка електрода в момент визначення похибки ТП, тобто після зміни профілю температурного поля вздовж електродів.

Вплив на результат вимірювання температури першої причини похибки можна значно зменшити, переходячи до індивідуальної ФП ТП [96 - 98]. Друга і третя причини на момент визначення похибки ТП (тобто безпосередньо після зміни профілю температурного поля вздовж її електродів) є сталими. Вони відіграють роль параметрів функції, що описує індивідуальне відхилення питомої термо-е.р.с.  $k$ -тої ділянки. У (1.1) вони відображені як індекс  $k$  функції відхилення питомої термо-е.р.с.  $\Delta e_k(t)$  від номінального значення, в якій  $T_D$  є поточною температурою  $k$ -тої ділянки.  $T_D$  міняється відповідно до розподілу температур вздовж електродів.

Перейдемо від інтегрування  $\Delta e_k(t)$  по температурі  $T_D$  до інтегрування по довжині  $l$  електродів. Для цього введемо змінну  $\nabla t$  – позначення градієнта температурного поля вздовж електродів [122, 133]

$$\nabla t = \frac{\partial t}{\partial l} \quad . \quad (1.2)$$

В процесі тривалої експлуатації ТП, під дією високих температур, як видно з [141, 142], змінюється хімічний склад електродів та їх кристалічний стан [34, 117]. При цьому вплив цих змін на термо-е.р.с. ТП сильно залежить від температури, при якій кожна ділянка перебувала під час тривалої експлуатації [141, 142]. Через накопичення цих змін з різною інтенсивністю функція відхилення питомої термо-е.р.с.  $\Delta e_k(t)$  для кожної ділянки кожного електрода стає неоднаковою – вона отримує індивідуальний характер.

Виходячи з цього, на основі (1.1), з врахуванням (1.2), можна записати залежність, що визначає сумарну похибку  $\Delta E_{\Sigma}$  електрода в заданому температурному полі експлуатації [122, 133]

$$\Delta E_{\Sigma} = \int_0^{T_{RK}} \Delta e_k(t) dt = \int_0^l \Delta e_k(t) \frac{\partial t}{\partial l} dl = \int_0^l \Delta e_k(t) \nabla t dl . \quad (1.3)$$

З (1.3) виникає, що термо-е.р.с. ТП, яка експлуатувалася тривалий час, є інтегральною сумою термо-е.р.с. всіх ділянок електродів і залежить від профілю температурного поля вздовж електродів, що описується градієнтом  $\nabla t$ . Складність (1.3) полягає у тому, що функції відхилення питомої термо-е.р.с. кожної ділянки  $\Delta e_k(t)$ , як це вже було показано, є функціями багатьох змінних – в основному часу експлуатації  $\tau_E$ , температури експлуатації  $T_E$  та поточної температури  $T_D$ , які є індивідуальними для кожної ділянки.

У [122, 131] доведено, що похибка від набутої термоелектричної неоднорідності не має комутаційних властивостей – перехід з профілю температурного поля експлуатації в інше не еквівалентний зворотному переходу. Наприклад, перша ТП при експлуатації перебувала у лінійному профілі температурного поля, а друга ТП – у квадратичному. При заміні їх місцями отримаємо різні значення похибки від дрейфу їх ФП навіть при строго однакових процесах деградації електродів. В такому разі, згідно з [131], різні будуть і похибки від набутої термоелектричної неоднорідності електродів цих ТП. У [122, 131, 132] доведено, що похибка від набутої термоелектричної неоднорідності має різні значення при різних характерах змін профілю температурного поля. Якщо для ТП типу ХА профіль температурного поля змінити у зоні зльоту (зміна режиму роботи термоагрегата), то додаткова похибка вимірювання температури мінімальна (1,5 - 2°C) [122]. Якщо профіль температурного поля змінюється у зоні вільних кінців (зміна тепломасообміну між термоагрегатом і середовищем, сезонні, добові та погодні зміни), ця додаткова похибка буде більшою (5,5 - 6°C) [122]. Якщо профіль температурного поля змінюється і у зоні зльоту і у зоні вільних кінців

(аналогічно зміні глибини занурення ТЕП), це викликає максимальну додаткову похибку (до  $11^{\circ}\text{C}$ ) [122]. Такий режим роботи ТП визнано найбільш небезпечним з огляду на похибку, викликану набутою термоелектричною неоднорідністю її електродів.

Крім того, у [188] показано, що похибка ТП або електрода, отримана при експериментальному дослідженні дрейфу ФП ТП традиційним шляхом (періодичне вимірювання термо-е.р.с. ТП, що знаходиться у печі, яка імітує температуру експлуатації) не придатна для прямої побудови математичної моделі дрейфу ФП ТП. При таких дослідженнях отримуємо сумарну похибку дрейфу всіх ділянок ТП, що знаходилися при різних температурах (від максимальної до температури вільних кінців). Але ділянки, що знаходилися при нижчих температурах, деградували менше. Тому модель дрейфу ФП ТП, побудована безпосередньо за результатами вимірювання, при використанні дає значно занижені оцінки похибок. Для побудови адекватної математичної моделі дрейфу у [122] запропоновано використати те, що подані у [141, 142] криві похибок від дрейфу ФП ТП, отримані при експериментальних дослідженнях ТП при різних температурах експлуатації, подібні. Тому у [122] запропоновано ввести відповідний коефіцієнт перерахунку похибок від дрейфу ФП ТП для моделі, побудованої за результатами експериментальних досліджень, у похибки, дійсно отримані у цих експериментальних дослідженнях. Згідно із [122], ці коефіцієнти становлять 2,11 для хромелю та 1,39 для алюмелю. Це показує дуже значний вплив на результат вимірювання ділянок, які експлуатуються не при максимальній температурі.

Методи корекції похибок ТП від дрейфу ФП узагальнено у [51] та розвинуто у [97 - 101]. Їх висока точність базується на калібруванні на місці експлуатації за допомогою робочих еталонів (ТЕП або ТП) [50, 102, 116] або калібруванні за допомогою температурного калібратора [103 - 109]. А калібрування робочого еталона ведуть згідно із схемою передачі розміру Кельвіна. Метод калібрування калібратора температури розроблено у [111]. У [97 - 101] запропоновано будувати індивідуальні моделі дрейфу ФП ТП за

результатами калібрувань, зокрема, за допомогою нейронних мереж [98 - 101]. Тому потенційно методи, досліджені у [52, 97 - 101], мають високу точність і метрологічну надійність.

Однак, як було показано вище, дрейф ФП ТП є лише одним з проявів деградаційних процесів у електродах, іншим проявом є похибка вимірювання температури від набутої в процесі тривалої експлуатації термоелектричної неоднорідності електродів, яка проявляє себе як залежність генерованої неоднорідною ТП термо-е.р.с. від змін профілю температурного поля вздовж її електродів [122, 124, 188]. Тому згадані методи забезпечували високу точність вимірювання температури лише тих об'єктів вимірювання, профіль температурного поля яких має високу стабільність.

Для класифікації методів боротьби з похибками від дрейфу ФП ТП і від набутої термоелектричної неоднорідності виділимо постійну і змінну частини в градієнті температурного поля  $\nabla t$  вздовж електродів ТП [122]

$$\nabla t = \nabla t_{CONS} + \nabla t_{VAR} , \quad (1.4)$$

і запишемо (1.3) з врахуванням (1.4)

$$\begin{aligned} \Delta E_{\Sigma} &= \int_0^l \Delta e_k(t) \nabla t dl = \int_0^l \Delta e_k(t) (\nabla t_{CONS} + \nabla t_{VAR}) dl = \\ &= \int_0^l \Delta e_k(t) \nabla t_{CONS} dl + \int_0^l \Delta e_k(t) \nabla t_{VAR} dl \end{aligned} \quad (1.5)$$

При аналізі (1.5) можна відділити прояви деградації електродів ТП – перший інтеграл суми "відповідає" похибці від дрейфу ФП ТП, а другий – похибці від термоелектричної неоднорідності її електродів. При цьому можна виділити наступні варіанти корекції похибок ТП [122]:

**Варіант 1.** Якщо  $\Delta e_k(t) \rightarrow 0$  , то очевидно, що  $\Delta E_{\Sigma} \rightarrow 0$  , тобто при відсутності деградаційних процесів ні дрейфу, ні набутої неоднорідності немає, обидва інтеграли (1.5) рівні нулю, зміни ФП ТП відсутні. Цей випадок відповідає експлуатації ТП: 1) при низьких температурах (кімнатних) [122]; 2) на початку експлуатації – адже коли час  $\tau_E$  експлуатації прямує до нуля, то деградаційні процеси не встигають себе проявити, тобто, якщо  $\tau_E \rightarrow 0$  , то

$\Delta e_k(t) \rightarrow 0$ . Похибка ТП, при переході до індивідуальних ФП (при корекції початкового розкиду ФП ТП) визначається у такому випадку початковою (технологічною), відносно малою, неоднорідністю електродів [113 - 117].

**Варіант 2.** Якщо  $\nabla t_{VAR} \rightarrow 0$ , то похибка ТП  $\Delta E_{\Sigma}$  визначається першим інтегралом (1.5). Цей випадок відповідає експлуатації ТП в стаціонарному температурному полі, де її похибка визначається  $\Delta e_k(t)$ , тобто деградація електродів проявляється як дрейф ФП ТП. Тоді можна використовувати всі методи корекції дрейфу ФП ТП, узагальнені у [51] – калібрування [105], прогноз [94], що уточнюється за їх результатами [97 - 101]. Однак для виконання умови  $\nabla t_{VAR} \rightarrow 0$  калібрування ТП слід виконувати не у лабораторній печі, а на місці експлуатації [50] або в спеціальній печі, яка імітує температурне поле об'єкта експлуатації [104].

**Варіант 3.** Якщо припустити, що деградація електродів не залежать від температури, тобто  $\Delta e_k \neq f(t)$ , то з (1.3) видно, що термо-е.р.с. ТП залежить тільки від різниці температур з'луту і вільних кінців, тобто у такому гіпотетичному випадку похибка від набутої термоелектричної неоднорідності відсутня – ФП електродів дрейфує рівномірно, тому деградація електродів проявляється лише у вигляді дрейфу ФП ТП. Цей випадок можливий, коли причиною дрейфу є не температура, а, наприклад, проникаюча радіація.

**Варіант 4.** Якщо зміна градієнту  $\nabla t_{VAR}$  мала, то похибка ТП  $\Delta E_{\Sigma}$  визначається в основному першим інтегралом (1.5). Цей випадок відповідає експлуатації ТЕП на об'єкті профіль температурного поля якого змінюється мало (близький до стаціонарного). Похибка ТП в основному визначається  $\Delta e_{Ni} = f(\tau, T_E)$ , тобто прояв деградації електродів ТП у вигляді дрейфу ФП є домінуючим. При цьому можна використовувати методи корекції дрейфу ФП ТП перелічені в п. 2. Вплив другого інтегралу (1.5) тоді буде проявлятися як складова похибки корекції дрейфу ФП ТП (методична похибка такої корекції), яка погіршує (часом значно) її ефективність.

**Варіант 5.** Відразу після калібрування на місці експлуатації можна

вважати, що похибка ТП для даних умов відома. На протязі деякого часу можна вважати, що  $\Delta e_k(t) \rightarrow const$ . Тоді деградація проявляє себе виключно як похибка неоднорідності, що визначається другим доданком (1.5), а похибка неоднорідності пропорційна  $\nabla t_{VAR}$ . Саме цей випадок описано у [124] та зроблено недостатньо обґрунтований висновок про недопустимість корекції похибок ТП. Але, як показано у [104], навіть при значних змінах  $\nabla t_{VAR}$ , для неоднорідної ТП можна перерахувати похибку профілю температурного поля калібрування у похибку профілю температурного поля експлуатації. Але метод перерахунку, розроблений у [104], використовує математичні моделі дрейфу кожної ділянки ТП. Ці моделі, побудовані на базі експериментальних досліджень дрейфу ФП однотипних ТП у аналогічних умовах експлуатації, не можуть врахувати індивідуальні особливості дрейфу ділянок, що веде до методичної похибки перерахунку. Ця похибка зростатиме з часом через подальшу деградацію електродів ТП. Коригувати моделі дрейфу ФП ділянок ТП за результатами її калібрування запропоновано у [98-101]. Але у результаті калібрування отримуємо похибку ТП у цілому, а не її ділянок. У [185] запропоновано розподіляти відхилення результату прогнозу похибки ТП від результатів калібрування між математичними моделями дрейфу ділянок. Але достовірний критерій такого розподілу не визначено – запропоновано чотири критерії [186], але вони визначені емпірично, їх ефективність не підтверджена.

**Варіант 6.** Якщо зміну градієнту  $\nabla t_{VAR}$  не можна вважати малою, то похибка ТП  $\Delta E_{\Sigma}$  визначається обома інтегралами залежності (1.5). При цьому вказані у п. 2 методи корекції похибки дрейфу ФП ТП не забезпечують суттєве підвищення точності вимірювання температури. Адже максимальна похибка від набутої термоелектричної неоднорідності, згідно з [188], рівна максимальній похибці дрейфу – при суттєвій зміні профілю температурного поля похибка дрейфу і неоднорідності сумірні – корекція однієї з них без врахування іншої не веде до підвищення точності результату вимірювання температури. Як було вказано у варіанті 5, метод перерахунку похибки від

набутої неоднорідності [104] не забезпечує індивідуальну корекцію моделей похибки ділянок ТП, а його модифікація [186] не забезпечує надійний розподіл дійсної похибки ТП між її ділянками.

Ознакою достовірності критерію розподілу похибки ТП між ділянками був би вдалий прогноз похибки від набутої неоднорідності в умовах, які відповідають п. 5 – при правильному розподілі прогнозована похибка ТП  $\Delta E_{\Sigma}$  при різних температурних полях буде відповідати її дійсному значенню. Відповідно цьому розроблено метод корекції індивідуальних моделей дрейфу ділянок ТП шляхом її калібрування в наборі різних температурних полів [131] – при калібруванні імітується зміна градієнту  $\nabla t_{VAR}$ . Отриманий ряд значень похибок ТП в цілому  $\Delta E_{\Sigma}$  дає змогу правильно розподілити похибки між моделями дрейфу окремих ділянок ТП. Якщо кількість профілів температурного поля калібрування рівна кількості ділянок обох електродів ТП, то опрацювання відхилень прогнозу похибки від результатів калібрування полягає у рішенні системи лінійних рівнянь [131]. Але тоді виникає суперечність між кількістю ділянок та трудомісткістю калібрування. Вирішити цю суперечність дає змогу використання штучних нейронних мереж [122, 131], що навчаються на даних експериментальних досліджень дрейфу ФП групи однотипних ТП у аналогічних умовах. Як показано у [122], вдається звести кількість профілів температурного поля калібрування до семи. Обмежує точність методу зміна характеру деградації електродів через зміну умов експлуатації ділянок при зміні профілю температурного поля [187]. Тому цей метод доцільно використовувати, коли зміни градієнту  $\nabla t_{VAR}$  не тривалі та чіткі.

**Варіант 7.** Аналіз (1.5) дає змогу зробити тривіальний висновок про те, що якби градієнт  $\nabla t_{VAR}$  не змінювався, похибка від набутої термоелектричної неоднорідності не могла би себе проявити. Тому для усунення впливу цієї похибки на результат вимірювання у [133, 134] запропоновано стабілізувати профіль температурного поля вздовж електродів головної ТП, що служить для



вимірювання температури об'єкта. Така стабілізація температурного поля досягається розміщенням вздовж електродів (у зоні градієнту) декількох підсистем регулювання температури, які складаються із сенсора температури (додаткової ТП), нагрівача і регулятора, що підтримує задану температуру на своїй ділянці (зоні нагріву) [133 - 136]. Такий ТЕП компенсує зміни профілю температурного поля об'єкта і створює вздовж електродів головної ТП власне температурне поле, профіль якого не залежить від профілю температурного поля об'єкта вимірювання. ТЕП, що реалізує цей метод боротьби з похибкою від набутої термоелектричної неоднорідності, було названо ТЕП з керованим профілем температурного поля – ТЕП з КПТП [134]. Таким чином, у ТЕП з КПТП ситуація відповідає п. 2, тобто  $\nabla t_{VAR} \rightarrow 0$  і деградація електродів ТП не може себе проявити як похибка набутої термоелектричної неоднорідності. Деградація проявляє себе тільки через перший інтеграл (1.5), тобто як дрейф ФП головної ТП. А її дрейф можна успішно коригувати всіма переліченими в п. 2 методами. При цьому характер і тривалість зміни профілю зовнішнього температурного поля на корекцію не впливають. Тому варіант 7 забезпечує, порівняно з варіантом 6, значно кращі умови прогнозу дрейфу ФП ТП.

Окремо стоїть запропонований у [128] та розвинутий у [129, 130] метод визначення похибки ТП на місці експлуатації шляхом пропускання струму через ТП у двох напрямках і вимірюванні змін температури з'яту під дією ефекту Пельтьє. Однак у [128 - 130] не було проведено аналіз похибок цього методу. Тому поки що метод можна використати лише для контролю функціонування ТП або ТЕП.

Таким чином, як видно з викладеного, заборона корекції похибок ТП взагалі [124] – хибна. Умови, коли похибка неоднорідності себе не проявляє або проявляє себе слабо, можна створити, що дає змогу використовувати ряд методів боротьби з наслідками деградації електродів ТП, які проявляють себе як дрейф ФП ТП. Коли проявами похибки від набутої неоднорідності нехтувати не можна, можлива її корекція (варіант 6) або компенсація (варіант 7). Тому можна зробити висновок, що існують можливості підвищення

точності вимірювання температури неоднорідними ТП.

У даному параграфі описано процес виникнення похибки ТП від набутої термоелектричної неоднорідності її електродів та проведено аналіз її впливу на відомі методи підвищення точності вимірювання температури. Показано, що, незважаючи на цей вплив, можливе створення умов, при яких цю похибку можна коригувати або компенсувати.

### **1.3 Оцінка стану метрологічного забезпечення температурних вимірювань**

Як було показано у попередніх параграфах, основний вид сенсорів, що використовуються в енергетиці – ТП типу ХА – мають доволі великі похибки. У той же час успіхи мікроелектроніки та обчислювальної техніки дали змогу значно зменшити похибку електричного тракту ВК та підвищити його метрологічну надійність як за рахунок використання конструктивно-технологічних методів підвищення точності та стабільності компонентів ВК, так і широким застосуванням структурно-алгоритмічних методів [52, 178, 180], які реалізують мікроконтролери та мікроконвертори [189, 190].

Розглянемо сучасні засоби вимірювань найвищої точності, призначені для взаємодії з ТЕП типу ХА. Їх технічні характеристики для провідних виробників [191- 196], подані у табл. 1.4, де використано такі позначення: НУ і РУ – нормальні та робочі умови експлуатації; NMR і CMR – коефіцієнти зменшення впливу завад нормального і загального виду; Напр. завади і Кан.-кан. – допустимі напруги завад загального виду і між-канальної напруги.

Як видно з табл. 1.4, всі засоби декларують похибку вимірювання температури менше 1°C. Але для більшості у документації прямо вказано, що у цю похибку не входить похибка сенсора, для інших це видно з контексту.

У свою чергу похибки сенсорів, зокрема розглянутих у § 1.1 ТП типу ХА (див. табл. 1.1 – 1.3), приблизно у 7...40 разів перевищують похибки вказаних у табл. 1.4 засобів. Таким чином, похибка ТП у вимірювальному каналі є домінуючою, а похибка вимірювання температури за допомогою вказаних у

табл. 1.4 засобів буде визначатися не їх похибкою, а похибкою ТП. Тому допустимо оцінити стан метрологічного забезпечення вимірювань температури у енергетиці лише на основі похибки одного компонента – ТП.

Табл. 1.4. Точні засоби вимірювання температури провідних виробників

Фірма	Тип	Похибка	Завадостій- кість	Напр. завади	Вільні кінці	Комута- тор
National Instru- ments	NI PXI E4353	0,58°C (нелін. 20ppm)	NMR – 70 dB CMR – 170 dB		Термови- рівнювач ТВ4353	Кан.-кан. ±10В
Fluke	Net- DAQ 2640	0,65°C НУ 1°C РУ	NMR – 50 dB CMR – 120 dB	±150 В	Блок підклю- чення	Кан.-кан. ±33В
Fluke	Net- DAQ 2645	1,1°C НУ 1,5°C РУ	NMR – 50 dB CMR – 120 dB	±150 В	Блок підклю- чення	Кан.-кан. ±33В
Fluke	726	0,5°C НУ				1 канал
Fluke	1560	0,3°C НУ				Дод. 12кан
Fluke	1586A	0,32°C НУ 0,64°C РУ	NMR – 55 dB, CMR – 140 dB	±50 В	Термови- рівнювач 0,25°C	

Оцінку стану метрологічного забезпечення температурних вимірювань у енергетиці проведемо згідно із [197 - 201]. Відомо [202], що коефіцієнт корисної дії ідеальної теплової машини  $KKD^{ID}$  визначається у першу чергу температурами нагрівання  $T_N$  та охолодження  $T_O$  робочої речовини.

Для теплової електростанції найважливішим обмеженням є допустима температура водогрійних трубок  $T_{VT}^{DOP}$ , на які діє полум'я спалюваного пального. Точне значення  $T_{VT}^{DOP}$  не відоме, але оцінити стан метрологічного

забезпечення температурних вимірювань можна оцінкою різниці температур між температурами нагрівання  $T_N$  пари у ідеальній тепловій машині та допустимою температурою водогрійних трубок  $T_{VT}^{DOP}$ , яку можна задати системі керування піччю. Ця різниця визначається саме недосконалістю вимірювальних та керуючих каналів системи керування температурою печі.

Згідно із [197], прийmemo, що коефіцієнт  $K$ , який характеризує ступінь важливості точності контролю технологічного параметра (температури водогрійних трубок  $T_{VT}$ ), рівний  $K = 0,5$  (розрив трубки при температурі пари  $\approx 600^\circ\text{C}$  та її тиску до 600 атмосфер – важка аварія, що веде до руйнувань і тривалої зупинки печі на ремонт). У свою чергу, згідно із [197],

$$K = \frac{\Delta_{DOP}}{T}, \quad (1.6)$$

де  $\Delta_{DOP}$  – допустима похибка вимірювання технологічного параметра;  $T$  – допуск на технологічний параметр.

Також, згідно із [197], вважаємо, що індекс достовірності контролю  $C_D$  повинен бути доволі високим, прийmemo  $C_D = 2$ . Згідно із [197], маємо

$$C_D = K \frac{\sigma^{TP}}{\sigma}, \quad (1.7)$$

де  $\sigma^{TP}$  – варіативність технологічного параметра;  $\sigma$  – реальна похибка вимірювання технологічного параметра.

Також прийmemo, що  $\Delta_{DOP} = \sigma^{TP}$ , тобто система керування піччю практично повністю відповідає вимогам даного термоагрегата.

Підставивши (1.6) у (1.7) та перетворивши, отримаємо

$$T = \frac{C_D \sigma}{K^2}, \quad (1.8)$$

а підставивши прийняті значення  $K = 0,5$  та  $C_D = 2$ , отримаємо

$$T = 8\sigma. \quad (1.9)$$

У свою чергу реальна похибка вимірювання на технологічного параметра  $\sigma$ , як було прийнято раніше, визначається домінуючою похибкою ТП. Згідно із §§ 1.1, 1.2, межу поточної похибки ТП  $\Delta_{TP}^{POT}$  можна оцінити як

$$\Delta_{TP}^{POT} = \sqrt{(\Delta_{TP}^{POCH})^2 + (\Delta_{TP}^{DR})^2 + (\Delta_{TP}^{NEOD})^2}, \quad (1.10)$$

де  $\Delta_{TP}^{POCH}$  – початкові (при випуску) допустимі відхилення ФП ТП типу ХА, згідно із [48],  $T_E = 700^\circ\text{C}$ ;  $\Delta_{TP}^{POCH} = 2,4^\circ\text{C}$ ;  $\Delta_{TP}^{DR}$  – дрейф ФП ТП, для ТП типу ХА під час експлуатації при температурі  $T_E = 700^\circ\text{C}$  на протязі 2000 годин, згідно із [34],  $\Delta_{TP}^{DR} = 13^\circ\text{C}$ ;  $\Delta_{TP}^{NEOD}$  – похибка від набутої у процесі експлуатації термоелектричної неоднорідності електродів ТП. Для ТП типу ХА під час експлуатації при температурі  $T_E = 700^\circ\text{C}$  на протязі 2000 годин, згідно із [122], можна оцінити  $\Delta_{TP}^{NEOD} = 6,1^\circ\text{C}$ .

Підставивши у (1.10) значення похибок, отримаємо  $\Delta_{TP}^{POT} \approx 14,6^\circ\text{C}$ , а допуск на технологічний параметр буде становити  $T = 116^\circ\text{C}$ , що цілком неприйнятно. Корекція початкового відхилення ФП ТП від номінальної [95] не дасть великого ефекту, бо, як видно із значень складових похибки ТП, що входять у (1.10), допустимі відхилення ФП ТП типу ХА при випуску з виробництва – найменша складова поточної похибки ТП  $\Delta_{TP}^{POT}$ .

Навіть якщо використати ТЕП з КПТП [133, 134], тобто забезпечити  $\Delta_{TP}^{NEOD} \rightarrow 0$  (забезпечивши перед тим  $\Delta_{TP}^{POCH} \rightarrow 0$ ), отримаємо  $T = 104^\circ\text{C}$ . Використання прогнозу похибки від дрейфу ФП ТП згідно із [100] дає змогу зменшити цю похибку до 30% її значення, тобто забезпечити  $\Delta_{TP}^{DR} \approx 4^\circ\text{C}$ . Однак навіть тоді отримаємо  $T = 32^\circ\text{C}$ .

Таким чином, отримати прийнятні значення допуску на технологічний параметр  $T$  при використанні навіть сучасних засобів вимірювання температури, вказаних у табл. 1.4, можна лише за рахунок:

1. підвищення ризику виникнення аварії, тобто  $K \rightarrow 1$ ;

2. зменшення достовірності контролю  $C_D \leq 1$  ;
3. використання методів підвищення точності сенсорів, тобто зменшення межі поточної похибки ТП  $\Delta_{TP}^{POT}$  під час експлуатації.

Очевидно, що перші два шляхи неприйнятні, вони підвищують ризик важких техногенних аварій. Третій шлях вимагає додаткових затрат на свою реалізацію. Оцінимо економічну ефективність такого шляху.

Підвищення реальної температури водогрійних трубок  $T_{VT}^{REAL}$  до її допустимого значення  $T_{VT}^{DOP}$  , тобто зменшення допуску на технологічний параметр  $T = T_{VT}^{DOP} - T_{VT}^{REAL}$  веде до підвищення коефіцієнту корисної дії (ККД) електростанції [202], тобто до вироблення додаткової електроенергії з тієї самої кількості палива. Оцінимо її вартість за теорією ідеальної теплової машини, яка працює за циклом Карно [202]. Цикл Карно (рис. 1.4) ідеальної теплової машини складається з двох ізотерм (горизонтальні прямі на рис. 1.4) і двох адіабат (вертикальні прямі на рис. 1.4).

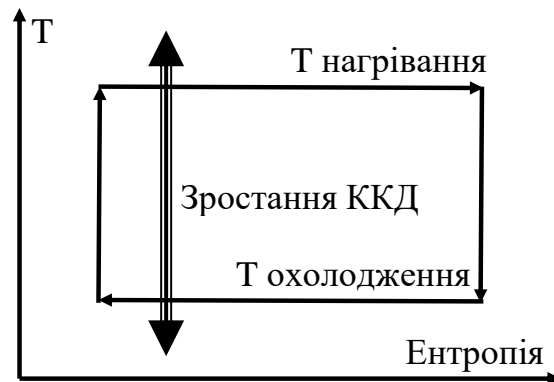


Рис. 1.4. Цикл Карно для ідеальної теплової машини

Згідно із [202], для ідеальної теплової машини ККД визначається лише абсолютними термодинамічними температурами нагрівника та охолоджувача, тобто  $KKD^{ID}$  можна визначити за формулою

$$KKD^{ID} = \frac{T_N - T_O}{T_N}, \quad (1.11)$$

де  $T_N$  – температура нагрівника (у Кельвінах);  $T_O$  – температура холодильника

(у Кельвінах).

У нашому випадку можна прийняти, що  $T_N = T_{VT}^{DOP}$ . Температура  $T_O$  для теплової електростанції визначається ефективністю охолодження пари на виході з турбіни. Для оцінки ефективності підвищення точності вимірювання  $T_N$  значення  $T_O$  не принципове. Тому приймемо, що  $T_O = const$ .

На рис. 1.5 подана залежність  $KKD^{ID}$  від температури нагрівника  $T_N$  при  $T_O = const = 300\text{ K} \approx 27^\circ\text{C}$ . Як видно з графіка рис. 1.5, залежність  $KKD^{ID}$  від температури нагрівника  $T_N$  нелінійна. Для кращої ілюстрації зростання  $KKD^{ID}$  від температури нагрівника  $T_N$  побудуємо графік залежності швидкості зміни  $KKD^{ID}$  від температури для таких самих умов. Такий графік подано на рис. 1.6. Як видно з графіка рис. 1.6, для сучасних теплових електростанцій, які працюють при температурах  $560\dots600^\circ\text{C}$  [203] (що відповідає температурам  $833\dots873\text{ K}$ ), приріст  $KKD^{ID}$  суттєво сповільнюється. При зростанні температури нагрівника  $T_N = 873\text{ K}$  на  $1\text{ K}$  для ідеальної теплової машини приріст  $\delta_{KKD1K}^{ID}$  складе приблизно  $0,037\%$ .

Слід відзначити, що коефіцієнт корисної дії реальної теплової електростанції  $KKD^{REAL}$  набагато нижчий від  $KKD^{ID}$  ідеальної теплової машини. Тому приріст виробленої додаткової електроенергії з тієї самої кількості затраченого палива буде пропорційно меншим. У [203] вказано, що  $KKD^{REAL}$  знаходиться у межах  $36\text{-}46\%$ . Виходячи з цього можна оцінити приріст  $KKD^{REAL}$  при підвищенні температури нагрівника  $T_N$ . Для цього спочатку обчислимо  $KKD^{ID}$  [203], наприклад, для температур нагрівника  $T_N = 600^\circ\text{C} \approx 823\text{ K}$  та охолоджувача  $T_O = 27^\circ\text{C} \approx 300\text{ K}$

$$KKD^{ID} = \frac{T_N - T_O}{T_N} = \frac{823 - 300}{823} \approx 0,635. \quad (1.12)$$

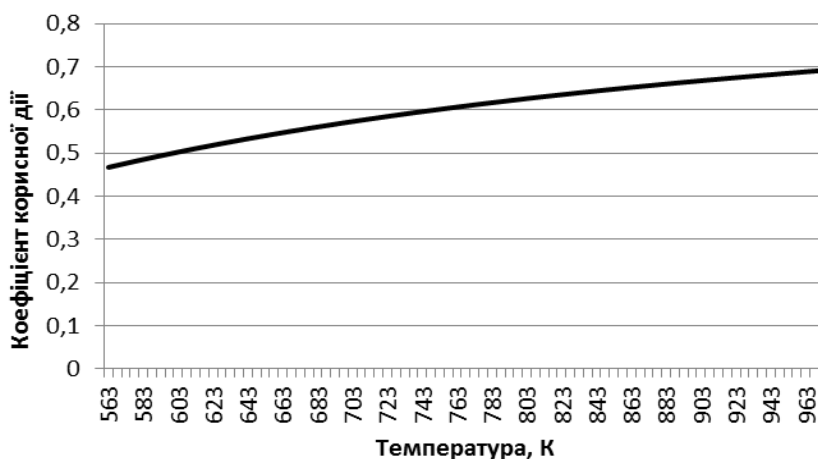


Рис. 1.5. Залежність коефіцієнта корисної дії ідеальної теплової машини від температури нагрівника при температурі холодильника 27°C (300К).

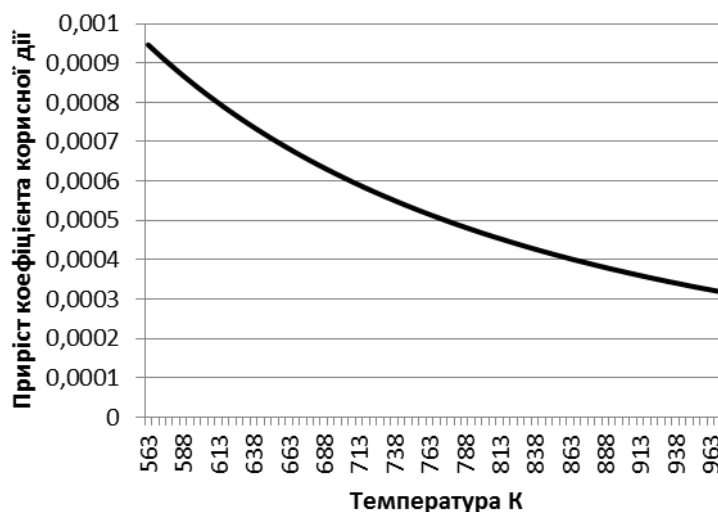


Рис. 1.6. Графік залежності швидкості зміни ККД ідеальної теплової машини від температури нагрівника

"Коефіцієнт неідеальності"  $K^{NID}$ , тобто відставання  $KKD^{REAL}$  від  $KKD^{ID}$ , можна обчислити за їх відношенням

$$K^{NID} = \frac{KKD^{ID}}{KKD^{REAL}} = \frac{0,635}{0,46} \approx 1,38. \quad (1.13)$$

Таким чином, при зростанні температури нагрівника  $T_N = 873 \text{ K}$  на  $1 \text{ K}$  для реальної електростанції приріст ККД  $\delta_{KKD1K}^{REAL}$  складе



$$\delta_{KKD1K}^{REAL} = \frac{\delta_{KKD1K}^{ID}}{K^{NID}} = \frac{0,037\%}{1,38} \approx 0,027\% . \quad (1.14)$$

Наприклад, при тепловій потужності одного котла Бурштинської ДТЕК [204]  $P_1 = 400 \text{ MW}$  приріст генерованої електроенергії  $\Delta P_1$  становитиме

$$\Delta P_1 = \frac{\delta_{KKD1K}^{REAL} \cdot P_1}{100\%} = \frac{0,027\% \cdot P_1}{100\%} \approx 0,11 \text{ MW} . \quad (1.15)$$

Це відповідає приросту генерованої за рік електроенергії  $\Delta E_1$

$$\Delta E_1 = 0,11 \cdot 24 \cdot 365 = 963,6 \text{ MWh} . \quad (1.16)$$

При мінімальній ціні електроенергії в Україні  $c_{1h}^{EL} = 0,9 \text{ UAH}$  ціна додаткової електроенергії  $\Delta C_1^{EL}$  при зростанні  $T_N$  на  $1 \text{ K}$  становитиме

$$\Delta C_1^{EL} = \Delta E_1 \cdot c_{1h}^{EL} = 963,6 \cdot 0,9 \cdot 1000 \approx 867000 \text{ UAH} . \quad (1.17)$$

Бурштинська ДРЕС має 6 котлів, тому ціна додаткової електроенергії для них  $\Delta C_6^{EL}$  при зростанні  $T_N$  на  $1 \text{ K}$  становитиме

$$\Delta C_6^{EL} = 867000 \cdot 6 \approx 5200000 \text{ UAH} . \quad (1.18)$$

З (1.18) видно, що підвищення точності підтримання температури нагрівника лише на  $1 \text{ K} \approx 1^\circ\text{C}$  дає значний економічний ефект і затрати на переобладнання вимірювально-керуючих систем безумовно доцільні.

Як було показано вище, у ВК температури нагрівника домінує похибка ТП. Тому саме її слід зменшити у першу чергу. У §§ 1.1, 1.2 було розглянуто похибки ТП і відомі методи їх корекції. Похибку від початкового відхилення ФП ТП доволі легко відкоригувати шляхом переходу до індивідуальної ФП [96]. Для ТП, згідно із [95], необхідно провести її калібрування за допомогою робочого еталону (ТП [50] або репера температури [103, 105]) і відкоригувати її похибку. Але це не зменшить деградації електродів ТП при експлуатації.

Методи корекції дрейфу ФП ТП теж відомі [51, 97-101]. Але для промисловості ці методи мають відносну низьку метрологічну надійність. Це пов'язано з тим, що дрейф ФП ТП є одним з проявів деградації її електродів.

Іншим проявом, як це показано у [81, 87, 104, 117, 121 - 124, 133, 185] є похибка від набутої при тривалій експлуатації при високих температурах термоелектричної неоднорідності електродів ТП. За даними досліджень [87, 104, 117, 121 - 124, 185] похибка від набутої термоелектричної неоднорідності може бути доволі великою. З досліджень [122, 188] видно, що ця похибка може перевищувати похибку від дрейфу ФП даної ТП. А у [123] зазначено, що похибка від набутої термоелектричної неоднорідності для ТП типу ХА може досягати 30°C. Тому, як було вказано у § 1.2, корекція виключно похибки, зумовленої дрейфом ФП ТП, може вирішити проблему підвищення точності вимірювання температури лише у окремих, чітко окреслених випадках. – при вимірюванні температури об'єктів, які мають високу стабільність профілю температурного поля. Як показано [133] навіть незначні зміни профілю температурного поля викликають доволі великі похибки вимірювання температури. Зокрема, похибка від набутої термоелектричної неоднорідності починає впливати на похибку вимірювання температури вже при зміні профілю температурного поля об'єкта вимірювання на 6...8°C. Такі малі зміни профілю температурного поля характерні скоріше для лабораторного обладнання, встановленого у опалюваному приміщенні. Котли теплових електростанцій є великими термоагрегатами, на які діють як добові, так і сезонні зміни температури. Також на профілі їх температурних полів діють поточні погодні умови – дощ, хмари, положення сонця та напрям вітру. Тому їх ніяк не можна віднести до об'єктів, які мають високу стабільність профілю температурного поля.

Використання ТЕП з КПТП [133, 134] дає змогу зменшити вплив змін профілю температурного поля об'єкта на похибку вимірювання температури настільки суттєво, що домінуючою стає похибка від дрейфу ФП ТП. Але, як вже було сказано, методи корекції дрейфу ФП ТП самі по собі без періодичного уточнення математичної моделі дрейфу за результатами періодичного визначення похибки [50, 103, 105] мають відносно малу метрологічну надійність, що змушує при їх використанні зменшувати

коефіцієнт  $K$  та/або збільшувати індекс  $C_D$  [197]. А це, у свою чергу, збільшує допуск на технологічний параметр  $T$ . Виникає суперечність, яку не можна вирішити у рамках існуючих методів підвищення точності вимірювання температури за допомогою ТП.

У параграфі оцінено економічну ефективність зменшення похибки вимірювання підвищених температур на прикладі теплової електростанції. Показано, що підвищення виробництва електроенергії без зростання розходу палива явно перекидає можливі затрати на модернізацію вимірювально-керуючих систем, які регулюють температуру у печах електростанції.

#### **1.4 Вибір напрямку подальших досліджень**

Як було вказано, відомо ряд методів, покликаних суттєво покращити точність вимірювання підвищених температур. Слід відзначити, що всі вони тим чи іншим чином спираються на корекцію або компенсацію похибок за рахунок вдосконалення методів метрологічного забезпечення. Очевидно, що результативність цих методів слабо залежить від типу ТП. Тому, якщо деякий напрям вдосконалення метрологічного забезпечення буде визнано перспективним, то його доцільно розвивати спираючись на існуючі типи ТП.

Для вибору напрямку подальших досліджень слід оцінити перспективи відомих методів підвищення точності вимірювання температури. Для оцінки використаємо критерій ефективності методу, тобто мінімум затрат на його реалізацію при суттєвому підвищенні точності вимірювання температури. При цьому врахуємо, щонайперше, затрати на модернізацію самого сенсора, як постійні затрати. Хоча затрати на програмне забезпечення методів зазвичай значно перевищують затрати на апаратне забезпечення, їх враховувати у даному випадку недоцільно, тому що це разові затрати [179]. По-друге, будемо враховувати затрати на поточну реалізацію методу. При цьому перевагу надамо можливості оперативного визначення похибки сенсора без використання додаткового обладнання, не передбаченого у конструкції

модернізованого сенсора або вимірювального каналу.

Відповідно до такої класифікації найкращим буде оперативний метод визначення поточної похибки ТП на базі ефекту Пельтьє, запропонований у [128] та досліджений у [129, 130]. Модернізація ТП згідно із [130] зводиться до того, що до кожного електрода приєднують (приварюють, припаюють) додаткові електроди, як це показано на рис. 1.7. Через ці електроди, згідно із [130], пропускають струм, який, завдяки ефекту Пельтьє, або додатково нагріває робочий кінець, або охолоджує його. За різницею генерованої ТП термо-е.р.с. обчислюють дійсне значення питомої термо-е.р.с. ТП. Однак варіант, запропонований у [128], практично непрацездатний (не враховано теплоту Джоуля, що виділяється у електродах при проходженні струму). А у [130] – не оцінено похибку визначення дійсного значення питомої термо-е.р.с. ТП. Тому, перспективність методу можна оцінити лише після оцінки його інструментальних та методичних похибок у подальших розділах.

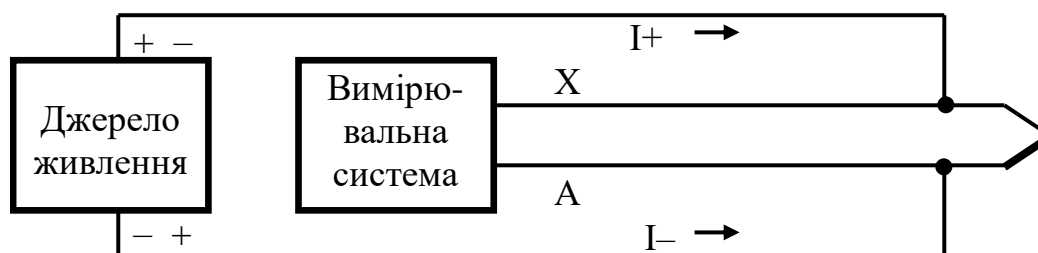


Рис. 1.7. Схема вимірювання різниці спадів напруги при реалізації оперативного методу визначення поточної похибки ТП на базі ефекту Пельтьє

Наступним за апаратною складністю можна вважати запропонований у [122] метод корекції похибки ТП шляхом побудови нейромережевої моделі її похибки за результатами експериментального визначення цієї похибки у температурних полях різного профілю. При реалізації методу конструкція ТП ускладнюється через додаткові ТП, потрібні для слідкування за змінами профілю температурного поля вздовж ТП, яка вимірює температуру об'єкта. Крім того, метод не є оперативним через потрібне періодичне визначення похибки у температурних полях різного профілю (у лабораторних умовах).

При реалізації методу слід демонтувати ТЕП, перенести його у спеціальну піч із змінним профілем температурного поля, експериментально визначити похибки ТП не менше, ніж у сімох профілях температурного поля [122] (кожен раз слід дочекатися закінчення перехідного процесу встановлення температури), та повернути ТЕП на місце експлуатації. Наступним недоліком методу [122] є залежність невиключеної похибки корекції від режиму експлуатації ТП. Метод має високу точність при рідких нетривалих змінах профілю температурного поля. А тривалі плавні періодичні зміни профілю температурного поля експлуатації (наприклад, сезонні та погодні зміни профілю температурного поля печі, розміщеної не у приміщенні) можуть змінювати характер деградації електродів ТП. Це змінює характер дрейфу ФП ділянок ТП, що вимагає відповідної корекції нейромережевої моделі їх похибки. А це, у свою чергу, вимагає частішого калібрування і збільшує трудомісткість методу.

Апаратно найскладнішим можна вважати розроблений та досліджений у [133] метод стабілізації профілю температурного поля вздовж електродів головної ТП, що вимірює температуру об'єкта, реалізований у ТЕП з КПТП. Але ТЕП з КПТП створює вздовж електродів головної ТП свій власний профіль температурного поля, на який слабо впливають інші температурні поля. Тому характер деградації електродів ТП визначають лише домішки у середовищі експлуатації. А модель похибки головної ТП при експлуатації слід лише уточнювати. При цьому, як показано у § 1.3, для корекції похибки головної ТП годяться всі методи, досліджені та розвинуті у [51, 97-101].

Однак для побудови моделі похибки головної ТП все таки необхідно періодично експериментально визначати її похибку. Для цього можна використати калібрування ТЕП з КПТП у лабораторних умовах у одному, довільному, профілі температурного поля. Адже ТЕП з КПТП все одно створить свій власний профіль температурного поля. Калібрування на місці експлуатації можна вести за допомогою еталонного ТЕП або репера температури. Перевага еталонного ТЕП – вони широко використовуються у

метрології, а недоліки – його встановлення додатково ускладнює конструкцію ТЕР з КППП і те, що недопустиме використання еталонного обладнання у промислових умовах [205]. А температурні репери серійно не випускаються, технологія їх виготовлення з документованими метрологічними параметрами не розроблена. Непрямим свідченням цього є значна кількість публікацій на конференціях ТЕМПМЕКО 2013 і 2016 (57 і 49 відповідно) та вказівка на проблему розроблення реперів температури у дорожніх картах ЄВРАМЕТ [55, 56].

Таким чином, на сьогодні не існує методу корекції похибки ТП, який одночасно забезпечує високу точність вимірювання (невиключену похибку на рівні  $1 \dots 1,5^{\circ}\text{C}$ ), єдність вимірювання (прослідковуваність процесу передачі розміру еталону до ТП та відтворюваність визначення її похибки), метрологічну надійність (високу імовірність того, що використаний метод корекції похибки ТП забезпечить невиключену похибку на рівні  $1 \dots 1,5^{\circ}\text{C}$ ), оперативність (визначення похибки під час експлуатації ТП, без необхідності демонтажу) та ефективність (низькі, економічно виправдані затрати на реалізацію). Кожен із відомих методів забезпечує лише деякі із цих властивостей. Найближчим до виконання перелічених вимог є ТЕР з КППП. Його недоліком щодо перелічених вимог є незадовільний за ефективністю метод періодичного визначення похибки головної ТП. Калібрування у лабораторних умовах, хоча значно простіша, ніж виконання операцій методу [131], все одно не задовольняє вимогу оперативності. А калібрування на місці експлуатації за допомогою еталонної ТП, аналогічно до [50], вимагає значного додаткового ускладнення конструкції.

Тому, для забезпечення високої точності та єдності вимірювання підвищених температур, а також метрологічної надійності, оперативності та ефективності, найбільш перспективне вдосконалення метрологічного забезпечення як ТЕР з КППП, так і вимірювального каналу температури у цілому. Зокрема, слід створити оперативний метод визначення похибки головної ТП, який забезпечив би достатньо малу її невиключену похибку.

Також слід подбати про те, щоби при експлуатації ТП її похибка не змінювалася надто швидко. Сам процес деградації електродів ТП доволі повільний. Але похибка від набутої термоелектричної неоднорідності може мінятися швидше, відповідно до змін профілю температурного поля об'єкта. З цієї точки зору ТЕП з КППП також має перевагу.

В ідеальному випадку оперативний метод визначення похибки ТП дав би змогу не лише забезпечити точність і єдність вимірювання підвищених температур, їх метрологічну надійність і ефективність, але і продовжити строк служби ТП. Але строк служби ТП безконтрольно продовжувати не можна. Деградація електродів ТП при тривалій експлуатації при підвищених температурах, зокрема ТП типу ХА, веде [60] до руйнування їх електродів, тобто раптової відмови. Тому слід теж створити метод діагностування стану електродів ТП. Цей метод повинен бути оперативним, інакше він не може бути поєднаним із оперативним методом визначення похибки ТП.

Рис. 1.8 показує перспективність шляху вдосконалення метрологічного забезпечення. Воно має забезпечити два напрямки – якості вимірювань і ефективності вимірювань. При цьому метод визначення похибки ТП достатньої точності, згідно рис. 1.8, щодо якості вимірювань, дасть можливість підвищити їх точність, метрологічну надійність та автономність. Якщо цей метод буде оперативним (визначати похибку ТП можна буде під час експлуатації ТП, без зупинки технологічного процесу), а також не буде вимагати значного обсягу додаткового обладнання, то буде забезпечена також економічна ефективність вдосконалення метрологічного забезпечення.

Як було показано у § 1.3, найбільший економічний ефект від такого вдосконалення метрологічного обслуговування може принести підвищення економічної ефективності самого технологічного процесу, зокрема, економія ресурсів. Дуже часто таке вдосконалення метрологічного обслуговування може привести до покращення стану екології. Таке покращення може бути прямим (внаслідок економії ресурсів зменшуються шкідливі впливи на середовище). Однак ще більший ефект може бути непрямим, за рахунок

оптимізації технологічного процесу щодо шкідливих впливів на середовище. При термічному обробленні металів і сплавів можливе суттєве підвищення якості продукції та терміну роботи обладнання, наприклад, за рахунок оптимізації співвідношення твердість – крихкість швидкоріжучих сталей. Можливий також ефект за рахунок самого метрологічного обслуговування – зменшення його трудомісткості та втрат часу на його проведення.



Рис. 1.8. Перспективність вдосконалення метрологічного забезпечення

Таким чином, мету даного дисертаційного дослідження можна сформулювати як створення методів і засобів, які забезпечують одночасне підвищення єдності, точності, метрологічної надійності та ефективності вимірювання підвищених температур засобами термоелектричної термометрії за рахунок нових оперативних методів визначення похибки терморпарі та діагностування стану її електродів у процесі експлуатації.

Аналіз методів підвищення точності вимірювання температури, розроблених останнім часом, показав, що більшість із них стосувалася



вдосконалення метрологічного забезпечення [80, 130, 170, 197, 205, 206]. Для досягнення визначеної у даній дисертації мети як основний шлях також доцільно використати вдосконалення метрологічного забезпечення. Однак очевидно, що відомі методи метрологічного забезпечення ТП і ТЕП на сьогодні вимагають вдосконалення. Тому вдосконалення метрологічного забезпечення ТП і ТЕП у даній дисертаційній роботі повинно спиратися на додаткові теоретичні дослідження похибок ТП та їх властивостей. Відповідно до викладеного, основні напрямки наукових досліджень можна сформулювати як:

1. Розвиток теорії впливу деградаційних процесів у електродах ТП на їх функцію перетворення;
2. Вдосконалення метрологічного забезпечення ТП і ТЕП під час експлуатації, спрямоване на створення нових оперативних методів визначення похибки ТП та діагностування стану їх електродів у процесі експлуатації;
3. Створення системи, яка, за рахунок нових оперативних методів визначення похибки ТП та діагностування стану їх електродів, одночасно забезпечує кращу єдність, точність, метрологічну надійність вимірювання температури, а також їх ефективність.

Відповідно до цих напрямків наукових досліджень, для досягнення мети дисертаційної роботи необхідно вирішити наступні задачі:

1. Розробити концепцію забезпечення точності вимірювання температури ТЕП;
2. Дослідити поведінку неоднорідної ТП у різних профілях температурного поля;
3. Створити математичну модель похибки ТП, яка деградувала у процесі експлуатації;
4. Створити метод оперативного визначення похибки ТП;
5. Визначити критерій якості електродів ТП та їх стану;
6. Створити метод оперативного діагностування стану електродів ТП;

7. Створити систему, що реалізує розроблені методи підвищення єдності, точності, метрологічної надійності та автономності, а також ефективності вимірювання;
8. Створити апаратне та методологічне забезпечення такої системи;
9. Провести імітаційні дослідження створених методів;
10. Провести експериментальні дослідження створених методів.

Таким чином, у даному параграфі проведено аналіз перспективності відомих методів підвищення єдності, точності, метрологічної надійності та автономності, а також ефективності вимірювання підвищених температур, показано необхідність створення нових оперативних методів визначення похибки ТП та діагностування стану її електродів і вибрано базу для цього, а також сформульовано мету, основні напрямки та задачі наукових досліджень.

## 1.5 Висновки до першого розділу

1. На основі аналізу характеристик ТЕП та їх чутливого елемента – ТП, показано, що ці найбільш вживані сенсори підвищених температур мають досить велику похибку вимірювання (вона виразно домінує у каналі вимірювання температури), викликану деградацією електродів ТП. Коли методи корекції похибки, що виникає у наслідок одного з проявів цієї деградації, дрейфу ФП ТП, доволі добре розвинуті, то методи корекції похибки, що виникає у наслідок іншого з проявів цієї деградації, від набутої у процесі експлуатації термоелектричної неоднорідності електродів ТП, необхідно додатково дослідити.
2. Досліджено процес виникнення похибки ТП від набутої термоелектричної неоднорідності її електродів та проведено аналіз її впливу на відомі методи підвищення точності вимірювання температури. Показано, що, незважаючи на цей вплив, можливе створення умов, при яких цей вплив себе не може проявити, або можлива корекція похибки вимірювання температури, викликаної цим впливом.
3. Оцінено потенційну ефективність підвищення точності вимірювання підвищених температур (економічний ефект від цього) на прикладі теплової електростанції. Показано, що можливе підвищення виробництва електроенергії без зростання витрат палива явно перевищує можливі затрати на модернізацію вимірювально-керуючих систем, які регулюють температуру у печах електростанції.
4. Проведено аналіз перспективності різних відомих методів підвищення єдності, точності, метрологічної надійності та автономності, а також ефективності вимірювання, показано необхідність створення нових оперативних методів визначення похибки ТП та діагностування стану її електродів і сформульовано мету, основні напрямки та задачі наукових досліджень.

## **Розділ 2. ОПЕРАТИВНИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ПОХИБКИ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА**

### **2.1 Концепція забезпечення точності вимірювання температури термоелектричними перетворювачами**

Аналіз задач, які постають перед розробником вимірювальних приладів і систем, показав, що на сьогодні переважно більшість із них можна розділити на три види (рис. 2.1). Ці три види характеризуються показниками єдності, точності, метрологічної надійності та автономності, а також ефективності. Вони принципово відрізняються за основною задачею, яку необхідно вирішити при створенні відповідного ВК. Розглянемо ці три види задач детальніше.

Перший вид задач стосується одноразових вимірювань (так званих *ad-hoc* вимірювань), коли слід виміряти фізичну величину, яку раніше не вимірювали у даній лабораторії або на підприємстві, тому відсутні відповідні засоби. При цьому слід забезпечити необхідний рівень результативності при максимумі ефективності вимірювань. Остання вимога (див. рис. 2.1), вимагає мінімуму затрат як ресурсів, так і часу на створення ВК. Такі задачі часто виникають при проведенні наукових досліджень невеликої складності (наприклад, визначення чутливості деяких пристроїв чи явищ від впливаючих величин). Тут єдність вимірювань є обов'язковою, а вимоги до інших параметрів, крім ефективності – невисокі (порівняно із параметрами, досягнутими кращими у галузі виробниками). Ці задачі вирішують, зазвичай, шляхом використання наявного універсального апаратного обладнання у незвичній області та режимах роботи. Для його мінімізації використовують нетрадиційні схемотехнічні та системотехнічні рішення. А для отримання необхідного результату проводять опрацювання результатів вимірювання, використовуючи доволі складне стандартизоване програмне забезпечення, наприклад, програмний комплекс LabView [207, 208]. Найчастіше таке рішення надлишкове, але воно дає можливість достатньо швидко отримати результат без закупівлі або розроблення спеціалізованого обладнання.



Рис. 2.1. Типові види задач, які постають перед розробником вимірювальних приладів і систем, а також аналіз вимог до них

Другий вид задач характерний для наукових досліджень великої складності та важливості, де вимога високої точності вимірювань є однією із ключових. Ресурси, потрібні для вирішення основної задачі, зазвичай, значно більші, ніж необхідні для створення ВК з високою або навіть надлишковою результативністю (зокрема, точністю). Тут ефективність вимірювань не грає вирішальної ролі, а обмеження по часу не жорсткі. Високі вимоги тоді ставлять до метрологічної надійності, тому розробляють спеціалізовані схеми метрологічного обслуговування. А до метрологічної автономності вимоги невисокі, метрологічне обслуговування проводять згідно розроблених схем. Для досягнення високих метрологічних параметрів або розробляють нові схемотехнічні та системні рішення, або адаптують кращі відомі рішення. При цьому на затрати на обладнання та спеціально розроблене програмне

забезпечення звертають відносно мало уваги.

Третій вид задач стосується промислових вимірювань і зустрічається на практиці найчастіше. Але інвестиції у розвиток метрологічного забезпечення промислових вимірювань мають підвищити конкурентоспроможність продукції (ріст рентабельності виробництва та продуктивності праці) [197 – 201, 209]. Тому для цієї задачі першочергове значення мають як результативність (зокрема, точність) так і ефективність вимірювань. Оптимізація технологічних процесів зазвичай обмежена собівартістю продукції. Хоча для задач третього виду обмеження за часом, зазвичай, не жорсткі, саме вони найскладніші. Вони вимагають вирішення цілого ряду різнопланових питань в умовах високих вимог за всіма параметрами, тобто до таких приладів і систем ставляться суперечливі вимоги, які значно їх ускладнюють. Зокрема, вимога високої точності суперечить високій метрологічній надійності, а обидві ці вимоги, у свою чергу, суперечать ефективності. У більшості випадків при вирішенні задач третього виду слід максимізувати показники ефективності технологічного процесу, а не вимірювальної системи.

На даний час, як було показано у першому розділі, легко доступні відносно недорогі засоби для побудови точних інформаційно-вимірювальних систем температури. Але, як показано у § 1.3, на сьогодні ці засоби з високою точністю вимірюють термо-е.р.с., а не температуру. Затрати на покращення системи та її компонентів у промисловості покриваються економічними та екологічними ефектами від покращення технологічного процесу. Але це справедливо лише тоді, коли вдосконалюють параметр, що максимально позитивно впливає на технологічний процес. Зокрема, навіть незначне підвищення точності вимірювання температури перегрітої пари, як показано у § 1.3, дасть змогу підвищити ККД теплової електростанції, що дає пропорційну економію палива. Але заміна вимірювальної системи, похибка вимірювання термо-е.р.с. якої, наприклад, еквівалентна 3°C, системою з еквівалентною похибкою 1°C, при похибці від дрейфу ФП ТП, яка сягає,

наприклад, 13°C, практично не дає змоги підвищити ККД теплової електростанції. Тому слід послідовно розглянути увесь ВК температури з точки зору забезпечення перелічених на рис. 2.1 параметрів.

Відповідно до рис. 1.1, для промислових вимірювань можна записати кортеж елементів, чий вплив визначає похибку вимірювання температури, як

$$\Delta E_T = \langle \Delta E_S, \Delta E_W, \Delta E_{RJ}, \Delta E_{MC}, \Delta E_{CN}, \Delta E_{NN} \rangle, \quad (2.1)$$

де  $\Delta E_T, \Delta E_S, \Delta E_W, \Delta E_{RJ}, \Delta E_{MC}, \Delta E_{CN}, \Delta E_{NN}$  – похибки вимірювання температури, сенсора (тобто ТП), лінії зв'язку (подовжувальні дроти), схеми компенсації або корекції температури вільних кінців ТП, каналу вимірювання термо-е.р.с., від впливу завад загального та нормального виду відповідно.

При цьому технічні рішення, розроблені у [162, 163], дають змогу усунути  $\Delta E_W$ , а розроблених у [52, 149, 178, 180 - 182, 210 - 213] – зменшити  $\Delta E_{RJ}, \Delta E_{CN}, \Delta E_{NN}$  та  $\Delta E_{MC}$  до значень 0,1 - 0,2°C, чим, порівняно із  $E_S$ , можна нехтувати. У такому випадку можна записати

$$\Delta E_T \rightarrow \langle \Delta E_S \rangle, \quad (2.2)$$

тобто похибка сенсора домінує у ВК.

Аналіз рис. 1.1 показує, що кортеж елементів, які суттєво впливають на метрологічну надійність системи вимірювання температури (імовірність того, що похибка вимірювання температури знаходиться у заданих межах [197, 198, 205]) можна записати як

$$R_T^M = \langle R_S^M, R_W^M, R_{RJ}^M, R_{MC}^M, R_{CN}^M, R_{NN}^M \rangle, \quad (2.3)$$

де  $R_T^M$  – метрологічна надійність системи вимірювання температури;  $R_S^M, R_W^M, R_{RJ}^M, R_{MC}^M, R_{CN}^M, R_{NN}^M$  – вплив на метрологічну надійність системи сенсора (тобто ТП), лінії зв'язку (подовжувальних дротів), схеми компенсації або корекції температури вільних кінців, каналу вимірювання термо-е.р.с. і завад загального та нормального виду відповідно.

Якщо  $E_W \rightarrow 0$ , то впливом  $R_W^M$  на  $R_T^M$  можна нехтувати. Аналогічно, як

у (2.2), можна нехтувати впливом  $R_{RJ}^M$ ,  $R_{CN}^M$  та  $R_{NN}^M$  на  $R_T^M$ . Через низьку чутливість ТП, нехтувати впливом  $R_{MC}^M$  на  $R_T^M$  не можна, тому

$$R_T^M \rightarrow \langle R_S^M, R_{MC}^M \rangle. \quad (2.4)$$

Але заходи, розроблені у [52, 148, 149, 180, 181], тобто корекція адитивної, мультиплікативної та нелінійної складових похибки каналу вимірювання термо-е.р.с., дають змогу, при малих затратах ресурсів, підвищити  $R_{MC}^M$  та оперативно зменшити вплив її на  $R_T^M$ .

Аналіз рис. 1.1 показує, що кортеж елементів, що суттєво впливають на метрологічну автономність [197 – 201, 205] системи (здатність тривалий час підтримувати похибку вимірювання температури не більшою допустимою без використання еталонів) можна записати як

$$A_T^M = \langle A_S^M, A_W^M, A_{RJ}^M, A_{MC}^M \rangle, \quad (2.5)$$

де  $A_T^M$  – метрологічна автономність системи вимірювання температури;  $A_S^M$ ,  $A_W^M$ ,  $A_{RJ}^M$ ,  $A_{MC}^M$  – вплив на метрологічну автономність системи сенсора, лінії зв'язку, схеми компенсації або корекції температури вільних кінців і каналу вимірювання термо-е.р.с.

Аналогічно, як і при виводі (2.2) та (2.4) можна вважати, що  $A_W^M \rightarrow \infty$ , а впливом  $A_{RJ}^M$ , через те, що її елементи експлуатуються при нормальній температурі, також можна нехтувати. Тому можна записати

$$A_T^M \rightarrow \langle A_S^M, A_{MC}^M \rangle. \quad (2.6)$$

Але аналогічно, як і при виводі (2.2) та (2.4), корекція адитивної, мультиплікативної та нелінійної складових похибки каналу вимірювання термо-е.р.с. [52, 148, 149, 180, 181], дає змогу різко підвищити  $A_{MC}^M$  та оперативно зменшити вплив її на  $A_T^M$  при невеликих затратах ресурсів.

Аналіз рис. 1.1 показує, що кортеж елементів, що суттєво впливають на ефективність [197] системи вимірювання температури (затрати ресурсів та часу на підтримання похибки не більшою допустимою) можна записати як



$$EF_T = \langle EF_S, EF_W, EF_{RJ}, EF_{MC} \rangle, \quad (2.7)$$

де  $EF_T$  – ефективність системи вимірювання температури;  $EF_S, EF_W, EF_{RJ}, EF_{MC}$  – вплив на ефективність системи вимірювання температури сенсора, лінії зв'язку, схеми компенсації або корекції температури вільних кінців і каналу вимірювання термо-е.р.с. відповідно.

Аналогічно, як і при виводі (2.2), (2.4) та (2.6),  $EF_W \rightarrow \infty$ , а впливом  $EF_{RJ}$  на  $EF_T$  також можна нехтувати (елементи схеми компенсації або корекції температури вільних кінців налаштовуються лише при випуску системи вимірювання температури з виробництва). Тому можна записати

$$EF_T \rightarrow \langle EF_S, EF_{MC} \rangle. \quad (2.8)$$

Але аналогічно, як і при виводі (2.2), (2.4) та (2.6), методи корекції адитивної, мультиплікативної та нелінійної складових похибки каналу вимірювання термо-е.р.с. [52, 148, 149, 180, 181], дають змогу звести його метрологічне обслуговування до періодичної заміни джерела напруги калібрування. Ці методи дають змогу різко підвищити  $EF_{MC}$  та оперативно зменшити вплив її на  $EF_T$  при відносно невеликих затратах ресурсів.

Узагальнений показник якості системи вимірювання температури  $Q_T^{MS}$ , на основі (2.2), (2.4), (2.6) та (2.8) можна виразити як поєднання показників

$$Q_T^{MS} = \langle \Delta E_S, R_S^M, R_{MC}^M, A_S^M, A_{MC}^M, EF_S, EF_{MC} \rangle. \quad (2.9)$$

Але у першому розділі було показано, що, при використанні сучасних мікроконверторів, наприклад, ADUC834 [151], куди входить АЦП, і корекції його похибок [178], показники  $\Delta E_S, R_S^M, A_S^M, EF_S$  сенсора настільки гірші за показники  $\Delta E_{MC}, R_{MC}^M, A_{MC}^M, EF_{MC}$ , що (2.9) можна переписати як

$$Q_T^{MS} = \langle \Delta E_S, R_S^M, A_S^M, EF_S \rangle. \quad (2.10)$$

Кортеж (2.10) підтверджує, що на сьогодні показники якості систем вимірювання підвищених температур за допомогою ТП визначається саме ТП

(цей висновок стосується більшості сенсорних систем). Цей висновок підтверджується також тим, що всі провідні виробники високоточних систем вимірювання підвищених температур вказують у документації, що похибку вимірювання температури подано без врахування похибки сенсора.

Таким чином, покращення параметрів ТП, їх точності та стабільності, на сьогодні є важливою науково-технічною проблемою. Саме на це вказують дорожні карти європейської термометрії [55, 56]. Розглянемо детальніше показники, які визначають параметри ТП. Згідно параметрів якості процесу вимірювання, приведеним у першому розділі (§ 1.4), кортежі, що визначають параметри ТП, можна записати як

$$\Delta E_{TC} = \langle \Delta E_{TC}^{ID}, \Delta E_{TC}^{DR}, \Delta E_{TC}^{NEOD} \rangle, \quad (2.11)$$

$$R_{TC}^M = \langle R_{TC}^{ID}, R_{TC}^{DR}, R_{TC}^{NEOD} \rangle, \quad (2.12)$$

$$A_{TC} = \langle A_{TC}^{ID}, A_{TC}^{DR}, A_{TC}^{NEOD} \rangle, \quad (2.13)$$

$$EF_{TC} = \langle EF_{TC}^{ID}, EF_{TC}^{DR}, EF_{TC}^{NEOD} \rangle, \quad (2.14)$$

де  $\Delta E_{TC}$ ,  $\Delta E_{TC}^{ID}$ ,  $\Delta E_{TC}^{DR}$ ,  $\Delta E_{TC}^{NEOD}$  – похибка ТП у цілому, від початкового відхилення ФП ТП, від дрейфу її ФП та від набутої термоелектричної неоднорідності відповідно;  $R_{TC}^M$ ,  $R_{TC}^{ID}$ ,  $R_{TC}^{DR}$ ,  $R_{TC}^{INEOD}$  – метрологічна надійність визначення похибки від початкового відхилення ФП ТП, від дрейфу її ФП та від набутої термоелектричної неоднорідності відповідно;  $A_{TC}$ ,  $A_{TC}^{ID}$ ,  $A_{TC}^{DR}$ ,  $A_{TC}^{NEOD}$  – метрологічна автономність визначення похибки від початкового відхилення ФП ТП, від дрейфу її ФП та від набутої термоелектричної неоднорідності відповідно;  $EF_{TC}$ ,  $EF_{TC}^{ID}$ ,  $EF_{TC}^{DR}$ ,  $EF_{TC}^{NEOD}$  – комплексний показник ефективності визначення похибки від початкового відхилення ФП ТП, від дрейфу її ФП та від набутої термоелектричної неоднорідності відповідно [197].

Методи корекції похибки від початкового відхилення ФП ТП від номінальної [94, 95] реалізують до початку експлуатації ТП, у лабораторних

умовах (коли похибка від набутої термоелектричної неоднорідності ще не появилася та обмеження, розглянуті у [124], ще не діють), за допомогою еталонної ТП. Тому показники  $\Delta E_{TC}^{ID}$ ,  $R_{TC}^{ID}$ ,  $A_{TC}^{ID}$ ,  $EF_{TC}^{ID}$  не впливають на відповідні показники, що стосуються періоду експлуатації ТП на об'єкті.

Методи корекції похибки від дрейфу ФП ТП при високій температурі розглянуті у [51] та розвинуті у [97, 100] реалізують під час експлуатації ТП. Ці методи передбачають створення математичної моделі зміни ФП ТП під дією температури та часу експлуатації. Через різницю в умовах експлуатації ТП та їх індивідуальні особливості математичні моделі також повинні бути індивідуальними та періодично оновлюватися. Їх створюють за результатами періодичного визначення поточної похибки. Але визначення похибки ТП у лабораторії зумовлює, згідно із [124], низьку метрологічну надійність її значення. Крім того, потреба переривання експлуатації та транспортування ТП зумовлює низьку метрологічну автономність та ефективність методу. У [50] передбачено періодичне визначення поточної похибки ТП за допомогою еталонної ТП [205] або за допомогою репера температури [105]. Як уже було вказано, реалізація цих методів значно ускладнює конструкцію ТЕП (особливо ТЕП з КПТП). Також, недоліком методу [50] є необхідність використання еталонної ТП у робочих умовах, а методу [105] – на сьогодні реperi температури з нормованими метрологічними характеристиками не випускаються. Тому відомі методи корекції похибки від дрейфу ФП ТП, хоча і покращують показники точності  $\Delta E_{TC}^{ID}$  і метрологічної надійності  $R_{TC}^{ID}$ , мають низькі показники метрологічної автономності  $A_{TC}^{ID}$  та ефективності  $EF_{TC}^{ID}$ . Ці методи вимагають створення методу періодичного оперативного визначення поточної похибки ТП (безпосередньо у процесі експлуатації, без демонтажу ТЕП).

Метод корекції похибки від набутої термоелектричної неоднорідності [122] передбачає створення математичної моделі змін ФП ділянок електродів ТП під дією температури та часу експлуатації. Ці моделі також повинні бути

індивідуальними. Однак при визначенні похибки ТП визначають лише похибку ТП у цілому. Тому метод [122] передбачає визначення похибки ТП у різних профілях температурного поля та розподіл похибок всього ТП по ділянках електродів. Для створення різних профілів температурного поля, згідно із [122], потрібен спеціальний лабораторний стенд – метод [122] не може забезпечити визначення поточної похибки ТП на місці експлуатації.

Розроблений у [133] метод, при стабілізації профілю температурного поля вздовж електродів ТП, не дає похибці від набутої термоелектричної неоднорідності проявити себе. Така стабілізація не зменшує дрейфу ФП ТП. Але тоді можна успішно використати всі методи корекції похибки від дрейфу ФП ТП (див. § 1.2) і мати високу точність вимірювання температури (потрібне значення  $E_S$ ). Та щоби отримати високу метрологічну надійність  $R_S^M$  корекції похибки від дрейфу ФП ТП необхідно створити метод періодичного оперативного визначення поточної похибки ТП на місці експлуатації, який, на відміну від методів визначення поточної похибки ТП за допомогою еталонної ТП [50] або репера температури [105], не погіршував би метрологічну автономність  $A_S^M$  та ефективність  $EF_S$  корекції.

Слід відзначити, що створення методу оперативного визначення поточної похибки ТП є складною задачею. Електроди ТП експлуатуються при підвищених температурах і деградують [34]. Тому, для постійного виконання циклу Демінга-Шугарта [197] при оновленні математичних моделей дрейфу ФП ТП або її ділянок, створення методу саме оперативного періодичного визначення поточної похибки ТП є ключовою проблемою.

Щодо ефективності  $EF_S$  найкращим є метод оперативного визначення поточної похибки ТП на базі ефекту Пельтьє [130]. Як було вказано у § 1.4, вирішити питання про його перспективність можна лише після аналізу його похибок.

Похибки запропонованого у [128] та дослідженого у [129, 130] оперативного методу визначення поточної похибки ТП на базі ефекту Пельтьє

можна розділити на методичні та інструментальні. Інструментальні похибки виникають через те, що дійсна питома термо-е.р.с. ТП, за ефектом Пельтьє, визначається за результатами вимірювання спадів напруги на електродах ТП при пропусканні струму через них, щоби викликати ефект Пельтьє. Схема вимірювання різниці спадів напруги, згідно із якою проведено експериментальні дослідження у [130], була подана на рис. 1.7. ТП, питому термо-е.р.с. якої визначають, створена електродами Х та А. Струм через з'юкт пропускають за допомогою додаткових електродів Е1 та Е2. При пропусканні струму  $I = 0,2 \text{ A}$ , відповідно до [130], значення спаду напруги на електродах ТП  $E_+^{POT} = 123,259 \text{ mV}$  для одного напрямку струму та  $E_-^{POT} = 121,319 \text{ mV}$  для іншого напрямку струму. Таким чином, максимальне значення зміни термо-е.р.с., викликане дією ефекту Пельтьє, становить  $\Delta E = 970 \text{ }\mu\text{V}$ . Воно використовується для визначення дійсного значення питомої термо-е.р.с. ТП. При цьому, згідно із (1.1), можна записати  $T^M = f(E, e)$ , тобто виміряна температура  $T^M$  обчислюється за значеннями виміряної термо-е.р.с. ТП  $E$  та питомої термо-е.р.с. цієї ТП  $e$ .

Згідно неявно запропонованої у [130] методики, базою для визначення дійсного поточного значення питомої термо-е.р.с. ТП  $e^{POT}$  служить визначене перед експлуатацією значення зміни температури  $\Delta T^{PELT}$  під час проходження через з'юкт ТП заданого струму  $I^{POT}$  (оптимальне значення цього струму  $I = 0,2 \text{ A}$  визначено у [130]). При цьому дійсне значення початкової питомої термо-е.р.с. цієї ТП  $e^{POCH}$  може бути визначене під час цього ж експерименту, наприклад, за допомогою еталонної ТП, яка вимірює температуру  $T^{ET}$  при первинному визначенні  $\Delta T^{PELT}$ . Тоді, якщо не враховувати нелінійності ФП ТП (слід відзначити, що нелінійність ТП типу ХА мала, не більше 1%, тому при аналізі похибок нею можна нехтувати),

$e^{POCH}$  можна визначити як відношення вимірної термо-е.р.с.  $E^{POCH}$  до вимірної еталонною термопарою температури  $T^{ET}$ .

Як стверджується у [128 - 130], зміна температури  $\Delta T^{PELT}$  під час експлуатації ТП залишається постійною. У такому випадку вимірну поточну температуру  $T^M$  можна обчислити за формулою

$$T^M = \frac{E_{VYM}^{POT} (E_+^{POCH} - E_-^{POCH})}{E^{POCH} (E_+^{POT} - E_-^{POT})} T^{ET} . \quad (2.15)$$

де  $E_+^{POCH}$ ,  $E_-^{POCH}$ ,  $E_+^{POT}$ ,  $E_-^{POT}$  – результати вимірювання спадів напруги на електродах ТП при пропусканні струму через них, щоби викликати ефект Пельтьє.

Як видно із (2.15), у результат вимірювання входять чотири результати вимірювання спадів напруги на електродах ТП, які, згідно із [130], перевищують 120 мВ. Навіть якщо прийняти, що, як вказано у [122], похибка вимірювання не перевищує 20 мкВ, то сумарна похибка вимірювання різниць зміни термо-е.р.с.  $\Delta E = 970 \mu V$ , викликане дією ефекту Пельтьє, становить 40 мкВ. Щодо різниці  $\Delta E = 970 \mu V$  відповідна відносна похибка становить понад 4%, що при температурі 1000°C буде складати понад 40°C. Слід відзначити, що така оцінка похибки не включає похибок, викликаних вимірюванням  $E_{VYM}^{POT}$ ,  $E^{POCH}$ , а також похибки  $T^{ET}$ . Крім того, виникає також похибка від встановлення і вимірювання струму  $I^{POT}$  як при первинному визначенні  $\Delta T^{PELT}$ , так і при поточному визначенні похибки ТП.

Таким чином, аналіз інструментальних похибок показує, що метод визначення поточної похибки ТП на основі ефекту Пельтьє [128 - 130], вимагає дуже високої точності вимірювання термо-е.р.с. ТП для досягнення прийнятної точності корекції її похибок. Таким чином, цей метод не забезпечує прийнятні показники точності  $\Delta E_{TC}$  та метрологічної надійності

$R_S^M$ . При цьому, як виникає із [130], збільшення діаметру електродів ТП погіршує ситуацію.

Інші методи періодичного оперативного визначення поточної похибки ТП, які одночасно забезпечують прийнятні для модернізації систем вимірювання підвищених температур параметри  $\Delta E_S$ ,  $R_S^M$ ,  $A_S^M$ ,  $EF_S$ , невідомі.

Тому, для створення прийнятного методу оперативного визначення поточної похибки ТП, треба теоретично дослідити поведінку ТП, яка деградувала, під час вимірювання температури об'єкта.

Під час вимірювання температури об'єкта електроди ТП розміщені у профілі його температурного поля, як це спрощено показано на рис. 2.2. Згідно із [34, 141, 142], деградація електродів ТП (викликана деградацією зміна генерованої термо-е.р.с.) зростає із ростом температури експлуатації.

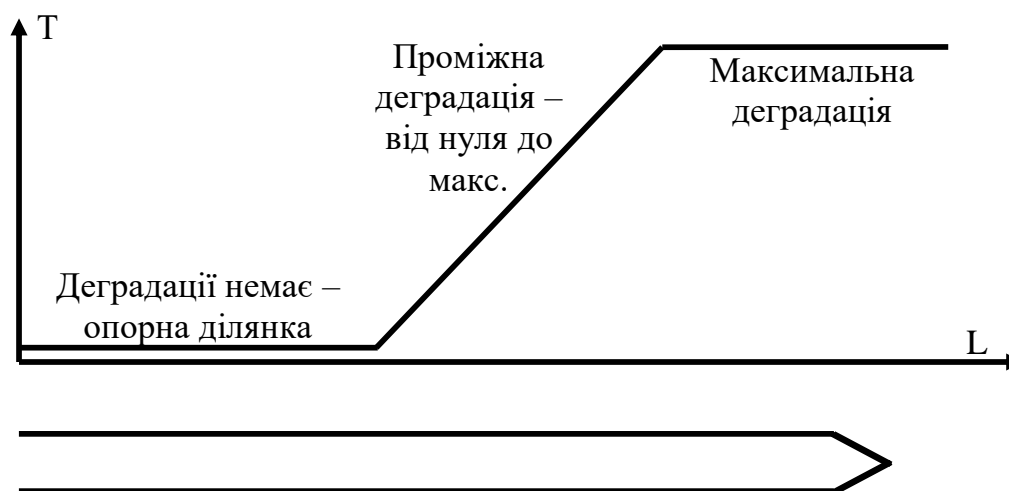


Рис. 2.2. Розміщення електродів ТП у профілі температурного поля об'єкта під час вимірювання його температури

Тому ділянки ТП, які прилягають до з'єднання та експлуатуються при максимальній температурі, максимально деградують. Подальші ділянки ТП, які знаходяться у зоні градієнту температурного поля, деградують менше – відповідно температурі при якій їх експлуатують. Тут діє проміжна деградація – від максимальної до близької до нуля. Ділянки електродів, що

експлуатуються при температурі вільних кінців, практично не деградують.

Таким чином, при експлуатації ТП є ділянки, що не деградують, тобто зберігають ФП протягом всього часу експлуатації. Вони можуть виконувати роль опорних при створенні методу оперативного визначення поточної похибки ТП. Для оцінки дрейфу ФП ділянок ТП, які експлуатуються при температурі вільних кінців, використаємо рівняння Арреніуса [214]

$$k = Ae^{-E_a/RT} , \quad (2.16)$$

де  $k$  – константа швидкості реакції при температурі  $T$ ;  $A$  – масштабуюча константа;  $R$  – універсальна газова стала;  $e$  – основа натуральних логарифмів;  $E_a$  – енергія активації.

Натуральний логарифм відношення швидкостей реакції  $k_2/k_1$  при температурах  $T_2$  і  $T_1$  (де  $T_1 = 273^\circ\text{C}$ ) можна виразити наступною формулою

$$\ln \frac{k_2}{k_1} = -\frac{E_a}{R} \left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) , \quad (2.17)$$

На базі (2.17) побудуємо графік залежності логарифму відношення швидкостей реакції від температури  $T_2$  експлуатації електродів ТП типу ХА. (рис. 2.3). Як видно з графіка рис. 2.3, швидкість хімічних реакцій, що приблизно відповідає швидкості деградації електродів ТП, зростає з температурою. При температурі вільних кінців  $T_1 = 0^\circ\text{C}$  та нижній межі діапазону підвищених температур  $T_2 = 600^\circ\text{C}$  відношення швидкостей хімічних реакцій буде

$$k(600^\circ\text{C})/k(0^\circ\text{C}) \approx 4 \cdot 10^{22} , \quad (2.18)$$

а при верхній межі діапазону підвищених температур  $T_2 = 1100^\circ\text{C}$  буде

$$k(1100^\circ\text{C})/k(0^\circ\text{C}) \approx 2 \cdot 10^{26} . \quad (2.19)$$



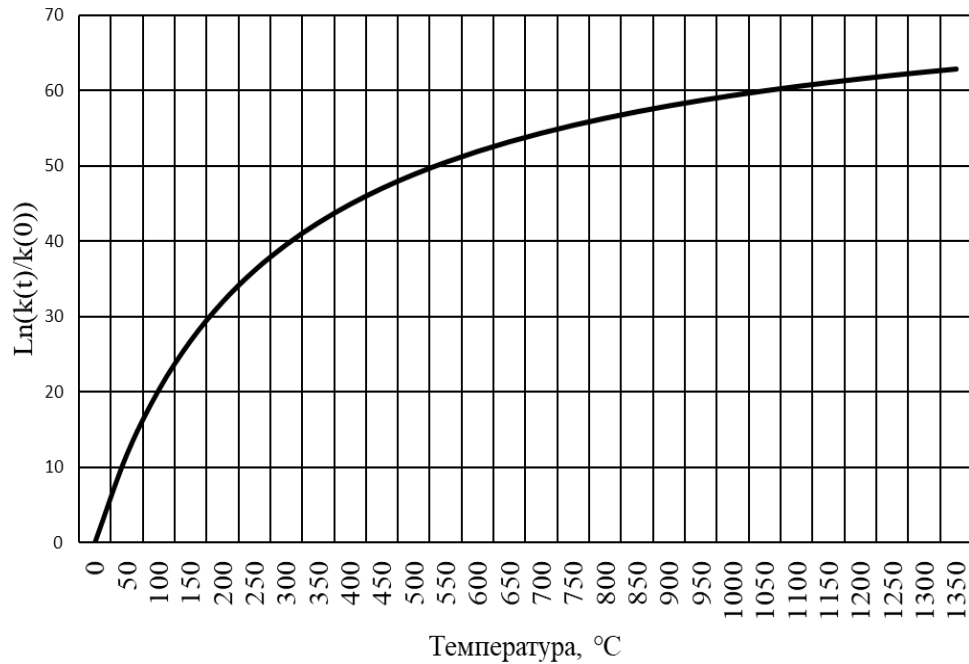


Рис. 2.3. Графік залежності логарифму відношення швидкостей реакції від температури експлуатації електродів ТП типу ХА

При температурі вільних кінців  $T_1 = 100^\circ\text{C}$  та нижній межі діапазону підвищених температур  $T_2 = 600^\circ\text{C}$  це відношення становитиме

$$k(600^\circ\text{C})/k(100^\circ\text{C}) \approx 6 \cdot 10^{13}, \quad (2.20)$$

а при верхній межі діапазону підвищених температур  $T_2 = 1100^\circ\text{C}$  буде

$$k(1100^\circ\text{C})/k(100^\circ\text{C}) \approx 3 \cdot 10^{17}. \quad (2.21)$$

Із (2.18) – (2.21) можна оцінити швидкість деградації опорної ділянки – за час дрейфу ФП ТП  $\Delta T_{600} = 60^\circ\text{C}$  при температурі експлуатації  $T_2 = 600^\circ\text{C}$ , опорна ділянка, температура експлуатації якої  $T_1 = 100^\circ\text{C}$ , продрейфує на

$$\Delta T_{100} = \frac{\Delta T_{600}}{k(600^\circ\text{C})/k(100^\circ\text{C})}. \quad (2.22)$$

Отримане із (2.22) значення дрейфу опорної ділянки мале, ним можна нехтувати. Це підтверджують експериментальні дослідження, подані у [215].

Наявність ділянок ТП, що працюють при температурі вільних кінців і не деградують, дає змогу розробити концептуальну модель вдосконалення

процесу вимірювання температури за допомогою ТП. Ця модель (рис. 2.4) відображає вплив на ВК системи вимірювання підвищених температур деструктивних факторів та методів протидії цим факторам. Зліва зверху на цій моделі представлені деструктивні фактори, які, згідно з (2.10), впливають на ТП. Зліва знизу подані методи протидії цим деструктивним факторам. Тут суміжним деструктивним факторам – деградації електродів ТП і невідповідності моделей похибки ТП при опрацюванні результатів вимірювання протистоять методи визначення похибки ТП при експлуатації та корекції моделей за результатами такого визначення похибки.

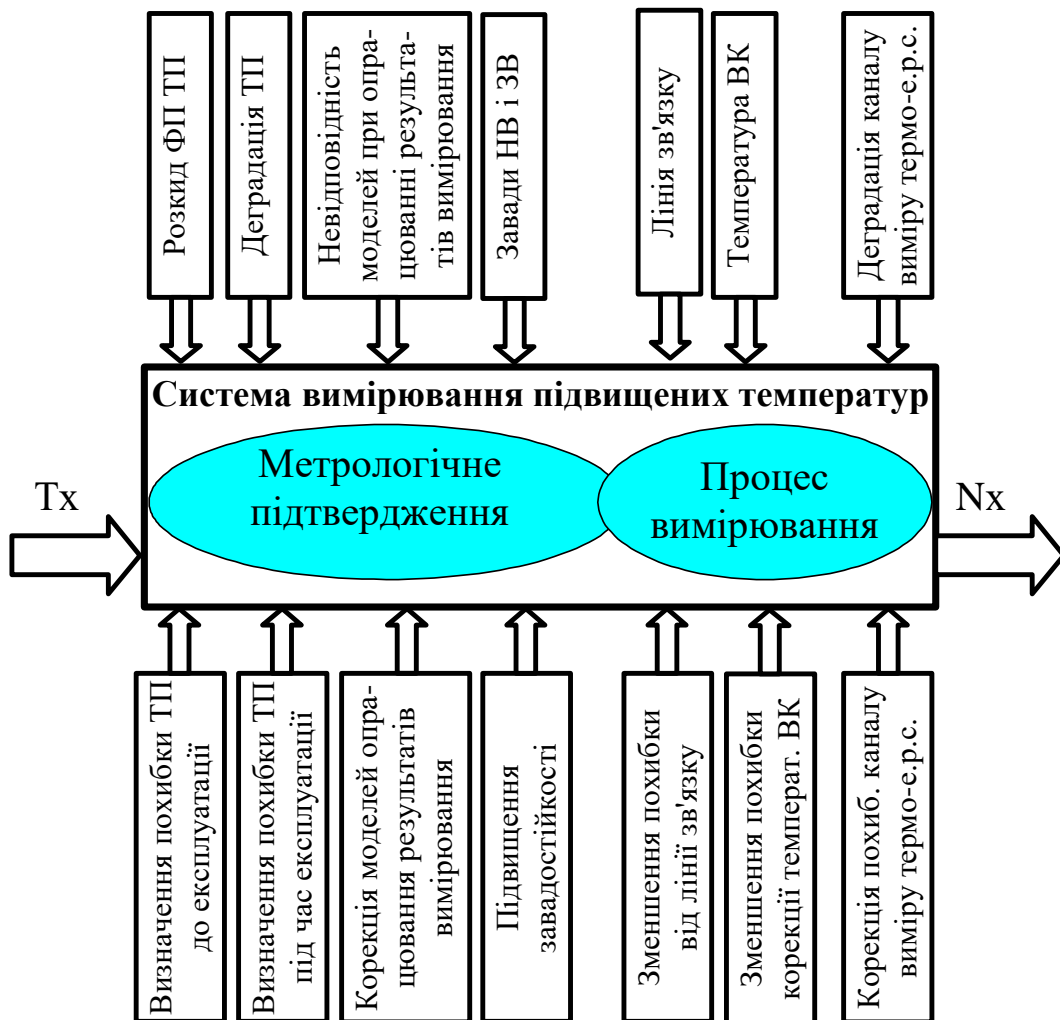


Рис. 2.4. Концептуальна модель вдосконалення процесу вимірювання температури за допомогою ТП

Окремо визначено такі деструктивні фактори, як розкид ФП ТП при випуску і вплив завод нормального та загального виду. Першому з них

протистоїть визначення похибки ТП перед експлуатацією [94]. Вплив завад нормального виду можна зменшити за рахунок інтегруючих методів аналого-цифрового перетворення (зокрема, сигма-дельта перетворення) [149] та дискретного усереднення [216]. Вплив завад загального виду можна зменшити за рахунок гальванічної розв'язки [138, 139, 210 - 213].

Друга група факторів негативного впливу на якість  $Q_T^{MS}$  системи вимірювання температури пов'язана із лінією зв'язку та впливом температури вільних кінців. Розроблений у [143] метод корекції похибки подовжувальних провідників вносить у похибку вимірювання температури свою невиключену похибку та знижує ефективність системи вимірювання температури. Вищу точність та ефективність дає усунення подовжувальних провідників шляхом розміщення термометра опору безпосередньо біля закінчення електродів ТП [158], використанні потенціометричної схеми вимірювання опору [162, 163] та обчислювальної корекції похибки від впливу температури вільних кінців.

Третя група факторів негативного впливу на якість  $Q_T^{MS}$  системи вимірювання температури пов'язана із системою вимірювання термо-е.р.с. Через низьку чутливість ВК повинен мати адитивну похибку менше 1 - 5 мкВ (залежно від типу ТП). Її визначають часовий і температурний дрейфи нуля вхідного підсилювача. Також суттєвим є вплив мультиплікативної похибки ВК. Але методи корекції цих похибок [148] дають змогу забезпечити еквівалентну похибку вимірювання термо-е.р.с. не більше  $0,3^{\circ}\text{C}$ , що цілком прийнятно. Через малу похибку нелінійності сучасних сигма-дельта АЦП (для ADUC834 [151] не більше 0,0015%) використання методів корекції нелінійності [178, 180] не обов'язкове. Але вони дають змогу звести періодичне визначення похибки ВК до заміни джерела напруги калібрування, що суттєво підвищує метрологічну надійність  $R_{MC}^M$  та автономність  $A_{MC}^M$  системи при високій ефективності  $EF_{MC}$ .

Таким чином, виявлена можливість створення методу оперативного визначення поточної похибки ТП за рахунок того, що ділянка ТП, наближена

до вільних кінців, не деградує і тим самим зберігає початкову ФП ТП. Це дає змогу суттєво підвищити точність вимірювання підвищених температур за допомогою ТП при одночасному зростанні метрологічної надійності та автономності. Такий шлях, незважаючи на додаткові затрати для реалізації методу, як це показано у § 1.3, дає змогу суттєвого підвищення ефективності технологічного процесу, яка значно перекидає затрати на реалізацію методу.

У даному параграфі проведено аналіз видів вимірювальних задач, показано що найскладніші задачі виникають у промисловості. Проведений аналіз похибок ВК температури дав змогу розробити концепцію одночасного підвищення показників його точності, метрологічної надійності та автономності, а також ефективності вимірювання температури ТП. Показано, що таке підвищення можливе при умові створення методу періодичного оперативного визначення поточної похибки ТП. Аналіз умов експлуатації ТП дав змогу виділити її ділянку, яка не деградує під час експлуатації, що дало змогу намітити шлях створення потрібного методу.

## 2.2 Дослідження поведінки неоднорідних термопар при зміні профілю температурного поля

Згідно із висновком § 2.1, проведемо теоретичні дослідження прояву похибки від набутої термоелектричної неоднорідності електродів ТП і впливу зміни профілю температурного поля на генеровану ТП термо-е.р.с. За законом Зеебека [1 – 7] номінальна термо-е.р.с. кожної ділянки ТП  $E_i^N$  рівна

$$E_i^N = e_N (T_{i+1} - T_i), \quad (2.23)$$

де  $e_N$  – номінальна питома термо-е.р.с. (термоелектрична здатність) електрода ТП;  $T_{i+1}$ ,  $T_i$  – температури на кінцях ділянки електрода.

Індивідуальна термо-е.р.с ділянок ТП, згідно з [122, 133], рівна

$$E_i = (e_N + \Delta e_i) \cdot (T_{i+1} - T_i), \quad (2.24)$$

де  $\Delta e_i$  – похибка питомої термо-е.р.с.  $i$ -тої ділянки електрода.

Якщо спрямувати різницю  $T_{i+1} - T_i$  до нуля, то, згідно із (2.23) і (2.24) сумарну термо-е.р.с.  $E_\Sigma$  одного електрода [122, 133] можна подати як

$$E_\Sigma = \int_0^{T_{RK}} (e_N + \Delta e_i) dt = \int_0^{T_{RK}} e_N dt + \int_0^{T_{RK}} \Delta e_i dt = E_{\Sigma N} + \int_0^{T_{RK}} \Delta e_i dt = E_{\Sigma N} + \Delta E_\Sigma, \quad (2.25)$$

де  $E_{\Sigma N}$ ,  $\Delta E_\Sigma$  – номінальне значення генерованої електродом ТП термо-е.р.с. та її індивідуальне відхилення від номінальної.

Відхилення питомої термо-е.р.с. від номінальної  $\Delta e_i$  можна подати як суму початкового  $\Delta e_i^{POCH}$  та набутого при експлуатації  $\Delta e_i^{NAB}$  відхилень, тобто  $\Delta e_i = \Delta e_i^{POCH} + \Delta e_i^{NAB}$ . Методи корекції початкового відхилення  $\Delta e_i^{POCH}$ , розглянуті у [94, 95], зводяться до визначення похибки ТП перед експлуатацією. Ні дрейф ФП ТП, ані набута термоелектрична неоднорідність на похибку  $\Delta e_i^{POCH}$  не впливають – вони ще не встигли з'явитися.

Методи корекції набутого при експлуатації відхилення  $\Delta e_i^{NAB}$  були проаналізовані у [51, 97 – 101, 104] та у §§ 1.2, 1.4. Як було показано у [188], відхилення  $\Delta e_i^{NAB}$  визначається ступенем деградації електродів ТП. При сталій вимірюваній температурі відхилення  $\Delta e_i^{NAB}$  може проявляти себе як:

1. дрейф ФП ТП  $\Delta E_i^{DR}$ , тобто як зміна ФП ТП в часі при сталому профілі температурного поля вздовж її електродів;
2. похибка  $\Delta E_i^{NEOD}$  від набутої в процесі тривалої експлуатації термоелектричної неоднорідності електродів ТП, тобто як зміна генерованої ТП термо-е.р.с. від зміни профілю температурного поля вздовж її електродів при сталій температурі з'льоту та вільних кінців.

У [188] було показано, що дрейф ФП ТП і набута термоелектрична неоднорідність – наслідки деградації електродів при тривалій дії підвищених температур. При цьому дрейф  $i$ -тої ділянки ФП ТП  $\Delta E_i^{DR}$  є функцією двох змінних – температури  $T_{Ei}$  та часу  $\tau_{Ei}$  експлуатації, тобто  $\Delta E_i^{DR} = f(T_{Ei}, \tau_{Ei})$  [34, 141, 142], а поточні короткочасні зміни профілю температурного поля на

значення дрейфу ФП ТП не впливають. А похибка від набутої термоелектричної неоднорідності електродів  $\Delta E_i^{NEOD}$  проявляє себе лише при зміні профілю температурного поля, тому вона є функцією трьох змінних [104, 122, 185, 188]

$$\Delta E_i^{NEOD} = f(T_{Ei}, \tau_{Ei}, T_{Di}), \quad (2.26)$$

де  $T_{Di}$  – поточна температура, тобто температура, у яку потрапила  $i$ -та ділянка електрода ТП у результаті зміни профілю температурного поля.

Але якщо ТП експлуатується у постійному профілі температурного поля, то зручно прийняти, що температури експлуатації та поточна рівні, тобто  $T_{Di} = T_{Ei}$ . Тоді набута термоелектрична неоднорідність електродів ТП себе не проявляє, тобто  $\Delta e_i^{NEOD} = 0$ . Тоді (2.26) слід переписати як

$$\Delta E_i^{NEOD} = f(T_{Ei}, \tau_{Ei}, \Delta T_{Di}), \quad (2.27)$$

де  $\Delta T_{Di} = T_{Ei} - T_{Di}$  – зміна температури  $i$ -тої ділянки електрода ТП у результаті зміни профілю температурного поля.

У [188] було показано, що і  $\Delta E_i^{DR}$ , і  $\Delta E_i^{NEOD}$  є наслідками деградації електродів ТП. Тому, для аналізу (2.27) перейдемо до змін питомої термо-е.р.с.  $\Delta e_i$  шляхом розкладу у ряд Тейлора. Для випадку відносно малих і незалежних змін функція  $\Delta e_i$  буде мати вид

$$\Delta e_i = \frac{\partial e}{\partial T_{Ei}} \Delta T_{Ei} + \frac{\partial e}{\partial \tau_{Ei}} \Delta \tau_{Ei} + \frac{\partial e}{\partial T_{Di}} \Delta T_{Di}, \quad (2.28)$$

де  $\frac{\partial e}{\partial \dots}$  – часткові похідні функції  $\Delta e_i$  по її аргументах (чутливість функції  $\Delta e_i$  до змін окремих аргументів).

Аналіз (2.28) дає можливість сформулювати умови, яким повинна відповідати функція, що описує  $\Delta e_i$ . Ці умови мають наступний вид

$$\left\{ \begin{array}{l} 1) \text{ if } \partial e / \partial \dots = 0 \text{ then } \Delta e_i^{NAB} \rightarrow 0 \\ 2) \text{ if } T_{Ei} = 0 \text{ then } \Delta e_i^{NAB} \rightarrow 0 \\ 3) \text{ if } \tau_{Ei} = 0 \text{ then } \Delta e_i^{NAB} \rightarrow 0 \\ 4) \text{ if } \tau_{Ei} \neq 0 \text{ and } T_{Ei} \neq 0 \text{ then } \Delta e_i^{NAB} \neq 0 \\ 5) \text{ if } T_{Ei} = 0 \text{ then } \Delta T_{Di} = 0 \\ 6) \text{ if } \Delta T_{Di} = 0 \text{ then } \Delta e^{NEOD} \rightarrow 0 \end{array} \right. , \quad (2.29)$$

Кожна із умов (2.29) у якійсь мірі тривіальна, але лише зібрані разом вони дають можливість визначити форму залежності похибки ТП від протікання деградаційних процесів.

Перша умова означає, що при відсутності деградації набута похибка ТП рівна нулю, тобто тоді немає ні похибки від дрейфу ФП ТП, ні похибки від набутої термоелектричної неоднорідності (ідеальні електроди ТП). Але, якщо ця умова не виконується, похибки від дрейфу ФП ТП та від набутої термоелектричної неоднорідності виникнуть обов'язково. Причому виникнення цих похибок задано самою неідеальністю електродів ТП, незважаючи на швидкість протікання деградаційних процесів.

Друга умова означає, що при низьких температурах (відповідно до рівняння Ареніуса, див. § 2.1, та [215]) швидкість процесів деградації настільки мала, що нею можна нехтувати. Аналогічною є третя умова – всі деградаційні процеси є тривалими, зміни похибок від дрейфу ФП ТП та від набутої термоелектричної неоднорідності мають достатньо плавний характер. Четверта умова по суті означає, що деградаційні процеси у електродах ТП обов'язково проявлять себе у процесі тривалої експлуатації при високій температурі. П'ята умова відтворює нормальні умови експлуатації ТП – електроди ТП завжди знаходяться при температурах між температурою вільних кінців та вимірюваною температурою.

Шоста умова означає, що похибка від набутої термоелектричної неоднорідності не проявляє себе, якщо профіль температурного поля експлуатації ТП незмінний, тобто підтверджує шлях, обраний у [133], для

зменшення впливу цієї похибки на результат вимірювання. Однак, шоста умова також означає, що похибка від набутої термоелектричної неоднорідності, відповідно до (2.29), проявляє себе навіть при сталих температурі  $T_{Ei}$  та часі  $\tau_{Ei}$  експлуатації. Тоді у функції (2.28) буде лише один аргумент – зміна поточної температури  $\Delta T_{Di}$ . При цьому можлива швидкість зміни поточної температури  $\Delta T_{Di}$ , тобто швидкість зміни похибки від набутої термоелектричної неоднорідності  $\Delta E_i^{NEOD}$ , визначається не часом  $\tau_{Ei}$  експлуатації, а швидкістю протікання теплових перехідних процесів. Очевидно, що саме цю особливість мають на увазі дослідники [121, 123], коли зазначають, що похибка від набутої термоелектричної неоднорідності є особливо небезпечною.

Розроблення нових сплавів для ТП має на меті створення ситуації, що відповідає п. 1. Але не доведено, що досягнення такої ситуації для всіх випадків використання ТП взагалі можливе. Корекція та компенсація похибок ТП повинна базуватися на пп. 2 – 6, тобто адаптувати умови експлуатації ТП до цих властивостей процесу деградації.

Аналіз (2.28) і (2.29) дає змогу визначити форму графіка, що показує залежність набутої похибки ТП  $\Delta E_i^{NAB}$  від основних впливаючих величин – температури  $T_{Ei}$  та часу  $\tau_{Ei}$  її експлуатації, а також від зміни температури  $i$ -тої ділянки електрода ТП  $\Delta T_{Di}$  у результаті зміни профілю температурного поля. Для того, щоби зобразити функцію похибки  $\Delta E_i^{NAB}$  необхідно побудувати чотирьохвимірний графік. Слід відзначити, що тим самим набута похибка ТП  $\Delta e_i^{NAB}$  також повинна бути зображена як чотирьохвимірний графік. Для заданого часу експлуатації ТП такий тривимірний узагальнений графік подано на рис. 2.5. На ньому по осі абсцис відкладемо температуру експлуатації ділянки  $T_{Ei}$ , по осі ординат – зміну поточної температури  $\Delta T_{Di}$ , а по осі аплікату – значення похибки  $\Delta E_i^{NAB}$ .



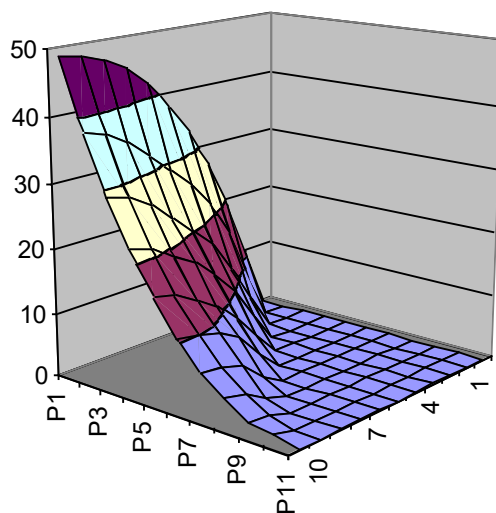


Рис. 2.5. Графік залежності похибки ділянки ТП від температури експлуатації та зміни поточної температури для фіксованого часу експлуатації

Аналогічний графік залежності похибки  $\Delta E_i^{NAB}$  ділянки ТП або ТП в цілому від температури експлуатації  $T_{Ei}$  та зміни поточної температури  $\Delta T_{Di}$  для багатьох часів  $\tau_{Ei}$  подано на рис. 2.6 [217, 218].

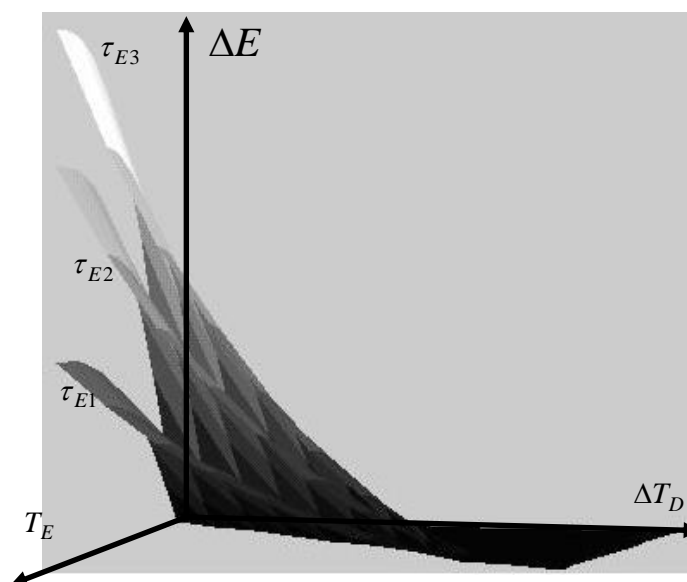


Рис. 2.6. Графік залежності значення похибки ділянки ТП від температури експлуатації, зміни поточної температури та фіксованих часів експлуатації

Кожному часу експлуатації  $\tau_{Ei}$  відповідає інша поверхня. Тому, що швидкість деградації приблизно пропорційна температурі, більшому часу експлуатації  $\tau_{Ei}$  відповідає поверхня, розміщена вище. Відповідно до пп. 2, 3 поданих вище властивостей деградації (2.29), всі поверхні проходять нульову точку графіка, поданого на рис. 2.6. Поверхні, що відповідають кожному часу експлуатації  $\tau_{Ei}$ , перетинають площину  $T_{Ei} - 0 - \Delta_i^{NAB}$  відповідно до результатів дослідження похибки від дрейфу ФП ТП  $\Delta E_i^{DR}$ .

Траєкторію дрейфу ФП ТП у сталому профілі температурного поля, при якому проводилася корекція похибки дрейфу ФП ТП у [217, 218], можна відобразити на графіку рис. 2.6 як вертикальну пряму, що відповідає сталим координатам температур експлуатації  $T_{Ei}$  і поточної  $T_{Di}$ , причому  $T_{Ei} = T_{Di}$ , а  $\Delta T_{Di} = 0$ . Ця пряма починається на осі абсцис у точці, що відповідає температурі експлуатації  $T_{Ei}$  цієї ділянки. Тоді для ТП в цілому, значення температур експлуатації  $T_E$  та поточної  $T_D$  стають параметрами кривої, що є функцією однієї змінної – часу експлуатації  $\tau_E$ . Якщо спроектувати вертикальну пряму дрейфу ФП ТП на площину, то отримаємо одновимірну функцію дрейфу (див. рис. 2.7).

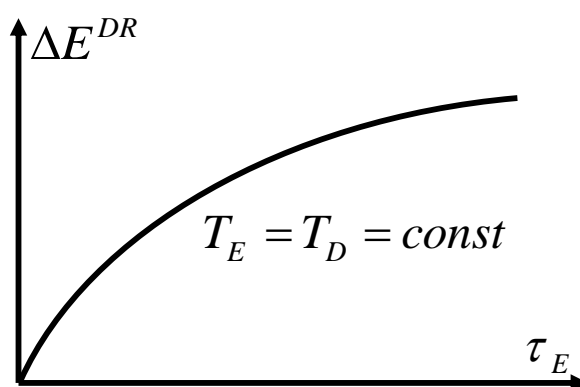


Рис. 2.7. Узагальнений графік залежності значення похибки дрейфу ФП ТП від часу експлуатації

Траєкторію зміни координат похибки ділянки ТП від зміни профілю

температурного поля вздовж електродів (при виникненні похибки від набутої термоелектричної неоднорідності) можна відобразити як рух по поверхні, що відповідає часу експлуатації ТП  $\tau_{Ei}$  при фіксованій температурі експлуатації  $T_{Ei}$ . Для відображення цієї траєкторії доцільно представити поверхню (див. рис. 2.5) зверху, вздовж осі аплікату. Тоді похибка  $\Delta E_i$  (вісь аплікату), не буде фігурувати на графіку (див. рис. 2.8). Якщо відобразити цю траєкторію як рух по поверхні графіка рис. 2.8 для фіксованих температури  $T_{Ei}$  та часу  $\tau_{Ei}$  експлуатації, то це буде пряма, яка іде від температури об'єкта експлуатації ділянки до температури вільних кінців. Через те, що, згідно із § 2.1, дрейфом ФП ТП при температурі вільних кінців можна нехтувати, таку зміну поточної температури можна вважати максимальною, при більших змінах температури  $\Delta T_{Di}$  похибка ТП не міняється. Тому можна вважати, що  $\Delta T_{Di}^{MAX} = T_{Ei}$ , тобто максимальна зміна температури ділянки рівна температурі її експлуатації.

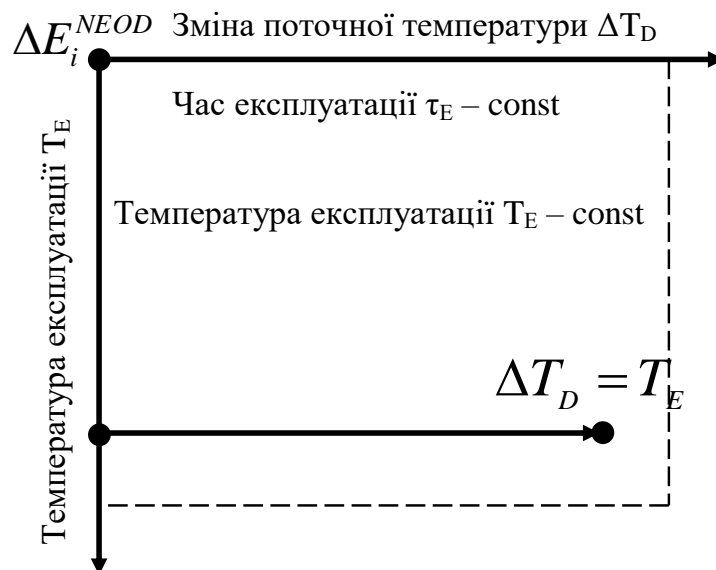


Рис. 2.8. Траєкторія зміни координат похибки ділянки ТП від зміни профілю температурного поля вздовж електродів, тобто під час виникнення похибки від набутої термоелектричної неоднорідності ділянки ТП

Таким чином, при сталому профілі температурного поля тобто  $\Delta T_{Di} \rightarrow 0$ ,

відповідно до п. 6 системи (2.29), похибка від набутої неоднорідності себе не проявляє ( $\Delta E^{NEOD} \rightarrow 0$ ). А поточна набута похибка ділянки  $\Delta E_i^{NAB}$  знаходиться у площині  $T_{Ei} - 0 - \Delta_i^{NAB}$  і проявляє себе як похибка дрейфу ФП, тобто  $\Delta E_i^{NAB} \equiv \Delta E_i^{DR}$ .

При наростанні зміни профілю температурного поля, тобто коли  $\Delta T_{Di} \neq 0$ , проявляє себе похибка від набутої термоелектричної неоднорідності  $\Delta E_i^{NEOD}$ . Але коли різниця температур між кінцями ділянки електрода прямує до нуля, тобто  $\Delta t \rightarrow 0$ , то і генерована термо-е.р.с.  $E$ , відповідно до (2.23), (2.24) прямує до нуля. Одночасно до нуля прямує і набута похибка, тобто  $\Delta E_i^{NAB} \rightarrow 0$  (вона себе не проявляє). Такий випадок відповідає п. 2 поданих вище властивостей деградації. Це означає, що наростання значення похибки від набутої термоелектричної неоднорідності  $\Delta E_i^{NEOD}$  іде по поверхні, що відповідає поточному часу експлуатації  $\tau_{Ei}$ . Тобто наростання значення похибки від набутої термоелектричної неоднорідності  $\Delta E_i^{NEOD}$  іде за рахунок зменшення поточного значення похибки від дрейфу ФП ділянки  $\Delta E_i^{DR}$ . У граничному випадку, якщо для всієї ТП виконати умову  $\Delta T_{Di} = T_{Ei}$ , то температура робочого кінця ТП стає рівною температурі вільних кінців. Тоді генерована ТП термо-е.р.с. прямує до нуля. Одночасно похибка  $\Delta E_{TC}^{DR} \rightarrow 0$ , при нульовій термо-е.р.с. ТП всі її похибки себе не можуть проявити. Це і відображено на рис. 2.6 – для кожної поверхні, що відповідає деякому часу експлуатації  $\tau_{Ei}$ , при  $\Delta T_{Di} \geq T_{Ei}$ , вплив набутої похибки на термо-е.р.с. ТП прямує до нуля, тобто  $\Delta E_i^{NAB} \rightarrow 0$  (якщо ділянка ТП не генерує термо-е.р.с., то її похибка не може себе проявити). Таким чином, поданий на рис. 2.6 графік набутої похибки ділянки ТП  $\Delta E_i^{NAB}$  адекватно відображає властивості цієї похибки та її змін при зміні впливаючих на неї величин – температури  $T_{Ei}$  та часу  $\tau_{Ei}$  експлуатації, а також зміни поточної температури ділянки електрода  $\Delta T_{Di}$ .

Але якщо для деякої ділянки прийняти  $\Delta T_{Di} = T_{Ei}$ , то прямує до нуля термо-е.р.с. цієї ділянки, хоча термо-е.р.с. ТП у цілому може не прямувати до нуля. У цьому випадку похибка від дрейфу цієї ділянки себе не може проявити, тобто  $\Delta E_i^{DR} \rightarrow 0$ . Тоді зміна термо-е.р.с. ТП у цілому проявить себе як похибка від набутої термоелектричної неоднорідності  $\Delta E_i^{NEOD}$ . Якщо для ділянки  $\Delta T_{Di} = T_{Ei}$ , то похибка від набутої термоелектричної неоднорідності буде мати максимальне значення, тобто, згідно із [218], отримаємо  $\Delta E_i^{NEOD} \rightarrow \max$ .

Таким чином, як це і було показано у [218], максимальні значення похибок від дрейфу ФП  $\Delta E_i^{DR}$  та від набутої термоелектричної неоднорідності  $\Delta E_i^{NEOD}$  для ТП, яка тривалий час вимірювала високу температуру, рівні. Така рівність максимальних значень похибок, для кожної комбінації температури  $T_{Ei}$  та часу  $\tau_{Ei}$  експлуатації відповідає граничним значеннями змін поточної температури ділянки, тобто  $\Delta T_{Di} = 0$  та  $\Delta T_{Di} = T_{Ei}$ . Її можна записати як

$$|\Delta E_{MAX}^{DR}(T_{Ei}, \tau_{Ei}, \Delta T_{Di} = 0)| = |\Delta E_{MAX}^{NEOD}(T_{Ei}, \tau_{Ei}, \Delta T_{Di} = T_{Ei})|. \quad (2.30)$$

Рівність (2.30) на рис. 2.6 відповідає тому, що перехід від стану  $\Delta T_{Di} = 0$  до стану  $\Delta T_{Di} = T_{Ei}$  відбувається у межах однієї поверхні, яка відповідає часу  $\tau_{Ei}$  експлуатації ТП. Перехід відбувається по кривій, яка відповідає перетину цієї поверхні  $\tau_{Ei}$  площиною  $\Delta E^{NAB} - T_{Ei} - T_{Di}$  (тобто площиною, що проходить через точку  $T_{Ei}$  і є паралельною до площини  $\Delta E^{NAB} - 0 - T_{Di}$ ). Такий перехід починається у точці  $\Delta E_{MAX}^{DR}(T_{Ei}, \tau_{Ei}, \Delta T_{Di} = 0)$ , яка належить площині  $\Delta E^{NAB} - 0 - T_{Ei}$  і закінчується у точці  $\Delta E_i^{DR}(T_{Ei}, \tau_{Ei}, \Delta T_{Di} = T_{Ei})$ , яка належить площині  $T_{Di} - 0 - T_{Ei}$ . Відповідно до рис. 2.6, у точці  $\Delta E_i^{DR}(T_{Ei}, \tau_{Ei}, \Delta T_{Di} = T_{Ei})$  термо-е.р.с. ділянки ТП прямує до нуля, тому похибка дрейфу теж прямує до нуля (для цієї ділянки виконується умова  $\Delta t \rightarrow 0$ , тому, відповідно до (2.24),  $E_i \rightarrow 0$ , а значить і вплив  $\Delta E_i^{NAB}$  на термо-е.р.с. ТП прямує до нуля). Але при цьому зміна поточної температури  $T_{Di}$  даної ділянки змінює термо-е.р.с. ТП у

цілому. Така зміна термо-е.р.с. ТП, викликана зміною профілю температурного поля вздовж її електродів, суперечить першому закону термоелектрики і називається похибкою від набутої термоелектричної неоднорідності [87, 122, 133, 134]. При цьому термо-е.р.с. цієї ділянки ТП у цілому буде замінена термо-е.р.с. іншої ділянки, для якої температура експлуатації інша. Тобто іншою є і набута похибка  $\Delta E_i^{NAB}$ . Якщо ця інша ділянка постійно експлуатується при температурі близькій до температури вільних кінців, то, відповідно до п. 6 властивостей набутої у процесі експлуатації похибки,  $\Delta E^{NAB} \rightarrow 0$ . Це означає, що похибка від набутої неоднорідності виникає внаслідок зникнення впливу на термо-е.р.с. ТП похибки від дрейфу її ФП. Тому за значенням максимальна похибка від термоелектричної неоднорідності рівна похибці від дрейфу. Цей аналіз підтверджує висновки зроблені у [188] – рівність (2.30) підтверджує взаємну залежність між похибками від дрейфу ФП та від набутої неоднорідності. Ці похибки мають спільну причину – деградацію електродів ТП. Тому між їх проявами існує однозначна залежність. Але у [188] не було визначено як змінюються похибки від дрейфу ФП та від набутої неоднорідності при проміжних змінах поточної температури ділянки, тобто коли  $0 < \Delta T_{Di} < T_{Ei}$ .

Нехай ми маємо ТП, що має деяку початкову ФП, отриману при виготовленні. Ця ФП формується початковим значенням питомої термо-е.р.с.  $e^{POCH}$ . Для вимірюваної температури  $T$  значення генерованої електродом термо-е.р.с. (якщо прийняти, що температура вільних кінців рівна нулю та не враховувати нелінійність ФП ТП) буде становити  $E = e^{POCH} \cdot T$ . На рис. 2.9 показано цю ТП, яка при сталій експлуатації розмішена у профілі температурного поля ABCD (для спрощення рисунка профілі температурного поля зображено лінійними). Через те, що інтенсивність деградаційних процесів приблизно пропорційна температурі сталої експлуатації [29, 34, 50], максимальний дрейф ТП  $\Delta e_{MAX}^{DR}$  буде відповідати ділянці АВ, тобто

$$\Delta E_{AB}^{DR} = \Delta E_{MAX}^{DR} . \quad (2.31).$$

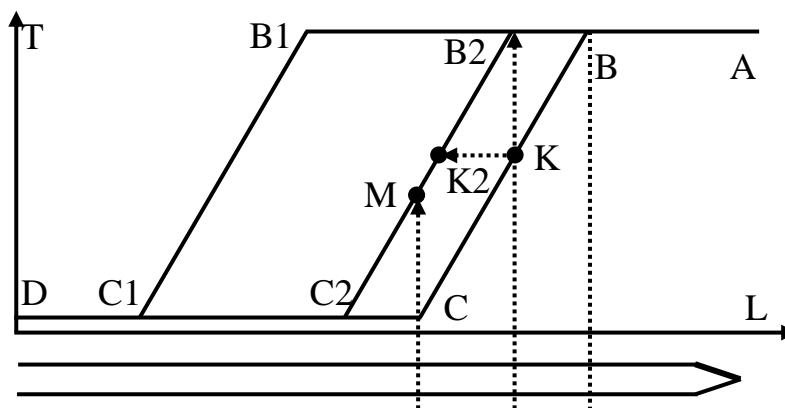


Рис. 2.9. Зміни профілю температурного поля при експлуатації ТП

А ділянка CD і всі її складові під час експлуатації перебувають при температурі близькій до нуля (точніше, при температурі вільних кінців). Тому, відповідно до [215], § 2.1 та п. 2 сформульованих вище властивостей набутої похибки ТП, ділянка CD і всі її складові взагалі не будуть дрейфувати. Їх можна вважати однорідними (вони мають малу початкову термоелектричну неоднорідність, якою порівняно із набутою неоднорідністю можна нехтувати). Для CD і всіх її складових виконується перший закон термоелектрики [1, 6]. Тому можна записати

$$\Delta E_{CD}^{DR} = 0; \Delta E_{CC2}^{DR} = 0; \Delta E_{C2C1}^{DR} = 0; \Delta E_{C1D}^{DR} = 0 . \quad (2.32)$$

Відповідно до рис. 2.6 максимальна зміна профілю температурного поля щодо набутої похибки ТП становить  $\Delta T_{Di} = T_{Ei}$ . При подальшій зміні профілю температурного поля (його пересуванні вліво відносно, наприклад, профілю AB1C1D, див. рис. 2.9) генерована ТП термо-е.р.с., відповідно до першого закону термоелектрики, не буде змінюватися. Вліво від профілю температурного поля AB1C1D, відповідно до (2.32), електроди ТП будуть однорідними. Тобто при зміні профілю температурного поля вліво від профілю AB1C1D у зону градієнту потрапляють ділянки ТП, що експлуатуються при температурі вільних кінців і не деградують.

У результаті можна відзначити, що відповідно до (2.31) максимально змінює свою термо-е.р.с. (дрейфує) ділянка АВ. Але, згідно із (2.24), цей дрейф не впливає на генеровану ТП термо-е.р.с., бо  $T_A = T_B$ . Ділянка CD не деградує,

вона зберігає початкову питому термо-е.р.с.  $e^{POCH}$ . Це означає, що на результат вимірювання впливає лише дрейф ділянки ВС. Тому можна записати, що похибка ТП визначається як [218]

$$\Delta E_{TC}^{DR} = \Delta E_{BC}^{DR} = \Delta E_{TC}^{MAX}, \quad (2.33)$$

де  $\Delta E_{TC}^{DR}$  – похибка ТП від дрейфу її ФП;  $\Delta E_{BC}^{DR}$  – похибка від дрейфу ділянки ВС;  $\Delta E_{TC}^{MAX}$  – максимальний прояв похибки від дрейфу ТП в умовах експлуатації (профіль температурного поля ABCD).

При розміщенні ТП у профілі температурного поля АВ1С1D маємо

$$\begin{cases} \Delta E_{AB}^{DR} = 0 (\Delta e_{AB}^{DR} \rightarrow \max; \Delta t \rightarrow 0) \\ \Delta E_{BB1}^{DR} = 0 (\Delta e_{BB1}^{DR} \rightarrow inst; \Delta t \rightarrow 0) \\ \Delta E_{B1C1}^{DR} = 0 (\Delta e_{B1C1}^{DR} \rightarrow 0; \Delta t \rightarrow T_E) \\ \Delta E_{C1D}^{DR} = 0 (\Delta e_{C1D}^{DR} \rightarrow 0; \Delta t \rightarrow 0) \end{cases}. \quad (2.34)$$

Відповідно до рис. 2.9 і (2.34) генерує термо-е.р.с. лише ділянка В1С1, тому, для даного випадку  $\Delta E_{TC}^{DR} = 0$ . Ця особливість поведінки неоднорідної ТП при зміні профілю температурного поля дає змогу визначити її поточну похибку у процесі експлуатації. Такий метод був запропонований у [219]. Відповідно до [219], похибку дрейфу ФП ТП можна визначити як різницю між генерованою ТП термо-е.р.с. у двох профілях температурного поля – ABCD та АВ1С1D. Відхилення дійсної термо-е.р.с. ТП у профілі АВ1С1D від номінальної (похибку ТП до експлуатації) можна визначити шляхом калібрування ТП у цьому профілі температурного поля у лабораторних умовах. Реалізувати потрібну цілеспрямовану зміну профілю температурного поля (від ABCD при експлуатації до АВ1С1D при визначенні поточної похибки) можна за допомогою ТЕП з керованим профілем температурного поля (ТЕП з КПТП) [134].

Для визначення характеру зміни похибки від дрейфу ФП та від набутої неоднорідності в умовах  $0 < \Delta T_{Di} < T_{Ei}$  виберемо на ділянці ВС ТП (див. рис. 2.9) деяку точку К. Тоді генеровану ТП поточну термо-е.р.с.  $E_{TC}^{POT}$  у профілі



температурного поля АВКСД, згідно третього закону термоелектрики [1, 6], можна визначити як

$$E_{ABKCD}^{POT} = E_{AB}^{POT} + E_{BK}^{POT} + E_{KC}^{POT} + E_{CD}^{POT} . \quad (2.35)$$

Але, перейшовши до похибок, відповідно до (2.23) і (2.34), слід переписати (2.35) як

$$\Delta E_{ABKCD}^{POT} = \Delta E_{AB}^{MAX} + \Delta E_{BK}^{INT1} + \Delta E_{KC}^{INT2} + \Delta E_{CD}^{POCH} = \Delta E_{BK}^{DR} + \Delta E_{KC}^{DR} = \Delta E_{BC}^{DR} = \Delta E_{MAX}^{DR} . \quad (2.36)$$

Допустимо, що у результаті цілеспрямованої зміни профіль температурного поля перемістився від профілю ABCD експлуатації до АВ2К2МС2С1D. Тоді точка К переміститься у положення К2, а точка С – у положення М. Поточне значення термо-е.р.с.  $E_{ABB2K2MC2C1D}^{POT}$ , генероване ТП відповідно до профілю температурного поля АВ2К2МС2С1D, можна визначити як

$$E_{AB2K2MC2C1D}^{POT} = E_{AB}^{POT} + E_{BB2}^{POT} + E_{B2K2}^{POT} + E_{K2M}^{POT} + E_{MC2}^{POT} + E_{C2C1}^{POT} + E_{C1D}^{POT} . \quad (2.37)$$

При цьому виникне похибка від набутої у процесі тривалої експлуатації ТП при підвищеній температурі термоелектричної неоднорідності. За визначенням [87, 133] ця похибка рівна зміні генерованої термо-е.р.с. ТП, яка викликана зміною профілю температурного поля. Цю зміну можна знайти, віднявши (2.35) від (2.37)

$$\Delta E_{AB2K2CKC2C1D}^{NEOD} = \left( E_{AB}^{POT} + E_{BB2}^{POT} + E_{B2K2}^{POT} + E_{K2CK}^{POT} + E_{CKC2}^{POT} + E_{C2C1}^{POT} + E_{C1D}^{POT} \right) - \left( E_{AB}^{POT} + E_{BK}^{POT} + E_{KC}^{POT} + E_{CD}^{POT} \right) . \quad (2.38)$$

При цьому різні ділянки ТП, через те, що вони знаходяться у різних умовах щодо температури на їх кінцях, генерують різні термо-е.р.с. Відповідно до рис. 2.9 можна записати

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{AB}^{POT} = e_{AB} \cdot (T_A - T_B) = 0 \\ E_{BK}^{POT} = e_{BK} \cdot (T_B - T_K) \neq 0 \\ E_{KC}^{POT} = e_{KC} \cdot (T_K - T_C) \neq 0 \\ E_{CD}^{POT} = e_{CD} \cdot (T_C - T_D) = 0 \end{array} \right. \quad \text{та} \quad \left\{ \begin{array}{l} E_{AB}^{POT} = e_{AB} \cdot (T_A - T_B) = 0 \\ E_{BB2}^{POT} = e_{BB2} \cdot (T_B - T_{B2}) = 0 \\ E_{B2K2}^{POT} = e_{B2K2} \cdot (T_{B2} - T_{K2}) \neq 0 \\ E_{K2M}^{POT} = e_{K2M} \cdot (T_{K2} - T_M) \neq 0 \\ E_{MC2}^{POT} = e_{MC2} \cdot (T_M - T_{C2}) \neq 0 \\ E_{C2C1}^{POT} = e_{C2C1} \cdot (T_{C2} - T_{C1}) = 0 \\ E_{C1D}^{POT} = e_{C1D} \cdot (T_{C1} - T_D) = 0 \end{array} \right. . \quad (2.39)$$

Підставивши (2.39) у (2.38), отримаємо

$$\Delta E_{AB2K2CKC2C1D}^{NEOD} = (E_{B2K2}^{POT} + E_{K2M}^{POT} + E_{MC2}^{POT}) - (E_{BK}^{POT} + E_{KC}^{POT}) . \quad (2.40)$$

Однак, відповідно до третього закону термоелектрики та (2.33),

$$\Delta E_{BK}^{POT} + \Delta E_{KC}^{POT} = \Delta E_{BK}^{DR} + \Delta E_{KC}^{DR} = \Delta E_{TC}^{MAX} . \quad (2.41)$$

Через те, що питома термо-е.р.с. миттєво не змінюється (деградація електродів ТП – тривалий процес), з врахуванням (2.41), можна записати

$$\Delta E_{B2K2}^{DR} + \Delta E_{K2M}^{DR} = \Delta E_{B2M}^{DR} = \Delta E_{KC}^{DR} . \quad (2.42)$$

Крім того, ділянка СС2 експлуатується при температурі вільних кінців, вона не деградує. Поточна зміна її питомої термо-е.р.с. відносно початкової рівна нулю. Тому можна записати  $\Delta E_{MC2}^{POT} = 0$ . Таким чином, при переході до похибок, (2.40), з врахуванням (2.33), (2.41) і (2.42) можна переписати як

$$\Delta E_{AB2K2CKC2C1D}^{NEOD} = \Delta E_{CK}^{POT} - \Delta E_{TC}^{MAX} = \Delta E_{CK}^{POT} - (\Delta E_{BK}^{POT} + \Delta E_{KC}^{POT}) = -\Delta E_{BK}^{POT} = -\Delta E_{BK}^{DR} , \quad (2.43)$$

тобто похибка від термоелектричної неоднорідності при переміщенні профілю температурного поля із профілю АВКСД у профіль АВ2К2СКС2С1Д буде, з оберненим знаком, рівна похибці від дрейфу ФП тої ділянки ТП, яка вийшла з градієнту профілю температурного поля (потрапила у профіль, градієнт якого рівний нулю).

Але, відповідно до (2.42), похибка від дрейфу ФП ТП у профілі температурного поля АВ2К2МС2С1Д (на момент переходу профілю із АВКСД у профіль АВ2К2МС2С1Д) буде рівна поточній похибці ділянки КС. Ця поточна похибка виникла до зміни профілю температурного поля, тому вона є похибкою від дрейфу ФП ділянки КС. Знайдемо суму абсолютних значень похибок  $\Delta E_{AB2K2MC2C1D}^{DK}$  та  $\Delta E_{AB2K2MC2C1D}^{NEOD}$

$$\left| \Delta E_{AB2K2CKC2C1D}^{DK} + \Delta E_{AB2K2CKC2C1D}^{NEOD} \right| = \left| \Delta E_{KC}^{DR} \right| + \left| -\Delta E_{BK}^{DR} \right| = \Delta E_{KC}^{DR} + \Delta E_{BK}^{DR} = \Delta E_{BC}^{DR} . \quad (2.44)$$

У (2.30) було показано, що  $\Delta E_{MAX}^{DR} = \Delta E_{MAX}^{NEOD}$ . Через те, що температура експлуатації для розглянутого випадку постійна, можна записати, що  $\Delta E_{MAX}^{DR} = \Delta E_{MAX}^{NEOD}$ . Крім того, у (2.33) було показано, що  $\Delta E_{BC}^{DR} = \Delta E_{MAX}^{DR}$ . Підставивши ці залежності у (2.44), отримаємо, що

$$\left| \Delta E_{AB2K2CKC2C1D}^{DK} + \Delta E_{AB2K2CKC2C1D}^{NEOD} \right| = \left| \Delta E_{MAX}^{DR} \right| = \left| \Delta E_{MAX}^{NEOD} \right| . \quad (2.45)$$

Через те, що точка К була вибрана випадковим чином, (2.45) можна узагальнити

$$|\Delta E_{MAX}^{NEOD}| = |\Delta E_{MAX}^{DR}| = |\Delta E_{PROF-E}^{NEOD}| + |\Delta E_{PROF-E}^{DR}|, \quad (2.46)$$

де індекс PROF-E означає, що ці похибки від дрейфу ФП ТП та від набутої термоелектричної неоднорідності відповідають одному і тому ж профілю температурного поля експлуатації.

Таким чином, при зміні профілю температурного поля у межах  $0 < \Delta T_{Di} < T_{Ei}$  поточна сума абсолютних значень поточних похибок від дрейфу ФП ТП та від набутої термоелектричної неоднорідності завжди рівна максимальним значенням цих похибок, а знаки поточних похибок протилежні. У процесі зміни профілю температурного поля від  $\Delta T_{Di} = 0$  до  $\Delta T_{Di} = T_{Ei}$  похибка від набутої неоднорідності «заміщає» похибку від дрейфу ФП ТП.

Процес «заміщення» похибкою від набутої неоднорідності похибки від дрейфу ФП ТП ілюструє рис. 2.10. На ньому показано криву, отриману від перетину поверхні  $\tau_{Ei}$  площиною  $\Delta E^{NAB} - T_{Ei} - \Delta T_{Di}$ , що проходить через точку  $T_{Ei}$  і є паралельною до площини  $\Delta E^{NAB} - 0 - \Delta T_{Di}$  (див. рис. 2.6). Для кожної  $i$ -тої віртуальної ділянки ТП температуру її експлуатації вважаємо сталою. Тоді для кожного конкретного часу експлуатації (тобто поверхні  $\tau_{Ei}$ ) існує лише одна така крива. Назвемо її кривою поточного стану  $i$ -тої ділянки електрода ТП. Всі зміни профілю температурного поля відповідають переміщенню положення  $i$ -тої віртуальної ділянки електрода ТП відносно координат  $\Delta T_{Di} \leftrightarrow \Delta E^{NAB}$  у межах цієї кривої. Якщо  $\Delta T_{Di} \rightarrow 0$ , то набута похибка ТП  $\Delta T_{Di} \leftrightarrow \Delta E_i^{NAB}$  проявляє себе як дрейф ФП ТП  $\Delta E_i^{DR}$  (у сталому профілі температурного поля похибка від набутої термоелектричної неоднорідності себе не проявляє, тобто  $\Delta E_i^{NEOD} \rightarrow 0$ ). На рис. 2.10 цей стан відповідає крайньому лівому положенню  $i$ -тої ділянки на кривій її поточного стану. Тоді, як видно з рис. 2.10,  $\Delta E_i^{DR} \rightarrow \max$ .

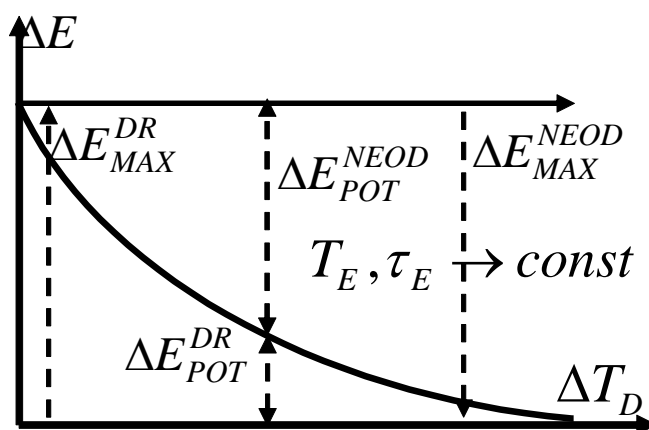


Рис. 2.10. Залежність похибки ТП від зміни поточної температури

При зміні профілю температурного поля проявляє себе похибка від набутої термоелектричної неоднорідності  $\Delta E_i^{NEOD}$ . Цей процес відповідає руху  $i$ -тої ділянки вздовж кривої її поточного стану. Якщо  $T_{Di} \rightarrow 0$ , тобто  $\Delta T_{Di} \rightarrow \max$ , то крива поточного стану ділянки прямує до нуля. Це відповідає переміщенню профілю температурного поля із положення ABCD (див. рис. 2.9) у із положення AB1C1D. Тоді похибка від дрейфу ФП цієї ділянки ТП прямує до нуля, тобто  $\Delta E_i^{DR} \rightarrow 0$ . Але тоді прямує до максимуму похибка від набутої неоднорідності ділянки ТП, тобто  $\Delta E_i^{NEOD} \rightarrow \max$ . Як було відзначено, всі зміни профілю температурного поля та похибок ФП ТП відповідають переміщенню положення  $i$ -тої віртуальної ділянки у межах кривої її поточного стану. Тому очевидно, що, як було відзначено у (2.45) і (2.46), максимальні значення похибки від дрейфу ФП цієї ділянки ТП та від набутої термоелектричної неоднорідності рівні. Із рис. 2.10 видно, що ці похибки мусять бути протилежні за знаками (хоча у публікаціях цього не завжди дотримуються). Так само із рис. 2.10 видно, що під час руху вправо  $i$ -тої віртуальної ділянки у межах кривої її поточного стану відбувається «заміщення» похибки від дрейфу ФП цієї ділянки ТП похибкою від набутої неоднорідності. При русі вліво навпаки, похибка від дрейфу ФП ділянки ТП «заміщає» похибку від набутої термоелектричної неоднорідності.

Із рис. 2.10 також очевидно, що при «заміщенні» похибки  $\Delta E_i^{NEOD}$  і  $\Delta E_i^{DR}$  будуть різних знаків (коли одна з них наростає, інша зменшується). Але сума абсолютних значень цих похибок мусить бути сталою та рівною їх максимальним значенням, що підтверджує (2.45), (2.46).

Слід відзначити, що залежність (2.46) є важливим розвитком висновку, зробленого у [188]. Вона підтверджує тісний зв'язок між похибками від дрейфу ФП ТП та від набутої термоелектричної неоднорідності як проявами однієї причини – деградації електродів ТП. Ці прояви відрізняються умовами, при яких вони виникають. Але тісний зв'язок між похибками дає змогу розробити методи оперативного визначення поточної похибки ТП [219 - 222] та діагностування стану їх електродів [217, 223 - 228] під час її експлуатації.

Згідно з рис. 2.10 і (2.46), для ТЕП з КПТП поточну похибку  $\Delta E_{POT}^{DR}$  його головної ТП, що вимірює температуру об'єкта, можна визначити тимчасово змістивши профіль температурного поля від ABCD до AB2C2D (див. рис. 2.9) та виміривши зміну поточної термо-е.р.с ТП  $\Delta E_{POT}$ . При цьому похибка  $\Delta E_{POT}^{NEOD}$  «замістить»  $\Delta E_{POT}^{DR}$ . А  $\Delta E_{POT}^{NEOD}$  у свою чергу рівна  $\Delta E_{POT}$ . Тому  $\Delta E_{POT}^{DR} = \Delta E_{POT}^{VYM}$ . Остання залежність дає змогу розробити оперативний метод визначення поточної похибки ТП.

У даному параграфі проведено аналітичні та графічні дослідження поведінки неоднорідних ТП у різних профілях температурного поля. Показано, що властивості основних похибок ТП (від дрейфу ФП ТП та від набутої термоелектричної неоднорідності) дають змогу визначити поточну похибку ТП за рахунок цілеспрямованої зміни профілю температурного поля вздовж її електродів, тобто створити оперативний метод визначення похибки ТП, потреба у якому обґрунтована у § 2.1.

### 2.3 Дослідження залежності визначення похибки термопар від профілів температурного поля

Насамперед слід переконатися, чи розроблений оперативний метод визначення поточної похибки ТП не буде мати значних методичних похибок. Метод базується на зміні профілю температурного поля вздовж електродів ТП. Тому для нього методичною похибкою буде залежність визначеної поточної похибки ТП від змін профілів температурних полів при експлуатації та при визначенні поточної похибки ТП. Методика дослідження методичної похибки полягає у визначенні зміни отриманої за допомогою цього методу поточної похибки ТП залежно від зміни параметрів профілів температурного поля під час реалізації методу. Дослідження проведемо шляхом імітаційного моделювання у широко розповсюдженому табличному процесорі Excel. При дослідженні необхідно виконати наступні операції:

1. Задати умови дослідження. Для спрощення прийmemo температуру вільних кінців рівною нулю, а температуру з'луту – 800°C. Профіль температурного поля опишемо сигмоїдою [229] як при експлуатації, так і при зміні. Ці профілі температурного поля описуються формулою

$$T = \frac{800}{1 + e^{-3(N/10 - C)}} , \quad (2.47)$$

де  $T$  – поточна температура профілю температурного поля;  $N$  – поточний номер профілю температурного поля;  $C$  – номер профілю температурного поля, для профілю температурного поля експлуатації  $C = 7$  (для кожного наступного профілю температурного поля  $C$  зменшується на 0,5). Загальна кількість профілів температурного поля  $j = 10$  (профілі подібні між собою).

Дослідження проводиться при використанні ТП типу ХА, номінальна чутливість (питома термо-е.р.с.) якої прийнята  $e = 40 \mu V$ . Загальна довжина ТП розбита на  $i = 100$  ділянок. Ділянка з номером 0 відповідає вільним кінцям (температура рівна нулю), а ділянка з номером 100 відповідає з'луту (температура рівна 800°C). Індеси  $N$  і  $N_0$  підібрані таким чином, що зона

максимальної зміни температури переміщується від 75 до 25.

Похибка від дрейфу ФП ТП  $\Delta e$  імітується додаванням до номінальної термо-е.р.с. значення, обчисленого за формулою

$$\Delta e = AT_{EKS} + BT_{EKS}^2, \quad (2.48)$$

де  $T_{EKS}$  – температура постійної експлуатації ділянки ТП;  $A = 0,0025$ ,  $B = 2 \cdot 10^{-6}$  – коефіцієнти, підібрані, щоби сумарна похибка ТП  $\approx 11^\circ\text{C}$  [122].

2. Розрахувати номінальні та дійсні термо-е.р.с., що генеруються кожною ділянкою за формулами (у всіх профілях температурного поля)

$$E_i^{NOM} = e(T_{i+1} - T_i), \quad (2.49)$$

$$E_i^{REAL} = (e + \Delta e) \cdot (T_{i+1} - T_i), \quad (2.50)$$

де  $E_i^{NOM}$ ,  $E_i^{REAL}$  – номінальна та дійсна термо-е.р.с. кожної ділянки;  $T_{i+1}$ ,  $T_i$  – температури початку та кінця кожної ділянки.

3. Розрахувати номінальні та дійсні термо-е.р.с., що генеруються ТП у цілому (у всіх профілях температурного поля)

$$E_j^{NOM} = \sum_{i=0}^{100} E_i^{NOM}, \quad (2.51)$$

$$E_j^{REAL} = \sum_{i=0}^{100} E_i^{REAL}, \quad (2.52)$$

де  $E^{NOM}$ ,  $E^{REAL}$  – номінальна та дійсна термо-е.р.с. ТП.

4. Розрахувати похибки від дрейфу ФП ТП як різниці між реальною та номінальною термо-е.р.с., що генерується ТП, для кожного профілю температурного поля

$$\Delta E_j^{DR} = E_j^{REAL} - E_j^{NOM}, \quad (2.53)$$

де  $\Delta E_j^{DR}$  – похибка від дрейфу ФП ТП для  $j$ -того профілю температурного поля;

5. Розрахувати похибки від набутої термоелектричної неоднорідності як різниці між термо-е.р.с., що генерується ТП, для профілю

температурного поля експлуатації та термо-е.р.с., що генеруються ТП, для всіх інших профілів температурного поля

$$\Delta E_j^{NEOD} = E_j^{REAL} - E_{EXPL}^{REAL}, \quad (2.54)$$

де  $\Delta E_j^{NEOD}$  – похибка від набутої термоелектричної неоднорідності для  $j$  – того профілю температурного поля;  $E_j^{REAL}$ ,  $E_{EXPL}^{REAL}$  – реальні термо-е.р.с., що генеруються ТП, для кожного профілю температурного поля та термо-е.р.с., що генеруються ТП, у профілі температурного поля експлуатації.

6. Розрахувати для кожного профілю температурного поля суму похибок від набутої неоднорідності  $\Delta E_j^{NEOD}$  та від дрейфу ФП ТП  $\Delta E_j^{DR}$ .

Результати виконання викладеної методики подані на рис. 2.11 та 2.12. На рис. 2.11 показано рівномірне переміщення профілю температурного поля у виді однакових сигмоїд, а рис. 2.12 ілюструє зміни похибок від набутої термоелектричної неоднорідності  $\Delta E_j^{NEOD}$  та від дрейфу ФП ТП  $\Delta E_j^{DR}$  для кожного профілю температурного поля.

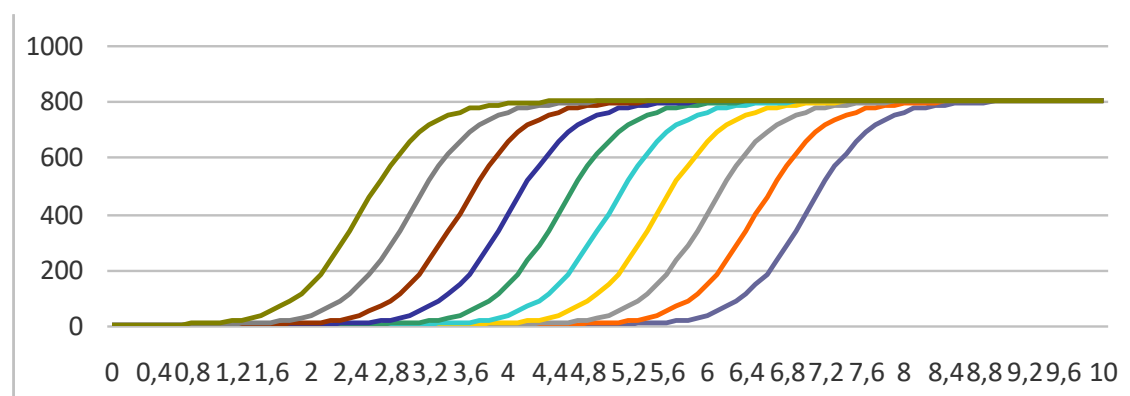


Рис. 2.11. Рівномірне переміщення профілю температурного поля у виді однакових сигмоїд

Як видно із рис. 2.12, при поступовому зміщенні профілю температурного поля вліво (див. рис. 2.11) проходить поступове «заміщення» похибкою від набутої термоелектричної неоднорідності (починається з нуля на рис. 2.12) похибки від дрейфу ФП ТП (починається із значення 452 мкВ на рис. 2.12). При цьому сума цих похибок, як і було теоретично обґрунтовано у § 2.2,



залишається постійною.

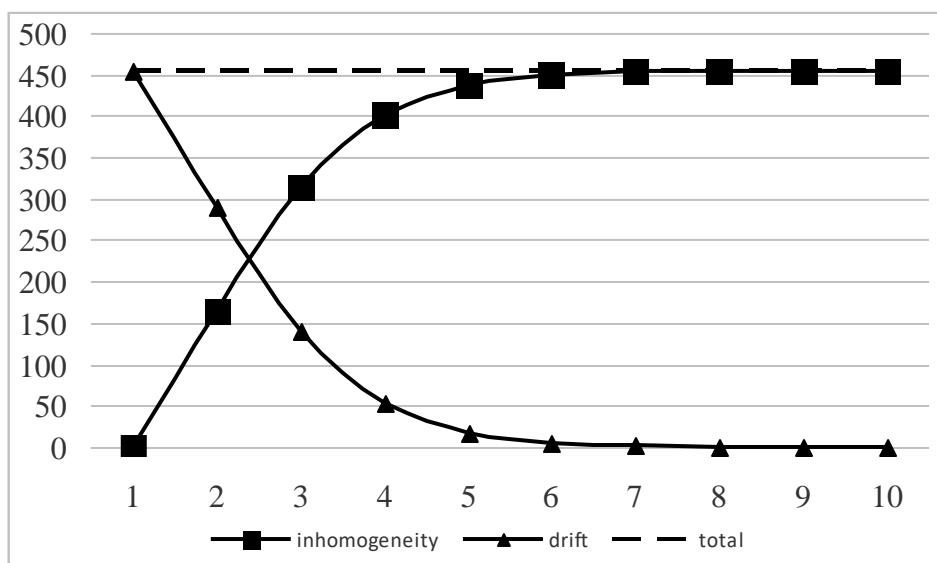


Рис. 2.12. Зміни похибок від набутої термоелектричної неоднорідності та від дрейфу ФП ТП для профілів температурного поля у виді однакових сигмоїд

Однак рис. 2.11 ілюструє вплив лише рівномірного переміщення лише однакового по формі профілю температурного поля (сигмоїди з однаковими параметрами, зміщені вліво на однакові інтервали).

Згідно з розробленою методикою проведено аналіз впливу на прояви похибок від дрейфу ФП ТП та від набутої термоелектричної неоднорідності нерівномірного переміщення профілю температурного поля у вигляді сигмоїд з різними параметрами. Результати дослідження подані на рис. 2.13 та 2.14. На рис. 2.13 показано таке нерівномірне переміщення профілю температурного поля у виді різних сигмоїд, а рис. 2.14 ілюструє зміни похибок від набутої термоелектричної неоднорідності  $\Delta E_j^{NEOD}$  та від дрейфу ФП ТП  $\Delta E_j^{DR}$  для кожного профілю температурного поля [217, 218].

Як видно із рис. 2.14, при зміщенні профілю температурного поля вліво (див. рис. 2.13), аналогічно до попереднього варіанту (див. рис. 2.12), проходить поступове (див. рис. 2.14) «заміщення» похибкою від набутої термоелектричної неоднорідності (починається з нуля на рис. 2.14) похибки від дрейфу ФП ТП (починається із 452 мкВ на рис. 2.14). При цьому сума цих

похибок, згідно із § 2.2, залишається постійною і рівною значенню при рівномірному переміщенні однакових сигмоїд.

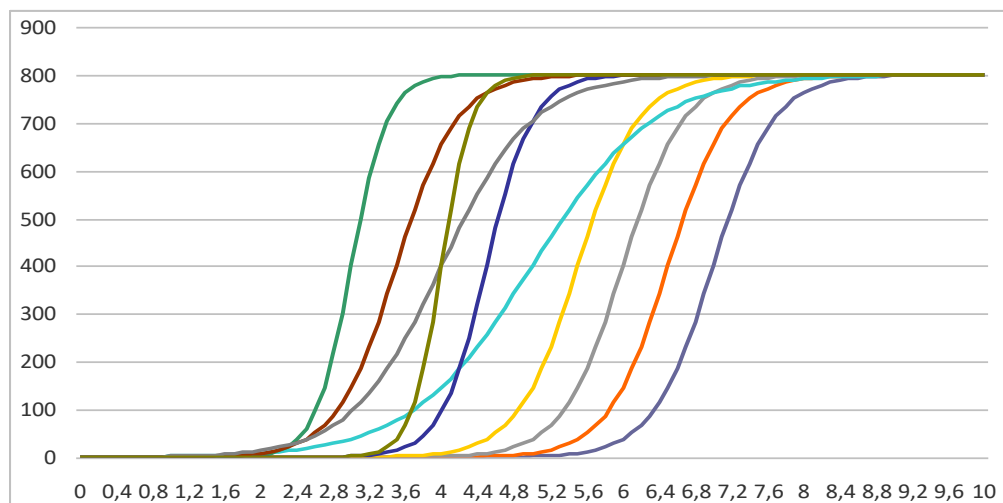


Рис. 2.13. Рівномірне переміщення профілю температурного поля у виді різних сигмоїд

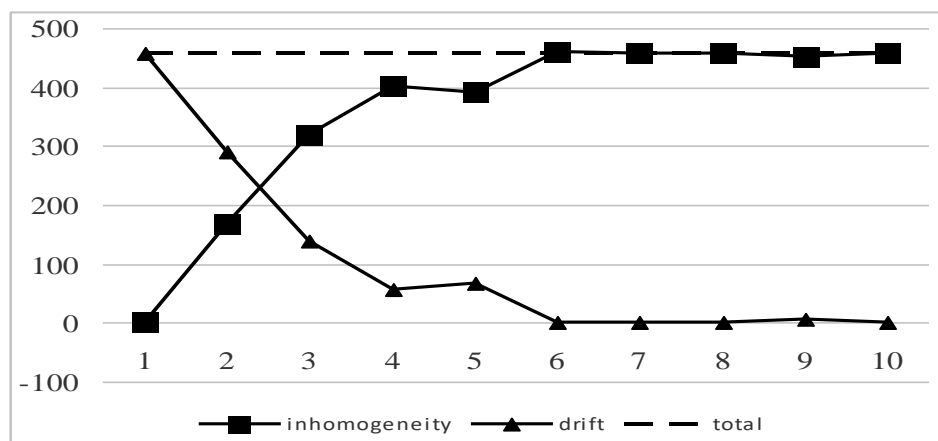


Рис. 2.14. Зміни похибок від набутої термоелектричної неоднорідності та від дрейфу ФП ТП для профілю температурного поля у виді різних сигмоїд

Але можливі форми профілю температурного поля не вичерпуються сигмоїдами, як на рис. 2.11, 2.13. Згідно з розробленою методикою було проведено аналіз впливу на прояви похибок від дрейфу ФП ТП та від набутої термоелектричної неоднорідності при нерівномірному переміщенні профілю температурного поля у вигляді сигмоїд та у виді відрізків прямих з різними параметрами. Результати дослідження подані на рис. 2.15 та 2.16.

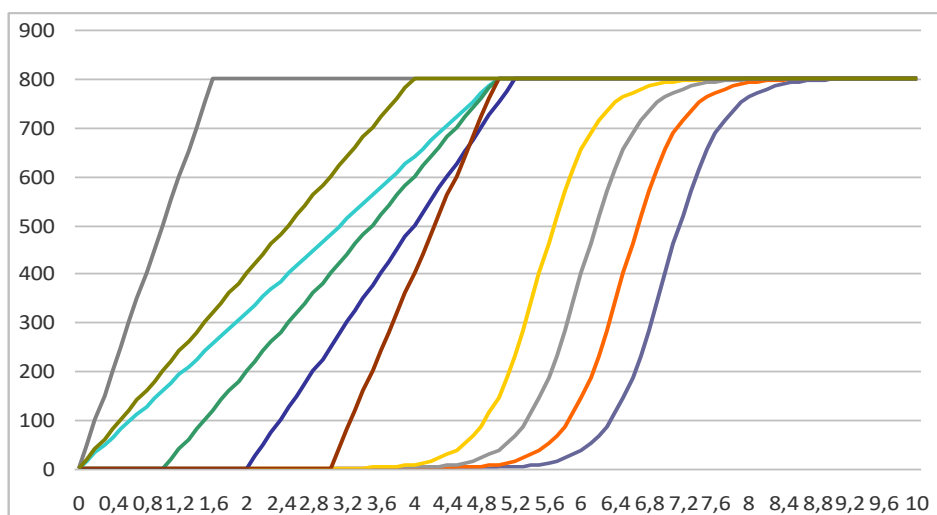


Рис. 2.15. Рівномірне переміщення профілю температурного поля у виді сигмоїд та у виді відрізків прямих з різними параметрами

На рис. 2.15 показано таке переміщення профілів температурних полів, а рис. 2.16 ілюструє зміни похибок від набутої термоелектричної неоднорідності  $\Delta E_j^{NEOD}$  та від дрейфу ФП ТП  $\Delta E_j^{DR}$  для кожного профілю температурного поля.

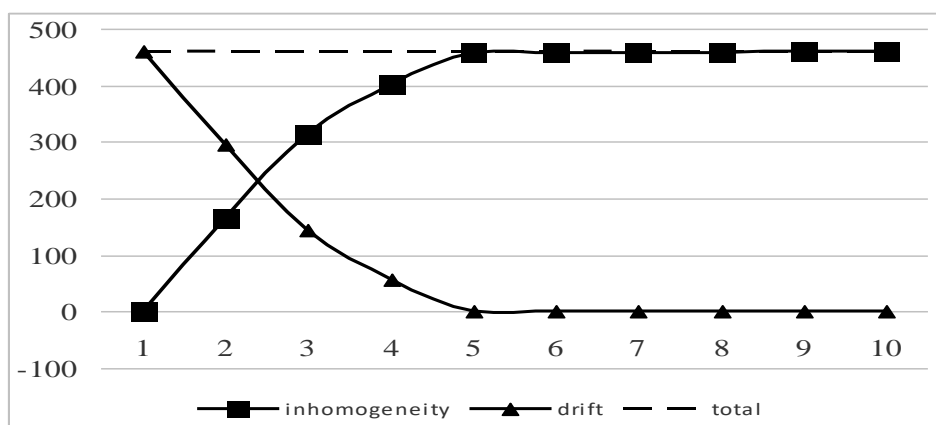


Рис. 2.16. Зміни похибок від набутої термоелектричної неоднорідності та від дрейфу ФП ТП для кожного профілю температурного поля у виді сигмоїд та у виді відрізків прямих з різними параметрами

Як видно із рис. 2.16, при зміщенні профілю температурного поля вліво (див. рис. 2.15), аналогічно до попередніх варіантів (див. рис. 2.12, 2.14), проходить поступове (див. рис. 2.16) «заміщення» похибкою від набутої

термоелектричної неоднорідності (починається з нуля на рис. 2.16) похибки від дрейфу ФП ТП (починається із 452 мкВ на рис. 2.16). При цьому сума значень цих похибок, як і було теоретично обґрунтовано у § 2.2, залишається постійною і рівною значенню, отриманому для рівномірного переміщення однакових сигмоїд.

Проведені дослідження дають можливість зробити наступні висновки:

1. Результат визначення похибки ТП не залежить від форми профілю температурного поля в зоні опорної ділянки;
2. Результат визначення похибки ТП не залежить від виду функції похибки від температури.

Звідси можна зробити загальний висновок – проведені дослідження показали, що метод визначення похибки ТП шляхом цілеспрямованого переміщення профілю температурного поля вздовж її електродів не має методичної похибки. Цей метод є перспективною основою для оперативного методу визначення похибки ТП у процесі її експлуатації [217, 218].

У даному параграфі проведено імітаційні дослідження методу визначення похибки ТП шляхом цілеспрямованого переміщення профілю температурного поля вздовж її електродів. Показано, що метод не має методичної похибки, а тому є перспективним для створення оперативного методу визначення похибки ТП, потреба у якому обґрунтована у § 2.1.

#### **2.4 Оперативний метод визначення похибки термоелектричного перетворювача**

Як показали дослідження, проведені у § 2.3, метод визначення поточної похибки ТП шляхом цілеспрямованого зміщення профілю температурного поля вздовж її електродів дає можливість правильного визначення поточної похибки ТП, не має методичної похибки та може бути основою оперативного методу визначення поточної похибки ТП при експлуатації [217, 218].

Як виникає із викладеного у §§ 2.2, 2.3, щоби отримати значення поточної похибки дрейфу ФП ТП достатньо від термо-е.р.с.  $E_{ABCD}$  (термо-

е.р.с. ТП при її розміщенні у профілі температурного поля ABCD, рис. 2.9) відняти термо-е.р.с.  $E_{AB1C1D}$  (термо-е.р.с. ТП при її розміщенні у профілі температурного поля AB1C1D, рис. 2.9). Також, відповідно до проведених у § 2.3 досліджень, немає потреби витримувати високу точність витримки профілю температурного поля AB1C1D. Важливо лише, щоб зони градієнту цих профілів розміщувалися у ділянках ТП так, щоби точка B1 профілю AB1C1D, знаходилася лівіше точки C профілю ABCD (див. рис. 2.9). Таким чином, умовами визначення поточного значення дрейфу ФП головної ТП таким методом є:

1. Достатнє "винесення" зони градієнту профілю температурного поля, тобто точка C повинна знаходитися правіше точки B2 (див. рис. 2.9);
2. Сталість температури з'луту  $T_{RK}$  ТП на протязі часу визначення похибки (при високій точності корекції температури вільних кінців  $T_{VK}$  її зміни не впливають на результат визначення дрейфу ФП головної ТП).

Для підвищення точності вимірювання температури слід усунути вплив на результат визначення поточної похибки ТП початкового індивідуального відхилення ФП її ділянок B1...C від номінальної [219 - 221, 226]. Для цього при випуску ТЕП з КПТП з виробництва проводять визначення його похибки, наприклад, за допомогою робочого еталону (ТЕП або ТП) таким чином, щоби термо-е.р.с. головної ТП, що входить у ТЕП з КПТП, створювали ділянки, які будуть її створювати під час визначення поточного дрейфу ФП головної ТП, тобто B1...C1 .

Сумарну термо-е.р.с. головної ТП  $E_{\Sigma}$  , згідно з рис. 2.9, можна визначити як

$$E_{\Sigma} = \int_D^{C1} e_{C1} \frac{\partial t}{\partial l} dl + \int_{C1}^{C2} e_{C2} \frac{\partial t}{\partial l} dl + \int_{C2}^C e_C \frac{\partial t}{\partial l} dl + \int_C^B e_B \frac{\partial t}{\partial l} dl + \int_B^A e_A \frac{\partial t}{\partial l} dl , \quad (2.55)$$

де A...D – ділянки головної ТП, що входить у ТЕП з КПТП, згідно із рис. 2.10;  $e_A \dots e_{C2}$  – відповідні питомі термо-е.р.с. ділянок головної ТП.

При цьому похибку головної ТП  $\Delta E_{\Sigma}$  під час визначення похибки можна

визначити як [6, 122]

$$\Delta E_{\Sigma} = \int_D^{C1} \Delta e_{C1}(T_{VK}, \tau) \frac{\partial t}{\partial l} dl + \int_{C1}^{C2} \Delta e_{C1}(T_{VK}, \tau) \frac{\partial t}{\partial l} dl + \int_{C2}^C \Delta e_C(T_{VK}, \tau) \frac{\partial t}{\partial l} dl + \\ + \int_C^B \Delta e_B(T_E, \tau) \frac{\partial t}{\partial l} dl + \int_B^A \Delta e_A(T_E, \tau) \frac{\partial t}{\partial l} dl \quad , \quad (2.56)$$

де  $\Delta e_{C1}(T_{VK}, \tau) \dots \Delta e_A(T_E, \tau)$  – індивідуальні відхилення питомої термо-е.р.с. ділянок головної ТП;  $T_{VK}$ ,  $T_E$  – температури постійної експлуатації ділянок ТП, тобто вільних кінців та об'єкта вимірювання температури.

При визначенні як сумарної термо-е.р.с. головної ТП  $E_{\Sigma}$ , так і її похибки  $\Delta E_{\Sigma}$ , слід враховувати (2.23) і (2.24). Для цього розглянемо профілі температурного поля при метрологічному обслуговуванні ТЕП з КПТП (рис. 2.17). При визначенні похибки ТЕП з КПТП при випуску з виробництва за допомогою робочого еталону профіль температурного поля головної ТП повинен відповідати рис. 2.17а).

Отримана похибка враховує індивідуальні відхилення ФП ділянок  $l_1 \dots l_2$  від номінальної ФП. Слід відзначити, що на початку експлуатації, тобто під час первинного визначення похибки (при випуску з виробництва) можна вважати, що  $\tau_E = \tau_0 = 0$ , тому похибки, пов'язані з деградацією ТП ще не появились, тобто можна записати

$$\Delta e_{l1}^{DR} \dots \Delta e_{l5}^{DR} = 0 ; \quad \Delta e_{l1}^{NEOD} \dots \Delta e_{l5}^{NEOD} = 0 , \quad (2.57)$$

Також слід відзначити, що, згідно із (2.24), не всі ділянки ТП під час первинного визначення похибки генерують термо-е.р.с. – ділянки від  $l_2$  до  $l_5$  (див. рис. 2.17а) знаходяться у профілі температурного поля, яке має нульовий градієнт, тому термо-е.р.с. не генерують. Тоді похибку, визначену під час первинного визначення похибки (див. рис. 2.17а) можна, згідно з [219 - 221], представити як

$$\Delta E_{\Sigma}^{P1} = \int_{l1}^{l2} \Delta e_1(T_{E0}, \tau_0) \frac{\partial t}{\partial l} dl , \quad (2.58)$$

де  $\Delta E_{\Sigma}^{P1}$  – результат первинного визначення похибки (індивідуальне

відхилення ФП ділянки  $l_0...l_1$  від номінальної).

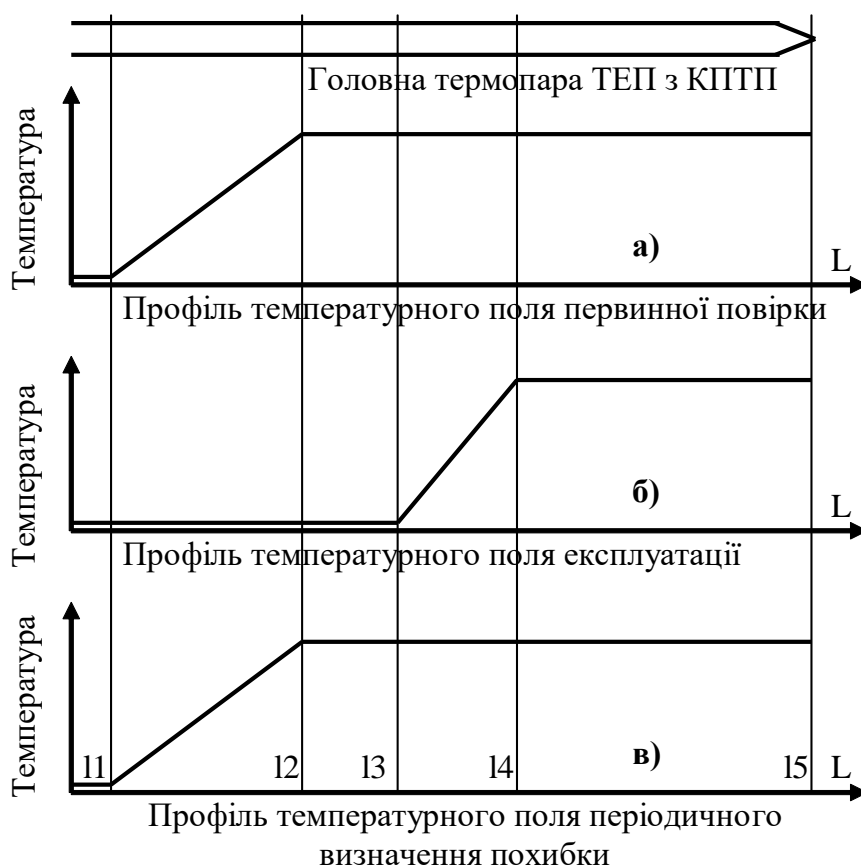


Рис. 2.17. Процес метрологічного обслуговування ТЕП з КПТП на протязі життєвого циклу

Рівність (2.58) показує, що похибка головної ТП, що входить у ТЕП з КПТП, при первинному визначенні похибки визначається лише ділянками  $l_1...l_2$ . Інші ділянки знаходяться у профілі температурного поля з градієнтом, близьким до нуля, і майже не генерують термо-е.р.с., тому їх похибка при первинному визначенні похибки не впливає на результат вимірювання. Для визначення дійсної температури необхідно провести корекцію початкового індивідуального відхилення ФП ділянок  $l_1...l_2$  від номінальної за результатами первинного визначення похибки за формулою

$$E_{TC}^{KOR} = E_{TC}^{VYM} - \Delta E_{\Sigma}^{P1}, \quad (2.59)$$

Далі експлуатація проводиться в профілі температурного поля (рис. 2.17б) на протязі часу  $\tau_E = \tau_1 \neq 0$ . При цьому дрейфують ділянки  $l_3...l_5$

(див. рис. 2.17б), тобто, на відміну від (2.57),  $\Delta e_3(T_E, \tau_1) \neq \Delta e_4(T_E, \tau_1) \neq 0$ . А ділянки  $l_1 \dots l_3$ , згідно із (2.22), не дрейфують через низьку температуру, тобто  $\Delta e_1(T_{VK}, \tau_1) = \Delta e_2(T_{VK}, \tau_1) = 0$ . Однак, через те, що для ділянки  $l_4 \dots l_5$  градієнт  $dt/dl \rightarrow 0$ , тому  $\Delta E_{l_4 \dots l_5} \rightarrow 0$ . Для цього випадку, аналогічно до (2.58), можна записати

$$\Delta E_{\Sigma}^E = \int_{l_3}^{l_4} \Delta e_3(T_E, \tau_1) \frac{\partial t}{\partial l} dl \quad , \quad (2.60)$$

де  $\Delta E_{\Sigma}^E$  – похибка від індивідуального відхилення ФП ТП від номінальної під час експлуатації для часу  $\tau = \tau_1$ , включаючи дрейф ФП ТП через вплив високої температури експлуатації.

Періодично, коли температура зльоту  $T_{RK}$  головної ТП, що входить в ТЕП з КППП, деякий час не змінюється та можна прогнозувати відсутність змін  $T_{RK}$  на протязі 20...30 хвилин, проводиться визначення її поточної похибки. Для цього профіль температурного поля встановлюється згідно із рис. 2.17в), який повинен відповідати профілю температурного поля первинного визначення похибки (рис. 2.17а). Тоді хоча  $\Delta e_3(t_e, \tau_1) \neq \Delta e_4(t_e, \tau_1) \neq 0$ , вони не впливають на термо-е.р.с. головної ТП тому, що  $dt/dl \rightarrow 0$  і  $\Delta E_{l_2 \dots l_5} \rightarrow 0$ . Тому результат періодичного визначення похибки  $\Delta E_{\Sigma}^{PP}$  можна визначити як

$$\Delta E_{\Sigma}^{PP} = \int_{l_1}^{l_2} \Delta e_1(T_E, \tau_1) \frac{\partial t}{\partial l} dl \quad . \quad (2.61)$$

Через те, що ділянка  $l_1 \dots l_2$  перебувала при високій температурі доволі короткий час (лише для визначення поточного значення похибки ТП), дійсне значення  $T_{RK}$  можна визначити за результатами початкового індивідуального відхилення ФП ділянок  $l_1 \dots l_2$  від номінальної. Знаючи результати поточних вимірювань температури відповідно до (2.59) можна знайти їх поточне відхилення від дійсного значення температури, тобто похибку вимірювання



температури при профілі температурного поля рис. 2.176) – профілі температурного поля експлуатації. Корекцію поточної термо-е.р.с. головної ТП проводимо за формулою

$$E_{TC}^{KOR} = E_{TC}^{VYM} - \Delta E_{\Sigma}^{PP} - \Delta E_{\Sigma}^{P1}, \quad (2.62)$$

За результатами ряду таких визначень поточної похибки головної ТП на місці експлуатації  $\Delta E_{\Sigma}^{PP}$  доцільно побудувати математичну модель дрейфу ФП головної ТП і прогнозувати її дрейф для збільшення допустимого інтервалу між визначеннями похибки та зменшення імовірності ситуації, при якій потрібно проводити чергове визначення похибки, а умови для нього не виконуються – температура зльоту не залишається постійною.

Для оцінки інструментальної похибки оперативного методу визначення похибки ТП на місці експлуатації оцінимо його похибку шляхом аналізу (2.58) - (2.62). Джерела похибки при первинному визначенні похибки:

1. Похибка робочого еталону  $\Delta_N$  (еталонний ТП, який використовують при первинному калібруванні головної ТП). Ця похибка залежить від типу еталону, згідно із [110, 230, 231] вона може становити 0,3°C або 0,6°C для ТП першого або другого розряду відповідно.
2. Похибка вимірювання термо-е.р.с. ТП робочого еталону  $\Delta_N^E$ . Ця похибка залежить від якості вимірювальної системи, що використовується при первинному визначенні похибки, згідно із [52, 178] для платинових ТП вона може не перевищувати 0,4°C.
3. Похибка корекції температури вільних кінців ТП робочого еталону  $\Delta_N^{VK}$ . Згідно із розділом 4 вона може не перевищувати 0,15°C [162, 163].
4. Похибка визначення температури за термо-е.р.с. ТП робочого еталону  $\Delta_N^T$ . Ця похибка залежить від використовуваних методів лінеаризації та корекції похибок ТП робочого еталону. Згідно із [48, 49, 52] вона може не перевищувати 0,1°C.
5. Похибка вимірювання термо-е.р.с.  $\Delta_X^E$  головної ТП, похибку якої

визначають. Згідно із [52, 220, 221], для ТП типу ХА, вона може не перевищувати  $0,15^{\circ}\text{C}$ .

6. Похибка корекції температури вільних кінців ТП, похибку якого визначають  $\Delta_X^{VK}$ . Згідно із розділом 4, для ТП типу ХА, вона може не перевищувати  $0,15^{\circ}\text{C}$  [162, 163].
7. Похибка визначення температури  $\Delta_X^T$  за термо-е.р.с. ТП, похибку якого визначають, яка залежить від методів лінеаризації та корекції похибок. Згідно із [48, 52], для ТП ХА, вона не перевищуватиме  $0,1^{\circ}\text{C}$ .
8. Похибка від різниці температур злутів еталонного ТП та ТП, похибку якого визначають  $\Delta_X^{DT}$ . Вона залежить від використовуваних методів вирівнювання температури в печі, в якій проводять первинне визначення похибки ТП. При застосуванні нікелевого термовирівнювача ця похибка не буде перевищувати  $0,1^{\circ}\text{C}$  [229, 232].
9. Похибка комутації ТП  $\Delta^K$ . Згідно із [52, 233, 234], для платинових ТП похибка комутації  $\Delta_N^K$  може не перевищувати  $0,1^{\circ}\text{C}$ , а для ТП типу ХА похибка комутації  $\Delta_X^K$  може не перевищувати  $0,03^{\circ}\text{C}$ .

Сумарна похибка первинного визначення похибки  $\Delta_{\Sigma}^{P1}$  буде [235]

$$\Delta_{\Sigma}^{P1} = \sqrt{\Delta_N^2 + \Delta_N^E^2 + \Delta_N^{VK^2} + \Delta_N^T^2 + \Delta_X^E^2 + \Delta_X^{VK^2} + \Delta_X^T^2 + \Delta_X^{DT^2} + \Delta_N^K^2 + \Delta_X^K^2} . \quad (2.63)$$

Підставивши вказані значення похибок отримаємо  $\Delta_{\Sigma}^{P1} \leq 0,6 \dots 0,8^{\circ}\text{C}$ , залежно від того, чи при первинному визначенні похибки використано робочий еталон (ТП) першого, чи другого розряду [230, 231].

Основні джерела визначення поточної похибки ТП:

1. Похибка "опорної ділянки", що використовується при визначенні поточної похибки головної ТП  $\Delta_N^{PP}$ , тобто, згідно із розробленим методом визначення похибки, ділянок  $l_1 \dots l_2$  головної ТП. Частковий аналіз цієї похибки було проведено вище (див. пп. 1...9), а додаткову похибку, пов'язану із деградацією "опорної ділянки", оцінено нижче.

2. Похибка вимірювання термо-е.р.с.  $\Delta_X^E$  ТП, похибку якої визначають. Згідно із [52, 178], для ТП ХА, вона не перевищуватиме  $0,1^\circ\text{C}$ .
3. Похибка корекції температури вільних кінців  $\Delta_X^{VK}$  ТП, похибку якої визначають. Згідно із розділом 4, для ТП типу ХА, вона може не перевищувати  $0,15^\circ\text{C}$  [162, 163].
4. Похибка визначення температури  $\Delta_X^T$  за термо-е.р.с. ТП, похибку якої визначають, яка залежить від методів лінеаризації та корекції похибок. Згідно із [48, 52], для ТП ХА, вона не перевищуватиме  $0,1^\circ\text{C}$ .
5. Похибка від зміни температури зльоту  $\Delta_X^{TRK}$  ТП, похибку якої визначають. Ця похибка залежить від вибраного інтервалу часу визначення поточної похибки ТП і не може бути наперед строго оцінена. Для її оцінки під час визначення поточної похибки ТП необхідно виконати замкнений цикл вимірювання – виміряти температуру об'єкта до і після визначення поточної похибки. Якщо різниця сумірна із допустимою похибкою визначення поточної похибки ТП вимірювання слід повторити. Аналіз швидкості зміни температури котлів теплових електростанцій, показав, що можна прийняти  $\Delta_X^{TRK} \leq 0,4^\circ\text{C}$ .
6. Похибка комутації ТП  $\Delta_X^K$ . Згідно із [52], для ТП типу ХА похибка комутації  $\Delta_X^K$  може не перевищувати  $0,03^\circ\text{C}$ .
7. Похибка підтримання профілю температурного поля ТЕП з КПТП  $\Delta_X^{POL}$ . Ця похибка теж буде оцінена нижче.

Згідно із розробленим методом, засобом, який використовується при визначенні поточної похибки головної ТП, є її ділянка  $l_1 \dots l_2$  ("опорна ділянка, див. рис. 2.17). Відхилення ФП ділянки  $l_1 \dots l_2$  від номінальної визначається при первинному визначенні похибки. Тому їх похибка буде визначатися похибкою первинного визначення похибки  $\Delta_\Sigma^{P1} \leq 0,6 \dots 0,8^\circ\text{C}$  та дрейфом ФП ділянки  $l_1 \dots l_2$  при дії на неї вимірюваної температури. Згідно із [34], для ТП типу ХА при

температурі експлуатації  $T_E = 800^\circ\text{C}$ , зміна ФП не буде більшою за  $\Delta_X^{PS} = 24,5^\circ\text{C}$  за час  $\tau_E = 8000$  годин. Прийmemo, що визначення поточної похибки ТП становить 0,5 години, а її визначення проводиться один раз на тиждень, то за рік тривалість експлуатації ділянок  $l_1...l_2$  головної ТП не буде перевищувати  $\tau_{EN} = 26$  годин. Згідно із [34], для ТП типу ХА за перші 100 годин експлуатації дрейф ФП ТП складає майже половину дрейфу за увесь час експлуатації. Тому перед первинним визначенням похибки слід провести попередню підготовку головної ТП, що полягає у витримці її на протязі 100...150 годин у профілі температурного поля, яке "накриває" майбутній профіль температурного поля первинного визначення похибки. Тоді зміну  $\Delta_{NP}$  ФП ділянок  $l_1...l_2$  ТП типу ХА за час визначення поточної похибки можна оцінити як  $\Delta_{NP} = 0,5 \cdot \Delta_X^{PS} \cdot \tau_{EN} / \tau_E \leq 0,04^\circ\text{C}$ .

Як було показано у § 2.3, відхилення профілю температурного поля ТЕП з КППП у зоні "опорної ділянки"  $l_1...l_2$  на похибку оперативного методу визначення похибки ТП не впливають. Тому зміни профілю, викликані методом керування профілем температурного поля, оцінимо через імітаційне моделювання та експериментальні дослідження. А зміни профілю, викликані дрейфом додаткових ТП систем керування температурним профілем за час експлуатації, для похибки від набутої термоелектричної неоднорідності будуть величиною другого порядку малості. Навіть при максимальній похибці від набутої термоелектричної неоднорідності  $\Delta_X^{NEOD} \approx 11^\circ\text{C}$  [122], яка проявляє себе при максимальній зміні поточної температури [133]  $\Delta T_D = T_E = 800^\circ\text{C}$ , невиключена похибка від змін профілю температурного поля ТЕП з КППП не буде перевищувати  $\Delta_{EKV}^{NEOD} \approx \Delta_X^{NEOD} \cdot \Delta_X^{POL} / \Delta T_D \leq 0,35^\circ\text{C}$ .

Таким чином, додаткова похибка  $\Delta_X^{PP}$ , що виникає при визначенні поточної похибки головної ТП, буде складати [220, 221, 239]

$$\Delta_X^{PP} = \sqrt{\Delta_N^{PP^2} + \Delta_X^E{}^2 + \Delta_X^{VK^2} + \Delta_X^T{}^2 + \Delta_X^{TRK^2} + \Delta_X^K{}^2 + \Delta_{EKV}^{NEOD^2}} \approx 0,55^\circ\text{C} . \quad (2.64)$$

Сумарна похибка визначення поточної похибки ТП  $\Delta_{\Sigma}^{PP}$  рівна сумі похибки при її первинному визначенні  $\Delta_{\Sigma}^{P1}$  та додаткової похибки  $\Delta_X^{PP}$  при визначенні поточної похибки ТП. При використанні під час первинного визначення похибки як робочого еталону ТП першого розряду отримаємо

$$\Delta_{\Sigma}^{PP} = \sqrt{\Delta_{\Sigma}^{P1^2} + \Delta_X^{PP^2}} \leq 0,9^{\circ}\text{C} . \quad (2.65)$$

При використанні еталонної ТП другого розряду отримаємо

$$\Delta_{\Sigma}^{PP} = \sqrt{\Delta_{\Sigma}^{P1^2} + \Delta_X^{PP^2}} \leq 1,1^{\circ}\text{C} . \quad (2.66)$$

Проведений аналіз похибок враховує всі інструментальні похибки вимірювання температури за допомогою ТЕП з КППТП безпосередньо після визначення в процесі експлуатації похибки його головної ТП . У подальшому похибка вимірювання температури буде наростати через дрейф ФП ТП. Але коли за отриманими поточними похибками побудувати індивідуальну модель дрейфу ФП ТП та використати її для корекції похибки ТП між процедурами визначення її похибки, наростання похибки вимірювання температури буде доволі малим. Згідно із результатами дослідження методів прогнозу похибки дрейфу ФП ТП за допомогою НМ, проведеними у [100], похибка прогнозу не буде перевищувати  $0,3^{\circ}\text{C}$ . З врахуванням похибок (2.67) або (2.68) сумарна похибка вимірювання температури не буде перевищувати  $1,3^{\circ}\text{C}$ .

Таким чином, у даному параграфі розроблено оперативний метод визначення поточної похибки головної ТП, що входить у ТЕП з КППТП, на місці експлуатації (не вимагає демонтажу) та у процесі експлуатації, що дає змогу проводити корекцію дрейфу її ФП (безпосередньо або побудувавши індивідуальну математичну модель дрейфу) і, тим самим, забезпечити високу точність вимірювання температури неоднорідними ТП. Перевагою методу є те, що він має малі методичні та інструментальні похибки та вимагає лише первинного визначення похибки головної ТП у складі ТЕП з КППТП, за допомогою еталонного засобу, а при періодичному визначенні похибки на місці експлуатації еталонні засоби не потрібні.

## 2.5 Дослідження впливу зовнішніх факторів на похибку методу оперативного визначення похибки головної терморпарі

Слід відзначити, що методи експериментальних досліджень мають суттєвий недолік – можна дослідити лише обмежену кількість варіантів реалізації досліджуваних методів і засобів. Обмеження пов'язані із значною їх трудомісткістю та обмеженим числом варіантів, які можна реалізувати (відсутні компоненти, що мають всі параметри, потрібні для експериментів).

Дослідити вплив зовнішніх факторів на похибку методу оперативного визначення похибки головної ТП, що входить у ТЕП з КПТП, дає змогу метод імітаційного моделювання [226, 237]. Для проведення цих досліджень не треба мати набір пристроїв, які реалізують всі можливі комбінації всіх їх похибок, достатньо мати лише математичні моделі цих пристроїв.

Звичайно, експериментальні дослідження необхідні. Але оптимальним за достовірністю та трудомісткістю є їх поєднання. Імітаційне моделювання повинно дослідити особливості результату вимірювання при всіх комбінаціях відхилень параметрів компонентів. Мета – вивчення можливостей та умов використання методу. А експериментальні дослідження повинні перевірити правильність та адекватність імітаційного моделювання.

У [52, 238 - 241] було запропоновано об'єднати математичні моделі всіх компонентів ВК, зокрема, температури, у єдиний набір, який названо метрологічним програмним тестом (МПТ). Однак, розроблена у [52, 238] структурна схема МПТ не передбачала дослідження похибки від набутої термоелектричної неоднорідності електродів ТП. Тому у [122, 133, 239 - 241] структура МПТ була дороблена – передбачено блоки, що імітують цю похибку. Але цей варіант не враховував виявлених у § 2.2 взаємозв'язків між похибками дрейфу ФП ТП та від набутої неоднорідності її електродів, які є різними проявами одного явища – деградації електродів ТП під дією високої температури та часу експлуатації. Також слід відзначити, що МПТ, описаний у [52, 238] доволі складний. Це пов'язано з його універсальністю і змогою імітувати вплив на результат вимірювання температури практично всіх

похибок всіх компонентів ВК – він дає можливість дослідити конкретні ВК, які мають набір компонентів згідно із рис. 1.1.

Однак для дослідження оперативного методу визначення похибки ТП доцільно спростити МПТ за рахунок його спеціалізації. Це можливо через те, що, як це буде показано у розділі 4, похибка електричного тракту ВК значно менша за невиключену похибку ТП (див. § 2.4) навіть після її корекції. Крім того, слід врахувати, що систематична похибка електричного тракту ВК коригується встановленням нуля та калібруванням. Однак випадкова похибка буде впливати на похибку опрацювання результатів вимірювання термо-е.р.с. ТП під час корекції похибок ТП. Це пов'язано з тим, що: а) всі типи ТП мають низьку чутливість (для ТП ХА – 40 мкВ/°С [48, 49]); б) при корекції похибок ТП необхідно вимірювати зміни термо-е.р.с., значно менші за самі термо-е.р.с. Тому у розробленому МПТ буде врахована випадкова похибка ВК. Її значення можна оцінити як суму випадкових похибок, викликаних шумом АЦП та залишками впливу завад нормального та загального виду.

Шум АЦП мікроконвертора типу ADUC-834, який використовуємо у ВК систем вимірювання температури високої точності, можна оцінити згідно із [151]. На діапазоні вимірювання термо-е.р.с. 80 мВ шум не перевищує 0,1 мкВ. Мікроконвертори ADUC-834 [151], забезпечують зменшення дії завад нормального виду на 60 дБ, тобто у 1000 разів. Як показали дослідження, завади нормального виду у електропечах не перевищують 2 мВ [139], тому невиключена випадкова похибка від них не буде вища за 2 мкВ. Амплітуда завад загального виду може сягати амплітуди напруги мережі, тобто 300 В [140]. Ефективність методів зменшення впливу завади загального виду сягає 100 - 110 дБ [210 - 213], тобто зменшення у 100 – 300 тис. разів. Ця зменшена амплітуда завади загального виду перетворюється на заваду нормального виду і зменшується ще на 60 дБ. Тобто сумарне зменшення дії завад загального виду сягає близько 170 дБ, тобто 300 млн. разів. Таким чином, невиключену випадкову похибку від завад загального виду можна оцінити як не вищу за 1 мкВ. Сумарну випадкову похибку  $\Delta_{\Sigma}^{ZAV}$  при використанні технічних рішень,

відібраних у § 4.5, можна оцінити за формулою

$$\Delta_{\Sigma}^{ZAV} = \sqrt{U_{ADC}^2 + U_{NORM}^2 + U_{ZAG}^2} = \sqrt{0,1^2 + 2^2 + 1^2} \approx 2,3 \mu V, \quad (2.67)$$

де  $U_{ADC}$  – напруга шуму АЦП;  $U_{NORM}$ ,  $U_{ZAG}$  – невиключені випадкові похибки від завад нормального та завад загального виду відповідно.

Для дослідження оперативного методу визначення похибки головної ТП МПТ повинен імітувати зміни нею генерованої термо-е.р.с., викликані зміною профілю температурного поля вздовж її електродів. Для такої імітації МПТ повинен провести відповідну підготовку даних, тобто виконати наступну послідовність операцій [239, 241]:

1. Задати координати  $L_i$  кінців віртуальних ділянок, на які розбита головна ТП. Приймаємо, що координата  $L_i$  кінця кожної  $i$ -тої віртуальної ділянки рівна координаті початку наступної ділянки  $i+1$ .
2. Задати профіль температурного поля експлуатації головної ТП. При реалізації МПТ, враховуючи відсутність методичної похибки при визначенні похибки головної ТП (див. § 2.3), можна задати профіль температурного поля аналітично, у вигляді лінійної функції

$$T_{Li}^{EXPL} = \nabla_T \cdot L_i^{EXPL}, \quad (2.68)$$

де  $L_i^{EXPL}$  – поточна координата електродів головної ТП для профілю поля ВС (див. рис. 2.9, 2.17), тобто для  $l_3 < L_i^{EXPL} < l_4$ ;  $T_{Li}^{EXPL}$  – поточна температура для координати  $L_i^{EXPL}$  при експлуатації ТЕП з КПТП;  $\nabla_T$  – заданий градієнт температури для профілю зони ВС (див. рис. 2.9, 2.17), тобто для  $l_3 < L_i^{EXPL} < l_4$ . Для інших  $L$  градієнт відсутній,  $\nabla_T = 0$ .

3. Задати профіль температурного поля для визначення поточної похибки від дрейфу ФП головної ТП. Порівняно з п. 1 цей градієнт відрізняється лише координатами  $L$  для яких  $\nabla_T \neq 0$ , тобто  $l_1 < L_i^{POH} < l_2$ . Значення поточної температури під час визначення похибки головної ТП  $T_L^{POH}$  для координати  $L_i^{POH}$  обчислюємо згідно із (2.68).



4. Задати випадкові відхилення питомої термо-е.р.с. віртуальних ділянок  $\Delta e_i$ , на які розбита головна ТП, від номінальної – вони імітують її похибку, яку повинна визначити досліджувана система вимірювання температури. Випадкові відхилення питомої термо-е.р.с. віртуальних ділянок слід задавати так, щоби їх сума приблизно відповідала можливій похибці від дрейфу ФП головної ТП.
5. Обчислити температури кінців віртуальних ділянок, на які розбита головна ТП, у заданих профілях температурних полів експлуатації та визначення її максимальної похибки, що зводиться до підстановки заданих у п. 1 координат  $L_i$  кінців віртуальних ділянок у формулу (2.68). Для імітації неідеальності підсистем регулювання температури у ТЕП з КПТП необхідно задавати також відповідні їх похибки.

6. Обчислити номінальні термо-е.р.с.  $E_i^{NOM}$ , генеровані кожною ділянкою головної ТП у заданих профілях температурних полів. Через те, що нелінійність більшості ТП відносно невелика, а для ТП типу ХА не більша 1%, обчислювати номінальні термо-е.р.с. можна за формулою (2.24), при цьому використовують температури кінців віртуальних ділянок, на які розбита головна ТП, обчислені у попередньому пункті.

7. Обчислити похибки  $\Delta E_i$  кожної віртуальної ділянки головної ТП як добутки різниці температури їх кінців  $T_{i+1}$ ,  $T_i$  на задані відхилення питомої термо-е.р.с.  $\Delta e_i$  ділянок від номінальної за формулою

$$\Delta E_i = \Delta e_i \cdot (T_{i+1} - T_i) . \quad (2.69)$$

8. Обчислити дійсні термо-е.р.с.  $E_i$ , генеровані кожною ділянкою головної ТП у заданому профілі температурного поля експлуатації як суму їх номінальних термо-е.р.с.  $E_i^{NOM}$  та обчислених похибок  $\Delta E_i$

$$E_i = E_i^{NOM} + \Delta E_i . \quad (2.70)$$

9. Обчислити номінальні термо-е.р.с. головної ТП  $E_{TP}^{NOM}$  за номінальними

термо-е.р.с., генерованими кожною її ділянкою у заданих профілях температурних полів

$$E_{TP}^{NOM} = \sum_{i=1}^k E_i^{NOM} . \quad (2.71)$$

10. Обчислити дійсну термо-е.р.с. головної ТП  $E_{TP}$  у заданому профілі температурного поля експлуатації як суму термо-е.р.с. її ділянок  $E_i$

$$E_{TP} = \sum_{i=1}^k E_i . \quad (2.72)$$

11. Обчислити абсолютну похибку  $\Delta E_{TP}$  термо-е.р.с. головної ТП у профілі температурного поля експлуатації як суму похибок ділянок

$$\Delta E_{TP} = \sum_{i=1}^k \Delta E_i . \quad (2.73)$$

Узагальнена структурна схема спрощеного МПТ [239 - 241], який дає змогу тестувати ВК у режимі визначення похибки головної ТП, що входить у склад ТЕП з КПТП, подана на рис. 2.18.

У склад МПТ входять програмні блоки задання параметрів імітованого ТЕП з КПТП, блоків обчислення номінальних та дійсних температур кінців ділянок під час постійної експлуатації  $T_{Li}^{EXPL}$  та під час визначення похибки  $T_L^{POH}$  згідно із (2.68), блока обчислення відхилень питомої термо-е.р.с. від номінальної, блоків обчислення, згідно із (2.24), номінальних  $E_i^{NOM}$  та, згідно із (2.70), дійсних  $E_i$  термо-е.р.с. віртуальних ділянок, на які розбита головна ТП, блока обчислення, згідно із (2.69), абсолютних похибок  $\Delta E_i$  цих віртуальних ділянок, а також трьох накопичуючих суматорів. Накопичуючі суматори обчислюють, згідно з (2.71), сумарне значення номінальної термо-е.р.с.  $E_{TP}^{NOM}$ , яку генерує головна ТП у профілі АВ1С1D температурного поля визначення її похибки (див. рис. 2.9) та, згідно із (2.72), сумарного значення дійсної термо-е.р.с.  $E_{TP}$ , яку генерує головна ТП у профілі температурного поля експлуатації (профіль ABCD, див. рис. 2.9), а також, згідно із (2.73),

сумарної похибки  $\Delta E_{TP}$  термо-е.р.с. головної ТП у полі експлуатації.

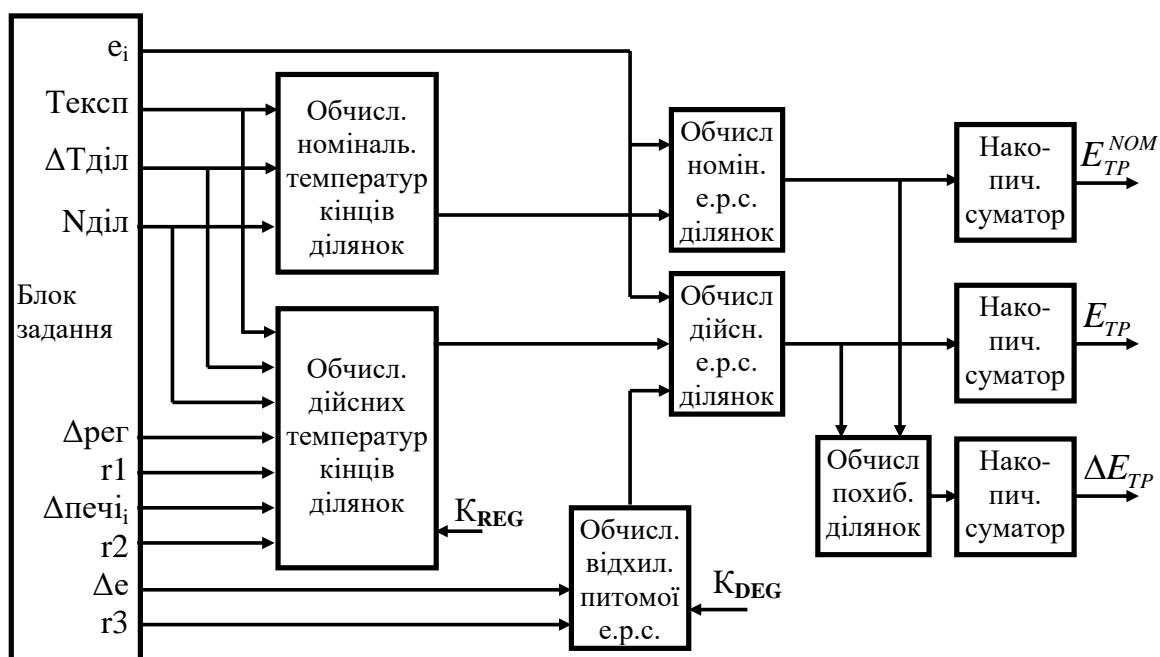


Рис. 2.18. Структурна схема спрощеного МПТ, який дає змогу тестувати ВК у режимі визначення похибки головної ТП

Розроблений МПТ передбачає дослідження залежностей невиключеної похибки визначення похибки головної ТП від похибок керування температурою вздовж її електродів (для цього введено коефіцієнт  $K_{REG}$ , що задає масштаб відхилення випадкової похибки регулювання  $\Delta e_i$  при обчисленні похибок температури ділянок) та від індивідуальної швидкості деградації ділянок електродів головної ТП (для цього введено коефіцієнт  $K_{DEG}$ , що задає масштаб відхилення питомої термо-е.р.с. віртуальних ділянок  $\Delta e_i$ , на які розбита головна ТП, від номінальної).

Структурна схема підключення системи вимірювання температури до МПТ подана на рис. 2.19. В неї входить МПТ, на виході якого генеруються номінальне значення термо-е.р.с.  $E_{TP}^{NOM}$  головної ТП, що входить у ТЕП з КПТП, дійсне (з врахуванням похибки) значення термо-е.р.с.  $E_{TP}$  головної ТП, та значення абсолютної похибки  $\Delta E_{TP}$  ФП головної ТП. Значення термо-е.р.с.

$E_{TP}^{NOM}$  та  $E_{TP}$ , що імітують генеровані головною ТП термо-е.р.с. у профілях температурних полів визначення похибки дрейфу ФП головної ТП та постійної експлуатації, поступають на систему вимірювання температури. У цій системі на значення термо-е.р.с.  $E_{TP}^{NOM}$  та  $E_{TP}$  накладаються випадкові похибки  $\Delta_{\Sigma}^{ZAV}$ . На основі значень термо-е.р.с.  $E_{TP}^{NOM}$  та  $E_{TP}$  система вимірювання температури повинна визначити похибку  $\Delta E_{TP}^{SYS}$  головної ТП. Блок аналізу похибок корекції обчислює відхилення визначеної системою похибки  $\Delta E_{TP}^{SYS}$  від заданого МПТ значення  $\Delta E_{TP}$ . Однією з причин цих відхилень будуть випадкові похибки  $\Delta_{\Sigma}^{ZAV}$  системи. Для дослідження їх впливу на невиключену похибку визначення похибки головної ТП введено коефіцієнт  $K_{ZAV}$ .

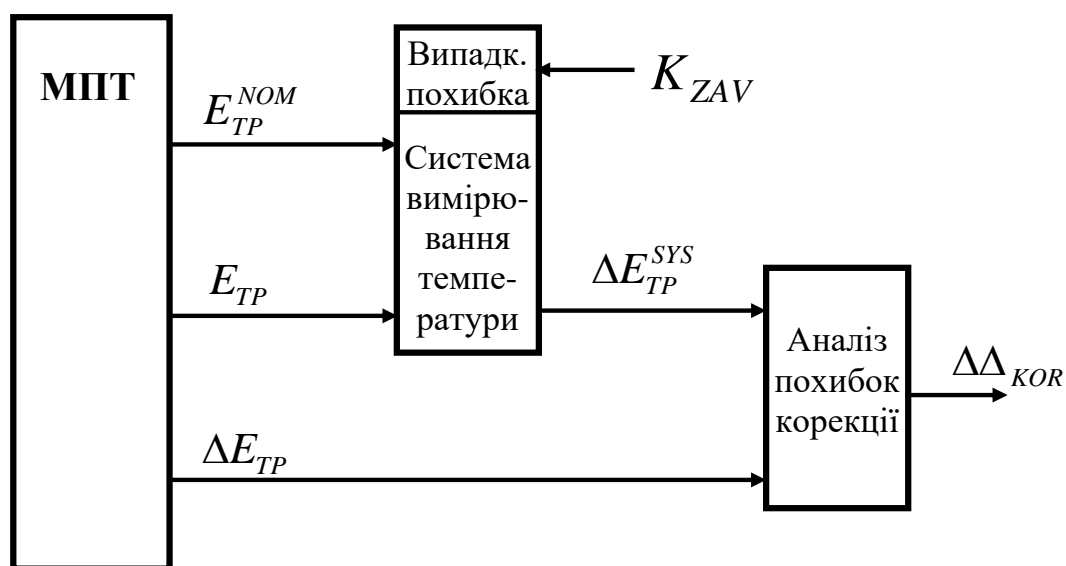


Рис. 2.19. Структурна схема підключення системи вимірювання температури до МПТ у режимі визначення похибки головної ТП

На рис. 2.20 поданий лістинг виконаного у табличному процесорі Excel спрощеного варіанту МПТ для тестування ВК при визначенні похибки головної ТП. Всі блоки МПТ, подані на рис. 2.18, на рис. 2.20 відзначено заливкою сірим відповідних комірок, зверху подано їх назви згідно із рис. 2.18 (лише накопичуючі суматори не виділені сірим для відділення від блоків

обчислення номінальних та дійсних термо-е.р.с. ділянок). Система також імітована та відповідно позначена. Результати 10 послідовних запусків МПТ згруповані справа у рамці. Всі обчислення проведені у мкВ та °С.

На рис. 2.21 подані результати дослідження впливу на невиключену похибку визначення похибки головної ТП похибок підсистем регулювання температури (коефіцієнт  $K_{REG}$ ) та індивідуальної швидкості деградації її електродів (коефіцієнт  $K_{DEG}$ ). Дослідження показали, що збільшення коефіцієнтів  $K_{REG}$  і  $K_{DEG}$  від 1 до 30 практично не змінює невиключену похибку визначення похибки головної ТП (див. рис. 2.21). Також дослідження показали, що основний вплив на цю невиключену похибку мають випадкові похибки ВК. Залежність невиключеної похибки визначення похибки головної ТП при зміні амплітуди випадкової похибки від 1 до 100 мкВ, подано на рис. 2.22. Як видно з рис. 2.22, невиключена похибка визначення похибки головної ТП пропорційно зростає при збільшенні амплітуди випадкової похибки ВК. Тому, при реалізації оперативного методу визначення похибки ТП, слід вжити всі можливості для зменшення випадкової похибки ВК.

Слід відзначити, що у випадкову похибку реального ВК, крім шумів його компонентів, входять залишкові завади нормального та загального виду. Ці складові випадкової похибки мають форму, яка визначається мережею живлення. Тому їх зменшення забезпечить метод дискретного усереднення [216] ряду результатів вимірювання, синхронізованих із частотою мережі живлення.

Блок задання		Обч.ном.Тділ		Обч.ном.ерс.діл		Вимір.система
Ei	40,000	800,000	600,000	200,000	8000,000	31999,751
Текст	800,000	600,000	400,000	200,000	8000,000	31817,826
Тділ	200,000	400,000	200,000	200,000	8000,000	-181,925
Нділ	4,000	200,000	0,000	200,000	8000,000	0,392
Крег	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
r1	0,604	0,000	0,000	0,000	0,000	
r2	0,246	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,728
r3	0,017	0,000	0,000	0,000	0,000	0,836
r4	0,280			Нак.сум1	32000,000	-0,680
r5	0,777					-0,452
r6	0,936					-0,069
		Обч.дійс.Тділ		Обч.дійс.ерс.діл		
r7	0,785	800,104	599,517	200,587	8044,326	0,249
r8	0,247	599,746	399,780	199,966	7947,871	0,137
r9	0,281	399,517	200,277	199,240	7873,407	-0,436
r10	0,896	199,780	0,436	199,344	7930,002	-0,038
r11	0,251	0,277	0,285	-0,008	-0,316	-0,382
Кдег	1,000	0,436	-0,253	0,689	27,862	
r12	0,644	0,285	-0,219	0,504	20,300	
Квип	1,000	-0,253	0,396	-0,648	-25,769	
				Нак.сум2	31817,683	
		Обч.відх.ерс.діл		Обч.пох.діл		
		0,104	40,104		44,326	
		-0,254	39,746		-52,129	
		-0,483	39,517		-126,593	
		-0,220	39,780		-69,998	
		0,277	40,277		-0,316	
		0,436	40,436		27,862	
		0,285	40,285		20,300	
		-0,253	39,747		-25,769	
				Нак.сум3	-182,317	

Рис. 2.20. Лістинг спрощеного варіанту МПТ, який дає змогу дослідити ВК у режимі визначення похибки головної ТП

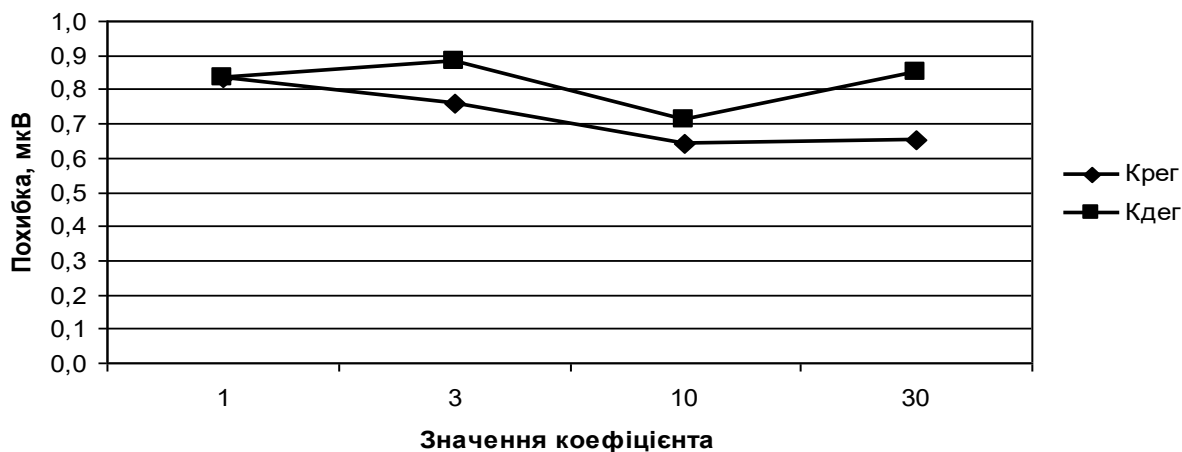


Рис. 2.21. Залежність невиключеної похибки визначення похибки головної ТП від похибки регулювання та швидкості деградації електродів головної ТП

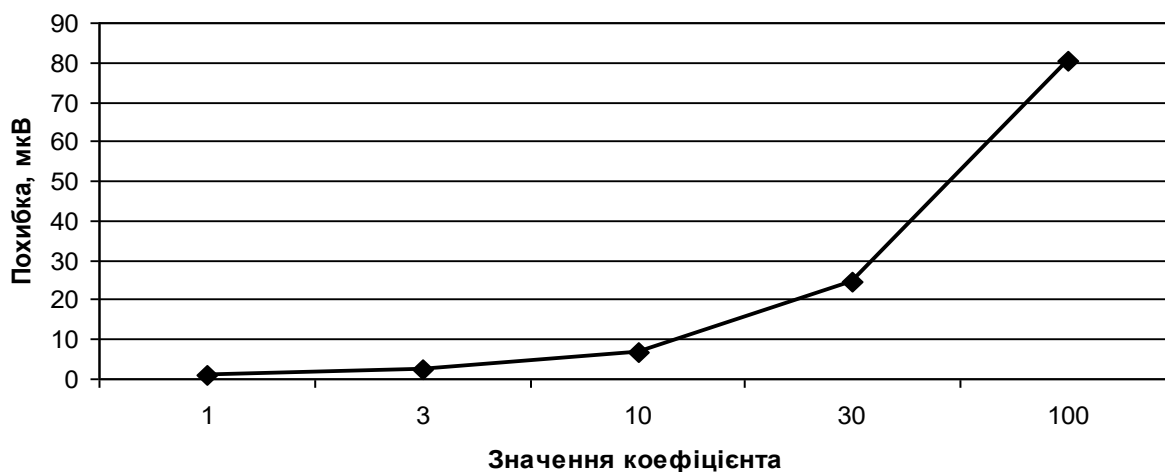


Рис. 2.22. Залежність невиключеної похибки визначення похибки головної ТП від амплітуди випадкової похибки ВК для одиничних вимірювань термо-е.р.с. головної ТП

У розробленому варіанті МПТ (див. рис. 2.19) передбачено формування залишкових похибок від завод нормального та загального виду як значень синусоїди, які мають відповідний фазовий зсув.

Залежність невиключеної похибки визначення похибки головної ТП від амплітуди завади при дискретному усередненні результатів двох і чотирьох вимірювань термо-е.р.с.  $E_{TP}^{NOM}$  та  $E_{TP}$ , при зсуві синхронізації початку вимірювання на 0,5 та 0,25 періоду мережі живлення відповідно, подано на рис. 2.23 [240]. Як видно з рис. 2.23, невиключена похибка визначення похибки

головної ТП суттєво менша за невиключену похибку, подану на рис. 2.22, при аналогічних амплітудах завад. Це показує ефективність методу дискретного усереднення. У даному випадку з результатів дослідження видно, що висока завадостійкість системи вимірювання температури (тобто великі значення коефіцієнтів зменшення завад як нормального, так і загального виду) є необхідною (хоча і не достатньою) умовою високої точності вимірювання температури.

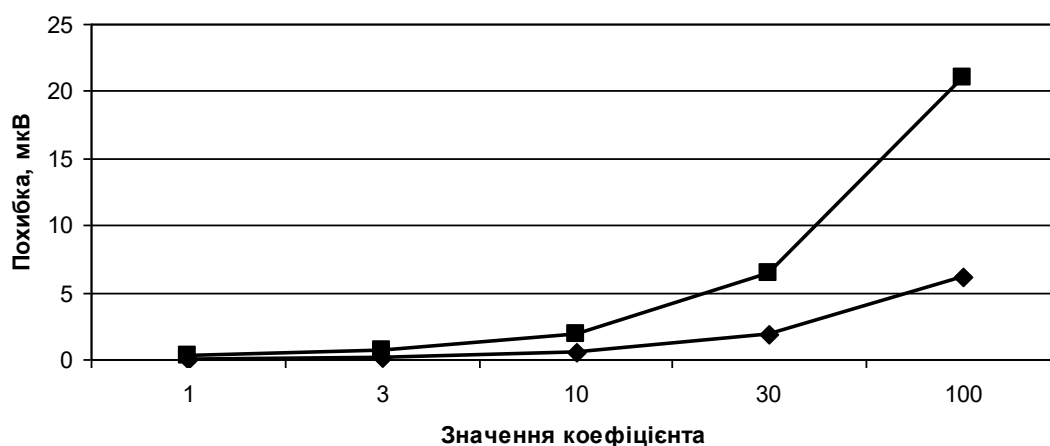


Рис. 2.23. Залежність невиключеної похибки визначення похибки головної ТП від амплітуди завади при використанні дискретного усереднення результатів двох та чотирьох результатів вимірювань термо-е.р.с. ТП

Слід зауважити, що отримані значення похибок визначення похибки головної ТП при дослідженні за допомогою спрощеного МПТ будуть значно заниженими. Адже, згідно із § 2.4, у невиключену похибку корекції похибки від дрейфу ФП головної ТП входять похибки її первинного визначення похибки, від дрейфу ФП "опорної ділянки" головної ТП, що короткочасно знаходиться при підвищеній температурі, від зміни температури з'льоту та інші. Але це систематичні похибки, на результати цього дослідження вони не впливають. При тестуванні за допомогою спрощеного МПТ можна оцінити: а) правильність функціонування підсистеми визначення та корекції похибок системи вимірювання температури; б) вплив коефіцієнтів  $K_{REG}$ ,  $K_{DEG}$  та  $K_{ZAV}$  на невиключену похибку корекції похибки від дрейфу ФП ТП.



Як видно із проведених у даному розділі досліджень, розроблений оперативний метод визначення похибки головної ТП, що входить у ТЕП з КППТ, забезпечує виконання всіх основних вимог, поставлених до нього у §§ 1.4 і 2.1. Він забезпечує єдність вимірювань за рахунок прослідковуваності (значення Кельвіна передається від еталонних засобів до "опорної ділянки" ТП при первинному визначенні похибки, а потім, у процесі експлуатації, електродам ТП) та хорошій відтворюваності ("опорна ділянка" лише малий час знаходиться при високій температурі, тому зміна її ФП, як було оцінено у § 2.4, не перевищує  $0,04^{\circ}\text{C}$ ). Метод забезпечує високу точність – як було показано у §§ 2.3 і 2.4, він не має методичної похибки та забезпечує малу інструментальну похибку. Метод забезпечує високу метрологічну надійність через можливість частого визначення поточної похибки ТП – для цього достатньо вибрати час, коли температура зльоту слабо змінюється на протязі  $\approx 0,5$  години. Метод забезпечує також високу метрологічну автономність – для визначення поточної похибки ТП не потрібні еталонні засоби. Його реалізація не вимагає великого обсягу додаткового обладнання, зупинки технологічного обладнання та вилучення ТП тощо, тому метод має високу ефективність. Тому властивості оперативного методу визначення похибки головної ТП, що входить у ТЕП з КППТ, дають можливість стверджувати [242, 243], що він повністю відповідає меті дисертаційної роботи та у значній мірі вирішує відзначену у дорожніх картах [55, 56] проблему забезпечення точності вимірювання температури за допомогою ТЕП.

У даному параграфі приведено результати дослідження невиключених похибок оперативного методу визначення похибки головної ТП, що входить у ТЕП з КППТ, від похибки регулювання, швидкості деградації та амплітуди випадкової похибки системи вимірювання температури. Показано, що забезпечення високої точності оперативного методу визначення похибки головної ТП, який входить у склад ТЕП з КППТ, вимагає максимального зменшення рівня випадкової похибки ВК.

## 2.6 Висновки до другого розділу

1. Розроблено концепцію забезпечення високої точності вимірювання температури за допомогою ТЕП при одночасному підвищенні суперечливих показників точності, метрологічної надійності та автономності, а також ефективності. Показано, що таке підвищення можливе при умові створення методу періодичного оперативного визначення поточної похибки ТП.
2. Аналіз умов експлуатації ТП дав змогу виділити її ділянку, яка не деградує під час експлуатації, що дало змогу намітити шлях створення потрібного методу.
3. Дослідження поведінки неоднорідних ТП у різних профілях температурного поля показало, що властивості основних похибок ТП (від дрейфу ФП ТП та від набутої термоелектричної неоднорідності) дають змогу визначити поточну похибку ТП за рахунок цілеспрямованої зміни профілю температурного поля вздовж її електродів, тобто створити оперативний метод визначення похибки ТП, потреба у якому була раніше обґрунтована.
4. Створений оперативний метод визначення похибки головної ТП, що входить у ТЕП з КПТП проводиться на місці його встановлення (не вимагає демонтажу ТЕП з КПТП) та у процесі його експлуатації, вимагає лише первинного визначення похибки цієї головної ТП за допомогою еталонного засобу, але при періодичному визначенні похибки на місці експлуатації еталонні засоби йому не потрібні.
5. Імітаційні дослідження методу визначення похибки ТП шляхом цілеспрямованого переміщення профілю температурного поля вздовж її електродів, показали, що такий метод не має методичної похибки, а тому є перспективним для створення оперативного методу визначення похибки ТП, потреба у якому була раніше обґрунтована.
6. Оцінка похибки визначення поточного значення похибки головної ТП, що

входить у ТЕП з КПТП, за допомогою створеного оперативного методу визначення її похибки, при умові тимчасової малої зміни температури її злиоту, дає змогу проводити корекцію дрейфу її ФП (безпосередньо або шляхом побудови індивідуальної математичної моделі дрейфу ФП ТП) і, тим самим, забезпечити високу точність вимірювання температури неоднорідними ТП.

7. Дослідження невиключених похибок оперативного методу визначення похибки головної ТП, що входить у ТЕП з КПТП, від похибки регулювання, швидкості деградації та амплітуди випадкової похибки системи вимірювання температури показали, що забезпечення високої точності створеного методу вимагає лише максимального зменшення рівня випадкової похибки ВК.

### Розділ 3. ОПЕРАТИВНІ МЕТОДИ ДІАГНОСТУВАННЯ СТАНУ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

#### 3.1 Оперативний метод діагностування стану електродів термопар на базі ефекту Пельтьє

Оперативний метод визначення поточної похибки ТП, досліджений у другому розділі, дає змогу продовжити строк її служби при високій точності вимірювання температури. Однак продовження строку служби ТП веде до зменшення її функціональної надійності. Адже корекція похибки ТП не зменшує деградації електродів ТП, які при цьому фізично руйнуються.

Як показано у [188, 244, 245] та § 2.2, дві домінуючі похибки ТП – від дрейфу ФП ТП  $\Delta E^{DR}$  та від набутої термоелектричної неоднорідності електродів  $\Delta E^{NEOD}$  є різними проявами процесу деградації її електродів. Тому мірою ступеня деградації електродів ТП може бути одна з цих похибок. Але їх поточні значення та їх зміни протягом експлуатації, зазвичай, невідомі. Крім того, як видно з поданої у § 2.4 методики реалізації розробленого оперативного методу визначення похибки ТП, ці похибки характеризують ТП у цілому. Вони ніяк не можуть характеризувати стан ділянок електродів ТП. Тобто похибки від дрейфу ФП ТП та від набутої термоелектричної неоднорідності можна визначити розробленим у § 2.4 оперативним методом, але це не дає змоги визначити загальну картину процесу деградації її електродів.

Слід теж зауважити, що не лише ТП мають індивідуальні особливості, які впливають на деградацію її електродів. Індивідуальні особливості мають також ділянки цієї ТП. Це викликано як станом самих електродів ТП, так і домішками, що нерівномірно впливають на швидкість деградації. Тому, для підвищення точності прогнозу похибки, уже в [185] було запропоновано коригувати моделі похибки ділянок ТП за результатами калібрування ТП, а у [122, 131] запропоновано коректний критерій розподілу похибки ТП у цілому між її окремими віртуальними ділянками. Тоді моделі похибок ділянок, на які розбита ТП, стають індивідуальними. Тому для діагностування стану

електродів ТП треба знати поточні похибки дрейфу ФП та набутої термоелектричної неоднорідності для кожної ділянки.

Як було показано у [122], розподілити похибку ТП між її ділянками можна за результатами вимірювання термо-е.р.с. ТП у достатньо великій кількості профілів температурного поля вздовж її електродів. Але розроблений у [122, 246, 247] метод передбачає визначення похибок кожної ділянки за результатами калібрування у лабораторних умовах.

Для зміни профілю температурного поля вздовж електродів ТП можна використати розроблений у [130] метод на основі ефекту Пельтьє. Конструктивно цей метод найпростіший. Але у § 2.1, на основі оцінки його інструментальної похибки, зроблено висновок про його непридатність для визначення поточної похибки ТП. Однак для діагностування стану електродів ТП інструментальна похибка може бути більшою. Тому, для оцінки придатності методу на основі ефекту Пельтьє для діагностування електродів ТП, розглянемо методичні похибки цього методу.

Перший вид методичної похибки виникає через те, що, крім теплоти Пельтьє (яка виділяється у з'єднанні ТП), у електродах ТП виділяється ще і теплота Джоуля (яка у [128] взагалі не згадана). Теплоту Джоуля можна оцінити за методикою [232, 248, 249], яка дає можливість розрахувати температуру поверхні циліндра, покритого теплоізоляцією, за потужністю, яка виділяється у цьому циліндрі. Прийmemo, що армовані керамічними бусами електроди ТП замінюються безконечним циліндром, який має зовнішній діаметр  $d_1$  та площу бокової поверхні циліндра  $F$  на одиницю його довжини  $l$ . Внутрішній діаметр циліндра  $d_2$  рівний еквівалентному діаметру двох електродів ТП. Прийmemo, що під дією струму через електроди у циліндрі виділяється потужність  $P_{JOULE}$ , яка нагріває його поверхню до температури  $t_2$ . Також прийmemo, що циліндр має сталі температури внутрішньої  $t_1$  (температура, яку створює струм через електроди ТП) та зовнішньої  $t_2$  (температура оточуючого середовища) стінок. Тоді, згідно із [229, 236], можна

записати

$$Q = -F\lambda \frac{dt}{dr} = -2\pi r l \lambda \frac{dt}{dr}, \quad (3.1)$$

де  $Q$  – тепловий потік через бокову поверхню циліндра;  $r$  – радіус циліндра;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу циліндра.

Температури  $t_1$ ,  $t_2$  та діаметри  $d_1$ ,  $d_2$  пов'язані співвідношенням

$$t_1 - t_2 = \Delta t, \quad d_1 - d_2 = 2h, \quad (3.2)$$

де  $\Delta t$  – максимальний перепад температури у керамічних бусах.

Згідно із [229, 236, 254], рішенням диференціального рівняння (3.1) буде залежність погонного теплового потоку через зовнішню стінку циліндра (відношення  $Q$  до  $l$ ), яку можна визначити як

$$\frac{Q}{l} = \frac{\pi(t_1 - t_2)}{\frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_1}{d_2}} = \frac{2\pi\lambda\Delta t}{\ln \frac{d_1}{d_2}}, \quad (3.3)$$

де  $\lambda = 1,4 \text{ W/m} \cdot \text{K}$  – коефіцієнт теплопровідності кераміки бус.

Відношення  $Q$  до  $l$  у свою чергу можна визначити через погонну потужність,  $P_{\text{JOULE}}$ , що виділяє струм  $I$ , який пропускають через електроди ТП (через те, що струм проходить через два електроди, беремо сумарний струм). У [130] подано результати експериментальних досліджень методу визначення похибки ТП типу ХА на основі ефекту Пельтьє для електродів діаметром  $d_{EL} = 0,25 \text{ mm}$  (таблиця 4, перший експеримент), тобто еквівалентний внутрішній діаметр циліндра  $d_2 = \sqrt{2}d_{EL} \approx 0,35 \text{ mm}$ . Згідно із [130] для створення ефекту Пельтьє через електроди протікав струм  $I = 0,2 \text{ A}$ . Сумарний опір електродів хромель та алюмель  $R_{\Sigma}$  можна розрахувати за формулою [255]

$$R_{\Sigma} = \rho_X \frac{l_X}{S_X} + \rho_A \frac{l_A}{S_A} \approx 20,4 \text{ Ohm}, \quad (3.4)$$

де  $\rho_X$ ,  $\rho_A$  – питомий опір хромелю та алюмелю відповідно,

$\rho_X = 0,6$ ;  $\rho_A = 0,4 \text{ Ohm} \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$ ;  $l_X = l_A = 1 \text{ m}$  – довжина електродів;  
 $S_X = S_A \approx 0,05 \text{ mm}^2$  – площа перерізу електродів.

Таким чином, погонну потужність,  $P_{\text{JOULE}}$ , що виділяє струм  $I = 0,2 \text{ A}$ , буде становити [232]

$$P_{\text{JOULE}} = \frac{Q}{l} = I^2 \cdot R_{\Sigma} \approx 0,8 \text{ W / m} \quad . \quad (3.5)$$

Підставивши (3.5), константи та параметри конструкції сенсора у (3.3), отримаємо

$$\Delta t = \frac{P_{\text{JOULE}} \cdot \ln \frac{d_1}{d_2}}{2\pi\lambda} \approx 0,26^\circ\text{C} \quad , \quad (3.6)$$

що відповідає методичній похибці від теплоти Джоуля. Таке значення методичної похибки, викликане спотворенням розподілу температури за рахунок впливу тепла Джоуля, доволі мале, ним цілком можна нехтувати.

Однак методу діагностування стану електродів ТП на базі ефекту Пельтьє притаманна також інша методична похибка. У даному випадку вона виникає через те, що дійсне значення питомої термо-е.р.с. ТП, згідно із ефектом Пельтьє, визначається у строго визначеному місці – у зоні зльоту. А термо-е.р.с. ТП при експлуатації генерують ділянки, що знаходяться у зоні градієнту профілю температурного поля об'єкта вимірювання температури. При цьому, для зменшення похибки вимірювання температури, рекомендовано (зокрема, у [137]) глибину занурення ТП у середовище, температуру якого вимірюють, вибирати якнайбільшою. Бо мала глибина занурення сенсора приводить до зміни температури чутливого елемента через дію теплових потоків вздовж сенсора.

Для оцінки методичної похибки через зону визначення похибки ТП дослідимо зміну профілю температурного поля, викликану дією ефекту Пельтьє. При цьому використаємо результати експериментальних досліджень отримані у [130]. Для визначення зміни профілю температурного поля

використаємо методику, яка була використана у [248, 249] для оцінки методичної похибки, яка виникає у аналогічних умовах. Припустимо, що до проходження струму через зліот градієнт температури у його зоні рівний нулю, тобто температура вздовж електродів ТП стала. При ввімкненні струму настає перехідний процес. Теоретично такий перехідний процес нескінченний, але можна визначити границю, до якої він прямує. Перехідні процеси при нагріві та охолодженні твердих тіл можна описати використовуючи закон Ньютона [248 - 250]. Для цього складаємо рівняння теплового балансу для зліоту ТП. Елементарна кількість теплоти  $q$ , що виділяється при дії ефекту Пельтьє, за час  $dt$ , витрачається на нагрівання металу на температуру  $dT$  і на розсіяння тепла в просторі з температурою  $T_s$ . Диференціальне рівняння для усталеного режиму прогріву електродів ТП до температури  $T$  як функції часу  $t$  буде мати вид

$$qdt = cV\rho dT + \alpha S(T - T_s)dt, \quad (3.7)$$

де  $q$  – тепловий потік, викликаний різницею температур між зліотом ТП та її електродами;  $c$  – теплоємність електродів ТП;  $V$  – об'єм матеріалу електродів ТП;  $S$  – площа зовнішньої поверхні, що охолоджується, тобто електродів ТП;  $\alpha$  – коефіцієнт теплопередачі електрод-керамічна буса;  $\rho$  – густина матеріалу електродів ТП.

В свою чергу тепловий потік  $q$  можна розрахувати за формулою [232]:

$$q = \frac{\lambda \Delta T S_N}{L_1}, \quad (3.8)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу електродів ТП;  $\Delta T$  – різниця температур між зліотом ТП та її електродами;  $S_N$  – площа поверхні, через яку передається тепловий потік;  $L_1$  – відстань від зліоту ТП та поточної координати її електрода.

Розв'язок диференціального рівняння (3.7) відносно часу  $t$  буде мати вид



$$T = T_S + \frac{q}{\alpha S} (1 - e^{-\frac{\alpha S}{cV\rho} t}) . \quad (3.9)$$

Якщо спрямувати час  $t$  до нескінченності, то член  $e^{-\frac{\alpha S}{cV\rho} t}$  буде прямувати до нуля. Таким чином, після закінчення перехідного процесу різниця температур  $\Delta T_{\text{lim}}$  для кожного значення  $L_1$  буде асимптотично прямувати до своєї границі

$$\Delta T_{\text{lim}} = \lim_{t \rightarrow \infty} \left( \frac{q}{\alpha S} (1 - e^{-\frac{\alpha S}{cV\rho} t}) \right) = \frac{q}{\alpha S} . \quad (3.10)$$

Підставивши (3.8) у (3.10) та перетворивши, отримаємо

$$\Delta T_{\text{lim}} = \frac{\lambda \cdot \Delta T \cdot S_N}{L_1 \cdot \alpha \cdot S} . \quad (3.11)$$

У [130] подано результати експериментальних досліджень методу визначення похибки ТП типу ХА на основі ефекту Пельтьє для електродів діаметром  $d_{EL} = 0,25 \text{ mm}$  (таблиця 4, перший експеримент). При цьому отримано  $\Delta T \approx 12,5^\circ\text{C}$ . Підставивши це значення та інші параметри [251] у (3.11) для значень  $L_1$  у межах від нуля до 0,1 м, отримаємо розподіл температурного поля вздовж електродів ТП. Такий розподіл подано на рис. 3.1. Як видно з рис. 3.1, зміна температури злюту ТП, викликана дією теплоти Пельтьє дуже швидко зменшується. Вже на відстані 5 см від злюту ця зміна значно менша за  $1^\circ\text{C}$ .

Зміна температури злюту ТП через теплоту Пельтьє, накладена на профіль температурного поля типового об'єкта вимірювання, показана на рис. 3.2. Як видно з рис. 3.2, при дії ефекту Пельтьє зміни профілю температурного поля виникають лише у невеликій околиці злюту – на відстані не більше 10 см від нього (ділянки від 90 до 100 см від вільних кінців ТП). А основну термо-е.р.с., згідно із (2.23), генерують ділянки, які знаходяться у зоні профілю температурного поля об'єкта вимірювання температури, тобто у зоні від 56 до 81 см від вільних кінців ТП 9 (див. рис 3.2).

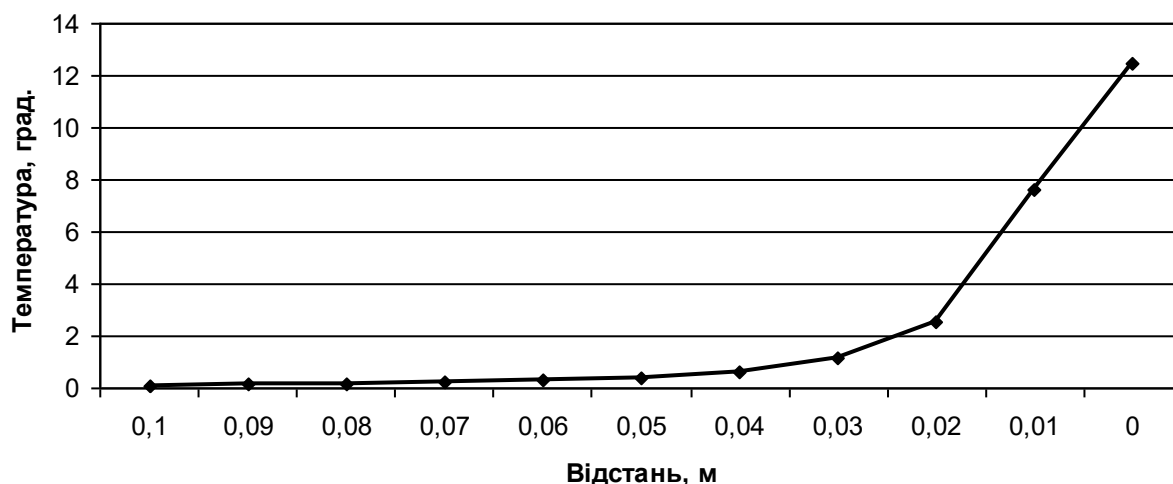


Рис. 3.1. Графік розподілу температурного поля вздовж електродів ТП при реалізації ефекту Пельтьє

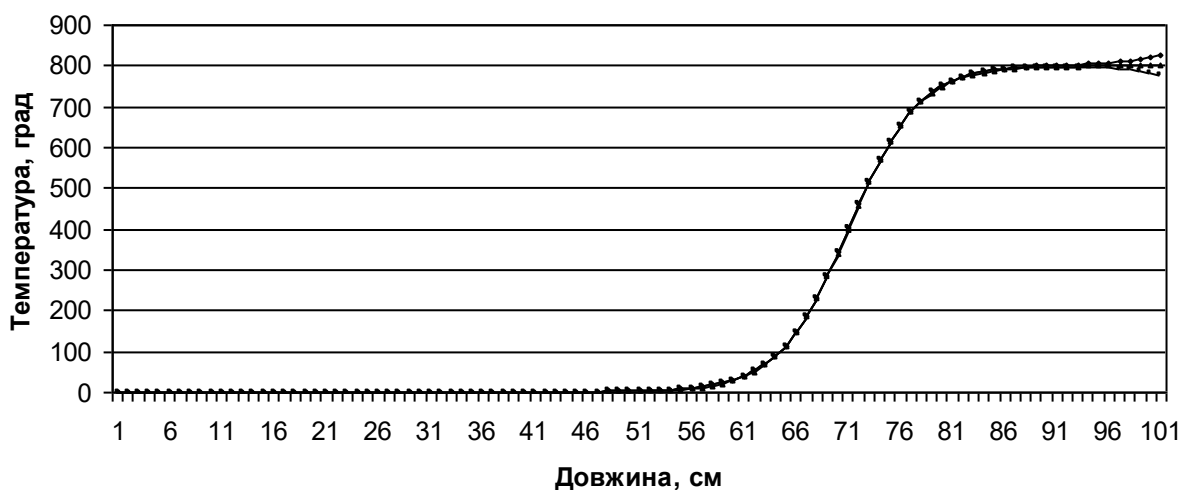


Рис. 3.2. Графіки змін температури з'єднання ТП, викликана дією теплоти Пельтьє, накладена на профіль температурного поля об'єкта вимірювання

Це означає, що метод на базі ефекту Пельтьє визначає максимальну зміну питомої термо-е.р.с. ТП у зоні дії найвищих температур експлуатації. Під час експлуатації ці ділянки практично не генерують термо-е.р.с. А поточну дійсну термо-е.р.с. ТП (а значить і її похибку) формують інші ділянки ТП. При цьому деякі із тих ділянок (ділянки від 76 до 81 см, див. рис. 3.2), що формують дійсну поточну термо-е.р.с. ТП, експлуатуються при температурі, що практично відповідає температурі з'єднання. Для цих ділянок невідповідність похибки, визначеної за ефектом Пельтьє, та дійсної похибки визначається

лише індивідуальними особливостями деградації ділянок ТП [252, 253]. Але генерована цими ділянками термо-е.р.с., згідно із (2.23), складає невелику частину сумарної термо-е.р.с. ТП. А основний вклад у термо-е.р.с. ТП під час експлуатації, згідно із (2.23), вносять інші ділянки – від 56 до 76 см. Відповідно саме ці ділянки вносять основний вклад у похибку термо-е.р.с. ТП. А ділянки від 56 до 76 см експлуатуються при значно нижчих температурах. Через те, що, згідно із [34, 141, 142], дрейф ФП ТП приблизно пропорційний температурі експлуатації, можна зробити висновок, що дійсна похибка ТП у профілі температурного поля об'єкта вимірювання температури буде нижчою за похибку, отриману шляхом визначення зміни питомої термо-е.р.с. за допомогою ефекту Пельтьє. Цей висновок відповідає [122], де, для узгодження моделі похибки, отриманої шляхом апроксимації результатів експериментальних досліджень [187, 252, 253], та розрахунків похибки від набутої неоднорідності (де потрібні були саме максимальні значення дрейфу ФП ТП) прийшлося вводити спеціальні коефіцієнти.

Таким чином, у даному параграфі, шляхом аналізу теплових процесів, проведено аналітичну оцінку методичної похибки, викликаной впливом тепла Джоуля та визначено вплив тепла Пельтьє на розподіл температури вздовж електродів ТП. Проведені дослідження дали змогу визначити умови, за яких доцільно використовувати оперативний метод діагностування стану електродів ТП на базі ефекту Пельтьє.

### **3.2 Теоретичні основи оперативного методу діагностування стану електродів термопар**

Як було показано у [122], розподілити похибку ТП між її ділянками можна за результатами вимірювання термо-е.р.с. ТП у достатньо великій кількості профілів температурного поля вздовж її електродів створених спеціалізованим лабораторним стендом. Але цей метод вимагає вилучення ТП та дослідження його у лабораторії. Як було показано у попередньому параграфі зміни профілю температурного поля за допомогою ефекту Пельтьє

щільно прилягають до зльоту – вони не діють у зоні градієнту. А саме ця зона найбільше вимагає діагностування.

Створений у попередньому розділі оперативний метод визначення поточної похибки ТП також вимагає зміни профілю температурного поля вздовж електродів ТП. Для його реалізації достатня одноразова "максимальна зміна" профілю температурного поля – перехід від профілю експлуатації ABCD (див. рис. 2.9) до профілю визначення похибки AB1C1D. Але ТЕП з КПТП дає можливість створювати різні профілі температурного поля. Тому, шляхом формування за допомогою ТЕП з КПТП достатньо повного набору профілів температурного поля, можна визначити поточні значення похибок від дрейфу ФП ТП  $\Delta E^{DR}$  та від набутої термоелектричної неоднорідності  $\Delta E^{NEOD}$  кожної ділянки головної ТП, що входить у склад ТЕП з КПТП і безпосередньо вимірює температуру об'єкта, тобто провести діагностування її електродів [254-256].

Зміни профілю температурного поля в зоні АВ (див. рис. 2.9), де градієнт температурного поля і генерована термо-е.р.с. близькі до нуля, не доцільні – ці ділянки генерують малу термо-е.р.с. Тому, для визначення похибки кожної ділянки, тобто діагностування стану електродів ТП, треба змінювати заданим чином профіль температурного поля вздовж електродів ТП у зоні ВС (див. рис. 2.9), яка генерує основну термо-е.р.с. ТП. При цьому траєкторії зміни координат ділянок ТП при змінах профілю температурного поля вздовж її електродів будуть відповідати рис. 3.3 [217, 223]. При зміні профілю температурного поля згідно з траєкторіями, показаними на рис. 3.3, похибки ділянок електродів ТП змінюються аналогічно, як і на рис. 2.9. Детальніше зміни профілю температурного поля ділянок при розробленому методі діагностування стану електродів ТП показано на рис. 3.4 [217, 223].

Слід відзначити, що профіль температурного поля слід змінювати, коли температура зльоту та вільних кінців залишається постійною, що можна визначити за результатами виміру температури об'єкта іншими сенсорами,

сталістю умов експлуатації, споживаної або генерованої потужності тощо.

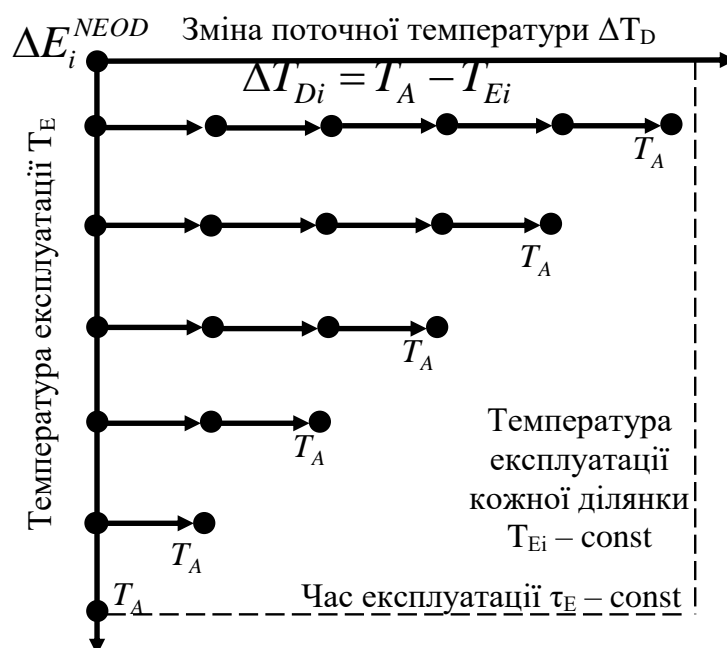


Рис. 3.3. Траєкторії зміни координат похибки ділянок ТП при змінах профілю температурного поля вздовж її електродів під час діагностування їх стану

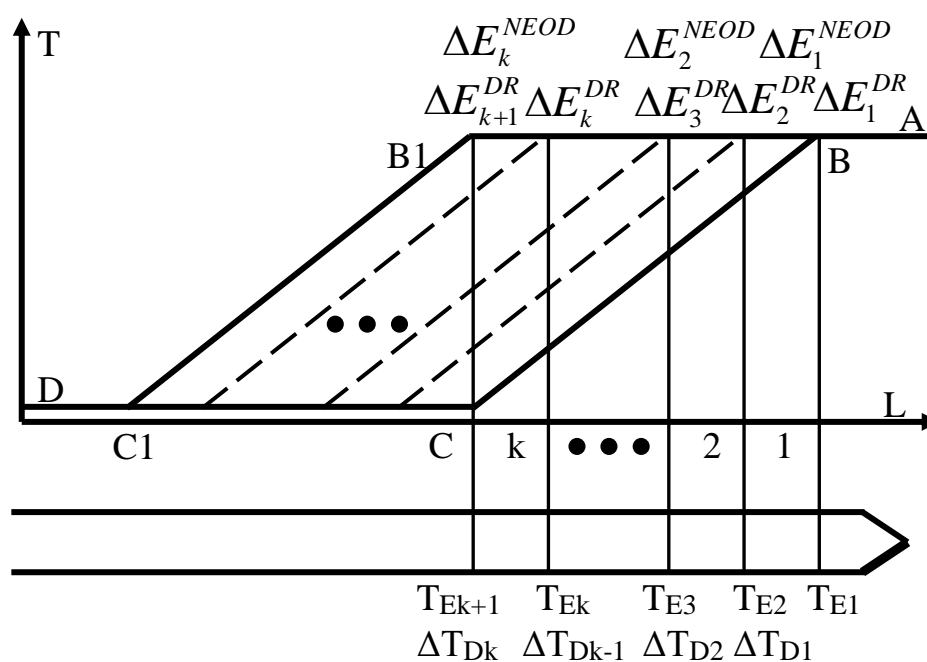


Рис. 3.4. Профілі температурного поля при діагностуванні електродів ТП

На рис. 3.4 позначено температури експлуатації окремих ділянок  $T_{E1}$ ,  $T_{E2}$ , ...  $T_{Ek+1}$  та похибки дрейфу ФП цих ділянок  $\Delta E_1^{DR}$ ,  $\Delta E_2^{DR}$ , ...  $\Delta E_{k+1}^{DR}$  (що їм відповідають). Для спрощення зміни профілю температурного поля

$\Delta T_{Di}$  на рис. 3.4 чітко відповідають ділянкам, на які розбито ТП. Там же, нижче за температури експлуатації окремих ділянок  $T_{E1}, T_{E2}, \dots, T_{Ek+1}$  показано зміни поточної температури  $\Delta T_{D1}, \Delta T_{D2}, \dots, \Delta T_{Dk}$ , куди потраплять ділянки після змін профілю температурного поля. При цьому прийнято, що

$$T_{E1} - T_{E2} = \Delta T_{D1}, T_{E2} - T_{E3} = \Delta T_{D2}, \dots, T_{Ek} - T_{Ek+1} = \Delta T_{Dk}. \quad (3.12)$$

Зверху показані також відповідні похибки від набутої термоелектричної неоднорідності  $\Delta E_1^{NEOD}, \Delta E_2^{NEOD}, \dots, \Delta E_k^{NEOD}$  окремих ділянок. Кожна з похибок від набутої неоднорідності відповідає своїй зміні поточної температури  $\Delta T_{D1}, \Delta T_{D2}, \dots, \Delta T_{Dk}$  відповідно до (3.12).

Графіки залежності значення похибки ділянок ТП, що входять у склад ТЕП з КПТП, показано на рис. 3.5. Як видно з рис. 3.5, аналогічно до методу визначення похибки, кожній зміні профілю температурного поля на значення  $\Delta T_{Di}$ , згідно з (2.46), відповідають свої співвідношення похибки від дрейфу ФП ТП  $\Delta E_i^{DR}$  і від набутої термоелектричної неоднорідності  $\Delta E_i^{NEOD}$ .

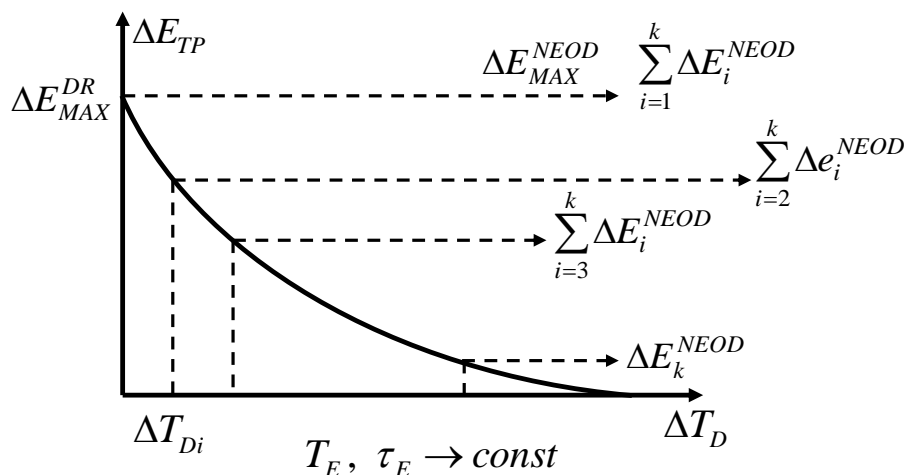


Рис. 3.5. Графіки залежності значення похибки ділянок ТП під час діагностування стану її електродів

У розглянутому випадку профілі температурного поля  $\Delta T_{Di}$  чітко відповідають ділянкам, на які розбито ТП. Тому кожна наступна зміна профілю температурного поля  $\Delta T_{Di}$  виводить одну з ділянок у зону

рівномірного профілю температурного поля  $ABi$  (див. рис. 2.10 і 3.4). Така ділянка перестає, згідно з (2.23) [1, 6], генерувати термо-е.р.с., тому її похибка зникає – вона перестає входити у вимірювану сумарну зміну термо-е.р.с. ТП. Це показано на рис. 3.5 як зміну індексу суми – при початковому профілі температурного поля ТЕП з КПТП (профілі експлуатації) у результат вимірювання входять похибки всіх ділянок, на які розбита зона ВС (див. рис. 2.10) головної ТП, тобто  $i = \overline{1, k}$ . Після першої зміни профілю температурного поля (див. рис. 3.4) перша ділянка потрапляє у зону рівномірного профілю температурного поля, тобто у температуру, що відповідає зоні  $ABi$  (див. також рис. 2.10). Ця ділянка ТП, згідно з (2.23) перестає генерувати термо-е.р.с., тому індекси наступної суми її не враховують, тобто  $i = \overline{2, k}$ . При наступних змінах профілю температурного поля наступні ділянки перестають генерувати термо-е.р.с., що враховують індекси наступних сум. В кінці залишається похибка останньої,  $k$  – тої ділянки. Подальше ”пересування” градієнта температурного поля вліво втрачає зміст – у зону градієнту потрапляють лише ділянки, які експлуатувалися при температурі вільних кінців, тобто не деградували. Тобто тоді ситуація відповідає профілю температурного поля  $AB1C1D$  (див. рис. 2.10), при якій визначають сумарну похибку ТП згідно із створеним у другому розділі оперативним методом.

Як видно з рис. 3.4 і 3.5, виміряна термо-е.р.с. ТП містить похибки всіх ділянок одночасно. Тоді сумарну термо-е.р.с.  $E_{\Sigma}^{PROF1}$  для першого (крайнього правого) профілю температурного поля можна визначити як

$$E_{\Sigma}^{PROF1} = \sum_{i=1}^k E_i^{PROF1} , \quad (3.13)$$

де  $E_i^{PROF1}$  – термо-е.р.с. окремих ділянок ТП від першої (крайньої правої) до останньої (крайньої лівої), що входять у зону градієнту профілю температурного поля ТП.

При цьому термо-е.р.с. кожної ділянки у деякому профілі температурного поля можна визначити як

$$E_i^{PROF} = (e_i + \Delta e_i) \cdot (T_{Ei} - T_{Di}) = (e_i + \Delta e_i) \cdot (T_{Ei} - T_{Ei+1}) = e_i \cdot (T_{Ei} - T_{Ei+1}) + \Delta e_i \cdot (T_{Ei} - T_{Ei+1}) = E_i^{NOM} + \Delta E_i^{NEOD}, \quad (3.14)$$

Як було вказано, при переміщенні профілю температурного поля від профілю ABCD до профілю AB1C1D (див. рис. 3.4), ділянки ТП, які у даний момент знаходяться справа від поточної зони профілю температурного поля потрапляють у рівномірне температурне поле АВі. Тому для цих ділянок  $(T_{Ei} - T_{Ei+1}) \rightarrow 0$ , тобто, згідно з (2.23), для цих ділянок  $E_i^{PROF1} \rightarrow 0$ . Для ділянок, які експлуатувалися при температурі вільних кінців (у зоні профілю температурного поля CD)  $\Delta e_i = 0$ . Тому всі ці ділянки не змінюють термо-е.р.с. ТП під час зміни градієнта температурного поля від  $T_{E1}$  до  $T_{Ek+1}$ .

Таким чином, на основі (2.23) і (2.24), можна скласти рівняння, яке буде відображати результат вимірювання термо-е.р.с. ТП  $E_i^{VYM}$  при поступовій зміні профілю температурного поля згідно з рис. 3.4 і 3.5

$$E_{\Sigma}^{PROFi} = \sum_i^k (E_i^{NOM} + \Delta E_i^{NEOD}) = E_i^{VYM}. \quad (3.15)$$

На основі (3.15) можна скласти систему рівнянь, яка буде об'єднувати результати вимірювань на протязі всього процесу переміщення профілю температурного поля з профілю ABCD у профіль AB1C1D (див. рис. 3.4). Тобто процес діагностування згідно з рис. 3.5 електродів головної ТП, що входить у ТЕП з КПТП [217] відповідає системі рівнянь

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^k (E_i^{NOM} + \Delta E_i^{NEOD}) = E_1^{VYM} \\ \sum_{i=2}^k (E_i^{NOM} + \Delta E_i^{NEOD}) = E_2^{VYM} \\ \dots \\ \sum_{i=k}^k (E_i^{NOM} + \Delta E_i^{NEOD}) = E_k^{VYM} \end{array} \right. \quad (3.16)$$

У результаті рішення системи рівнянь (3.16) отримаємо дійсні поточні значення похибки від набутої термоелектричної неоднорідності окремих



ділянок ТП  $\Delta E_1^{NEOD}$ ,  $\Delta E_2^{NEOD}$ , ... $\Delta E_k^{NEOD}$ . Як видно з рис. 3.4, максимальна зміна профілю температурного поля переводить всі ділянки ТП, що експлуатувалися при високих температурах, у зону рівномірного температурного поля, тобто вони перестають генерувати термо-е.р.с. У такому випадку похибка від набутої термоелектричної неоднорідності сягає максимального значення. Однак, згідно з (3.16), максимальні значення похибок від дрейфу ФП ТП та від набутої термоелектричної неоднорідності рівні. Таким чином, згідно з (2.46), за результатами розрахунку  $\Delta E_1^{NEOD}$ ,  $\Delta E_2^{NEOD}$ , ... $\Delta E_k^{NEOD}$  можна обчислити поточні значення похибок від дрейфу ФП для всіх ділянок ТП  $\Delta E_1^{DR}$ ,  $\Delta E_2^{DR}$ , ... $\Delta E_k^{DR}$ .

Відповідно до викладеного, у процесі діагностування стану електродів ТП, за допомогою математичної моделі похибки ділянок ТП можна обчислити прогнозовані похибки від набутої термоелектричної неоднорідності цих ділянок ТП  $\Delta E_{MM1}^{NEOD}$ ,  $\Delta E_{MM2}^{NEOD}$ , ... $\Delta E_{MMk}^{NEOD}$  та похибки від дрейфу  $\Delta E_{MM1}^{DR}$ ,  $\Delta E_{MM2}^{DR}$ , ... $\Delta E_{MMk}^{DR}$  для даного часу експлуатації  $\tau_E$  та порівняти їх з отриманими у процесі діагностування поточними значеннями похибок від дрейфу ФП цих ділянок ТП  $\Delta E_1^{DR}$ ,  $\Delta E_2^{DR}$ , ... $\Delta E_k^{DR}$  або від набутої термоелектричної неоднорідності  $\Delta E_1^{NEOD}$ ,  $\Delta E_2^{NEOD}$ , ... $\Delta E_k^{NEOD}$ . При значній різниці між отриманими значеннями прогнозованих та визначених експериментально похибок необхідно відкоригувати відповідним чином математичні моделі похибок ділянок електродів ТП, викликаних їх деградацією. Для цього слід розробити відповідну методику, що буде спиратися на деякий узагальнений критерій оцінки стану електродів ТП, який необхідно буде визначити.

У цьому параграфі розроблено теоретичні основи методу діагностування стану електродів ТП у процесі її експлуатації шляхом визначення поточних значень похибок окремих ділянок від дрейфу ФП та від набутої термоелектричної неоднорідності, а також зроблено висновок про

потребу визначення узагальненого критерію оцінки стану електродів ТП.

### 3.3 Критерій оцінки стану електродів ТП

Як було показано раніше, критерієм якості електродів ТП, тобто мірою ступеня їх деградації, може бути одна з похибок – від дрейфу ФП ТП  $\Delta E^{DR}$  або від набутої в процесі тривалої експлуатації термоелектричної неоднорідності  $\Delta E^{NEOD}$ . Але поточні значення цих похибок, а також їх зміни у продовж часу експлуатації, зазвичай, невідомі. Крім того, похибки від дрейфу ФП ТП  $\Delta E^{DR}$  або від набутої термоелектричної неоднорідності  $\Delta E^{NEOD}$  хоча і дозволяють оцінити похибку даної ТП в момент її визначення, але не дають змоги визначити місце цієї ТП у загальній картині процесу деградації її електродів. Тому вибір зміни ФП ТЕП як критерію якості електродів ТП не можна вважати найкращим рішенням. Вибір як критерію якості електродів ТП температури експлуатації  $T_E$  або зміни поточної температури  $\Delta T_D$  теж не доцільний – ці впливаючі величини можуть не мінятися на протязі життєвого циклу ТП. А похибки  $\Delta E^{DR}$  або  $\Delta E^{NEOD}$  важко безпосередньо використати як для поточної оцінки стану електродів ТП, так і для прогнозу поведінки похибки ТП у подальшому. Тому як критерій оцінки стану електродів ТП (ступеня їх деградації) необхідно вибрати змінну зручну у користуванні та постійно відому.

Пропонується для оцінки ступеня деградації електродів ТП вибрати еквівалентний час її експлуатації  $\tau_{EKV}$  [217, 218, 223 - 225]. Цей час може бути практично рівним фізичному часу  $\tau_E$  експлуатації ТП, тобто  $\tau_{EKV} \approx \tau_E$ , якщо умови експлуатації близькі до тих, що мали місце при експериментальних дослідженнях змін ФП (похибок від дрейфу ФП ТП або від набутої термоелектричної неоднорідності електродів) однотипних ТП у аналогічних умовах під дією основних впливаючих величин (температури  $T_E$  та часу  $\tau_E$

експлуатації, а також зміни поточної температури  $\Delta T_D$ ). Однак при інших умовах експлуатації еквівалентний час експлуатації ТП  $\tau_{EKV}$  не буде рівний фізичному  $\tau_E$ , тобто  $\tau_{EKV} \neq \tau_E$ . Якщо умови експлуатації сприятливіші (відсутні шкідливі домішки, вібрація, термоудари тощо), то еквівалентний час експлуатації ТП буде меншим фізичного, тобто  $\tau_{EKV} < \tau_E$ . Якщо умови експлуатації жорсткі, то еквівалентний час експлуатації ТП буде більшим фізичного, тобто  $\tau_{EKV} > \tau_E$  [217, 218, 223 - 225].

У загальному еквівалентний час експлуатації  $\tau_{EKV}$  даної ТП повинен вказувати її місце у загальній математичній моделі змін ФП ТП, побудованій за результатами експериментальних досліджень, опублікованих, наприклад, у [141, 142] або їм подібних. У такому випадку еквівалентний час експлуатації  $\tau_{EKV}$  даної ТП є комплексною оцінкою стану її електродів. При наявності математичної моделі, що поєднує дію основних впливаючих величин, еквівалентний час експлуатації  $\tau_{EKV}$  повинен дати змогу визначити місце даної ТП у математичній моделі та оцінити похибки, що можуть виникнути у даних умовах при її подальшій експлуатації, зокрема, відповідно до змін поточної температури. Це повинно забезпечити кращі умови обґрунтованого вирішення питання про доцільність або необхідність заміни ТП.

Як показано в [188] та §§ 1.3 і 2.2, дві домінуючі похибки ТП – від дрейфу ФП ТП  $\Delta E^{DR}$  та від набутої термоелектричної неоднорідності електродів ТП  $\Delta E^{NEOD}$  є різними проявами процесу деградації її електродів. Тому основою для введення еквівалентного часу експлуатації  $\tau_{EKV}$  як критерію якості електродів ТП може служити взаємна залежність між різними проявами ступеня деградації електродів під дією домінуючих у більшості випадків впливаючих величин – значення температури експлуатації  $T_E$ , фізичного часу експлуатації  $\tau_E$  та можливих на даному місці експлуатації змін поточної температури  $\Delta T_D$  [217, 218, 223 - 225]. З точки зору моделі похибок

ТП (див. рис. 2.6) визначення еквівалентного часу експлуатації відповідає знаходженню поверхні, в межах якої змінюються співвідношення між похибками дрейфу ФП ТП  $\Delta E^{DR}$  та від набутої термоелектричної неоднорідності  $\Delta E^{NEOD}$  відповідно до (2.46).

При сталому профілі температурного поля вздовж електродів головної ТП, що входить у склад ТЕП з КПТП, знаходження еквівалентного часу експлуатації  $\tau_{EKV}$  не викликає проблем. Для цього спочатку необхідно визначити максимальне значення однієї з її похибок – дрейфу  $\Delta E_{MAX}^{DR}$  ФП ТП або від набутої в процесі тривалої експлуатації неоднорідності  $\Delta E_{MAX}^{NEOD}$ . Як було показано у попередньому розділі, цього можна досягнути максимально змінивши профіль температурного поля вздовж електродів ТП. Тоді зміна термо-е.р.с. головної ТП буде рівна  $\Delta E_{MAX}^{NEOD}$ , але згідно з (2.46)  $\Delta E_{MAX}^{DR} = -\Delta E_{MAX}^{NEOD}$ . Отримане у результаті використання розробленого у другому розділі оперативного методу поточне значення однієї з похибок, наприклад, від набутої термоелектричної неоднорідності  $\Delta E_{MAX}^{NEOD}$ , необхідно порівняти із значенням цієї похибки  $\Delta E_{MM}^{NEOD}$ , обчисленим за допомогою математичної моделі похибки ТП. Тоді коефіцієнт  $K_{MM}$ , що приблизно відображає невідповідність математичної моделі похибки ТП реальному процесу деградації електродів ТП, можна знайти за формулою

$$K_{MM} = \frac{\Delta E_{POT}^{NEOD}}{\Delta E_{MM}^{NEOD}} \cdot \quad (3.17)$$

При подальшій корекції похибки цієї ТП, обчислені згідно із математичною моделлю її похибки, необхідно множити на отриманий коефіцієнт її невідповідності  $K_{MM}$ . А еквівалентний час експлуатації можна обчислити за формулою

$$\tau_{EKV} = K_{MM} \cdot \tau_E \cdot \quad (3.18)$$

Однак, як було вказано у § 3.2, не лише кожна ТП має індивідуальні

особливості, які впливають на протікання процесів деградації у її електродах, але також кожна ділянка цієї ТП має індивідуальні особливості. Це може бути викликано станом електродів конкретної ТП, так і наявністю на місці її експлуатації домішок, що можуть нерівномірно впливати на швидкість протікання деградаційних процесів у електродах ТП. Тому, для підвищення точності прогнозу похибки ТП, у § 3.2 розроблено оперативний метод діагностування стану електродів ТП. Цей метод дає можливість визначення похибок від дрейфу ФП ТП  $\Delta E_i^{DR}$  або від набутої термоелектричної неоднорідності  $\Delta E_i^{NEOD}$  кожної ділянки ТП. Визначення поточних значень цих похибок дає змогу згідно з (3.17) знайти коефіцієнти  $K_{MMi}$  кожної ділянки, а потім, згідно з (3.18) обчислити еквівалентні часи експлуатації  $\tau_{EKVi}$  кожної ділянки, на які розбита ТП.

Слід відзначити, що для загального діагностування стану електродів ТП не потрібна висока точність визначення індивідуального еквівалентного часу її експлуатації  $\tau_{EKV}$ . Але, якщо передбачена корекція результатів вимірювання температури за індивідуальними математичними моделями похибок від дрейфу ФП ТП  $\Delta E_i^{DR}$  або від набутої термоелектричної неоднорідності  $\Delta E_i^{NEOD}$  ділянок ТП, то точність визначення еквівалентного часу експлуатації  $\tau_{EKVi}$  кожної ділянки її електродів впливає на ефективність корекції. Тому необхідно розробити оперативний метод діагностування стану електродів ТП, за допомогою якого можна буде визначати індивідуальний еквівалентний час  $\tau_{EKVi}$  експлуатації всіх ділянок ТП [217, 218, 223 - 225].

У даному параграфі обґрунтовано вибір індивідуального еквівалентного часу експлуатації всіх ділянок ТП як критерію оцінки стану її електродів.

### **3.4 Оперативний метод діагностування стану електродів термопар**

У [217, 218] і § 3.3 було обґрунтовано використання як міри деградації

ділянок, на які віртуально розбиті електроди ТП, еквівалентного часу їх експлуатації  $\tau_{EKVi}$ . Він визначається згідно з (3.17) і (3.18) як відношення отриманого поточного значення похибки від дрейфу ФП ділянки ТП або від набутої термоелектричної неоднорідності до відповідної похибки, обчисленої згідно з математичною моделлю. При цьому якщо еквівалентний час експлуатації близький до фізичного, тобто  $\tau_{EKV} \approx \tau_E$ , то умови експлуатації ТП близькі до умов дослідження їх похибок, якщо еквівалентний час експлуатації менший за фізичний, тобто  $\tau_{EKV} < \tau_E$ , то умови експлуатації ТП більш сприятливі за умови дослідження їх похибок, а якщо еквівалентний час експлуатації більший за фізичний, тобто  $\tau_{EKV} > \tau_E$ , то умови експлуатації ТП жорсткіші.

Перевагою еквівалентного часу експлуатації  $\tau_{EKV}$  при оцінці стану електродів ТП є вища його адекватність до реального процесу їх деградації. Узагальнена методика визначення еквівалентного часу експлуатації  $\tau_{EKVi}$  для кожної ділянки ТП передбачає виконання таких процедур [217, 218, 223]:

1. вимірювання змін термо-е.р.с., генерованих ТП при заданих змінах профілю температурного поля згідно з методом, поданим у § 3.2 (див. рис. 3.3, 3.4);
2. знаходження поточних похибок  $\Delta E_1^{NEOD}$ ,  $\Delta E_2^{NEOD}$ , ... $\Delta E_k^{NEOD}$  та  $\Delta E_1^{DR}$ ,  $\Delta E_2^{DR}$ , ... $\Delta E_k^{DR}$  для всіх ділянок ТП (опрацювання результатів вимірювання);
3. знаходження еквівалентного часу експлуатації  $\tau_{EKVi}$  для всіх ділянок ТП;
4. оцінка адекватності математичної моделі за результатами знаходження еквівалентного часу експлуатації  $\tau_{EKVi}$  для всіх ділянок ТП;
5. оцінка очікуваних похибок вимірювання температури даним ТП у поточних умовах експлуатації.

Зміни профілю температурного поля доцільно проводити згідно із рис. 3.4 тому, що, згідно із [122], похибка від набутої термоелектричної неоднорідності максимально проявляє себе при зміні глибини занурення ТП. Паралельне пересування профілю температурного поля, відповідно до рис. 3.4, саме і відповідає імітації зміни глибини занурення ТП. Таким чином, зміни термо-е.р.с. при паралельному пересуванні профілю температурного поля будуть мати максимальні значення, що зменшує вплив похибок вимірювального каналу на похибку визначення еквівалентного часу експлуатації.

Першим етапом опрацювання результатів вимірювання є знаходження поточних питомих термо-е.р.с.  $e_1, e_2, \dots, e_k$  ділянок ТП [217, 218, 223 - 225]. Кожна з цих питомих термо-е.р.с.  $e_i$  є сумою номінальної питомої термо-е.р.с.  $e_i^{NOM}$  та індивідуальної похибки питомої термо-е.р.с. від деградації її електродів  $e_i^{DEG}$ , тобто  $e_i = e_i^{NOM} + e_i^{DEG}$ . Значення  $e_i$  можна знайти шляхом підстановки у (3.16) результатів вимірювань генерованої ТП термо-е.р.с.  $E_i^{VYM}$  при пересуванні профілю температурного поля відповідно до рис. 3.4. У результаті отримаємо систему рівнянь

$$\begin{cases} (e_1^{NOM} + e_1^{DEG})\Delta T_{D1}^1 + (e_2^{NOM} + e_2^{DEG})\Delta T_{D2}^1 + \dots + (e_k^{NOM} + e_k^{DEG})\Delta T_{Dk}^1 = E_1^{VYM} \\ (e_1^{NOM} + e_1^{DEG})\Delta T_{D1}^2 + (e_2^{NOM} + e_2^{DEG})\Delta T_{D2}^2 + \dots + (e_k^{NOM} + e_k^{DEG})\Delta T_{Dk}^2 = E_2^{VYM} \\ \dots \\ (e_1^{NOM} + e_1^{DEG})\Delta T_{D1}^k + (e_2^{NOM} + e_2^{DEG})\Delta T_{D2}^k + \dots + (e_k^{NOM} + e_k^{DEG})\Delta T_{Dk}^k = E_k^{VYM} \end{cases}, \quad (3.19)$$

де  $\Delta T_{D1}^1 \dots \Delta T_{Dk}^k$  – зміни поточної температури, причому верхній індекс означає номер профілю температурного поля, а нижній – номер ділянки.

Систему рівнянь (3.19) можна вирішувати будь яким з відомих методів. За отриманими в результаті рішення системи (3.19) значеннями поточних питомих термо-е.р.с. ділянок  $e_1, e_2, \dots, e_k$  можна визначити поточні індивідуальної похибки питомої термо-е.р.с. від деградації її електродів  $e_i^{DEG}$

за формулою

$$e_i^{DEG} = e_i - e_i^{NOM}. \quad (3.20)$$

При цьому індивідуальні похибки від деградації ділянок електродів ТП під час експлуатації ТП  $\Delta E_i^{DEG}$  можна обчислити за формулою

$$\Delta E_i^{DEG} = e_i^{DEG} \cdot \Delta T_{Di}^{EXP}, \quad (3.21)$$

де  $\Delta T_{Di}^{EXP}$  – зміни поточної температури, що відповідають різниці температур на кінцях ділянок під час експлуатації.

За отриманими згідно із (3.21) значеннями поточних індивідуальних похибок  $e_i^{DEG}$  можна визначити похибки від набутої термоелектричної неоднорідності ділянок ТП  $\Delta E_1^{NEOD}$ ,  $\Delta E_2^{NEOD}$ , ... $\Delta E_k^{NEOD}$ , та, згідно із (2.46), можна визначити відповідні похибки дрейфу цих ділянок  $\Delta E_1^{DR}$ ,  $\Delta E_2^{DR}$ , ... $\Delta E_k^{DR}$ . Далі, за значеннями  $\Delta E_1^{DR}$ ,  $\Delta E_2^{DR}$ , ... $\Delta E_k^{DR}$  можна будувати індивідуальні математичні моделі дрейфу ФП кожної ділянки ТП або коригувати існуючі математичні моделі.

Значно спростити опрацювання результатів вимірювання можна за рахунок утримання під час діагностування електродів ТП профілів температурного поля близькими до лінійних, як це було спрощено показано на рис. 3.4. Профілі, близькі до лінійних, можна отримати за рахунок відповідного налаштування систем регулювання температури нагрівачів окремих зон. У такому випадку не обов'язково визначати індивідуальні похибки питомої термо-е.р.с. від деградації електродів  $e_i^{DEG}$ , можна відразу визначити похибки від набутої термоелектричної неоднорідності ділянок ТП  $\Delta E_1^{DR}$ ,  $\Delta E_2^{DR}$ , ... $\Delta E_k^{DR}$  у цілому. Для цього систему рівнянь (3.19) перепишемо у наступному виді



$$\left\{ \begin{array}{cccccc} E_1^{NOM} + \Delta E_1^{NEOD} & E_2^{NOM} + \Delta E_2^{NEOD} & E_3^{NOM} + \Delta E_3^{NEOD} & \dots & E_k^{NOM} + \Delta E_k^{NEOD} & = E_1^{VYM} \\ 0 & E_2^{NOM} + \Delta E_2^{NEOD} & E_3^{NOM} + \Delta E_3^{NEOD} & \dots & E_k^{NOM} + \Delta E_k^{NEOD} & = E_2^{VYM} \\ 0 & 0 & E_3^{NOM} + \Delta E_3^{NEOD} & \dots & E_k^{NOM} + \Delta E_k^{NEOD} & = E_3^{VYM} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & E_k^{NOM} + \Delta E_k^{NEOD} & = E_k^{VYM} \end{array} \right. \quad (3.22)$$

Система рівнянь виходить трикутною, тобто безпосередньо придатною для застосування методу Гауса для її рішення [217, 218]. Далі, аналогічно до описаного вище методу опрацювання даних, за отриманими згідно із (3.22) значеннями поточних індивідуальних похибок від набутої термоелектричної неоднорідності ділянок ТП  $\Delta E_1^{NEOD}$ ,  $\Delta E_2^{NEOD}$ , ...,  $\Delta E_k^{NEOD}$ , згідно із (2.46), можна визначити відповідні похибки дрейфу цих ділянок  $\Delta E_1^{DR}$ ,  $\Delta E_2^{DR}$ , ...,  $\Delta E_k^{DR}$  та будувати індивідуальні математичні моделі дрейфу ФП кожної ділянки ТП або коригувати існуючі математичні моделі.

Наступний етап опрацювання даних полягає у знаходженні еквівалентних часів експлуатації  $\tau_{EKVi}$  всіх ділянок. Для цього, згідно із використовуваною математичною моделлю похибки електродів ТП, обчислюємо теоретичні значення похибок  $\Delta E_{MM1}^{DR}$ ,  $\Delta E_{MM2}^{DR}$ , ...,  $\Delta E_{MMk}^{DR}$  від дрейфу ФП для всіх ділянок ТП (або від похибок від набутої термоелектричної неоднорідності  $\Delta E_{MM1}^{NEOD}$ ,  $\Delta E_{MM2}^{NEOD}$ , ...,  $\Delta E_{MMk}^{NEOD}$  цих же ділянок ТП). Далі знаходимо, згідно із (3.17), коефіцієнти  $K_{MMi}$ , що відображають невідповідність математичної моделі реальному процесу деградації кожної ділянки електродів ТП, а потім знаходимо, згідно з (3.18), еквівалентні часи експлуатації  $\tau_{EKVi}$  всіх ділянок термоелектродів.

Відповідний алгоритм визначення еквівалентного часу експлуатації ділянок ТП  $\tau_{EKVi}$  подано на рис. 3.6. У ньому спочатку визначаються дійсні та прогнозовані похибки ТП кожної ділянки. Потім, залежно від того, яке значення похибки більше, еквівалентний час збільшується або зменшується на 100 годин. Далі прогнозується похибка ТП для цього часу експлуатації.

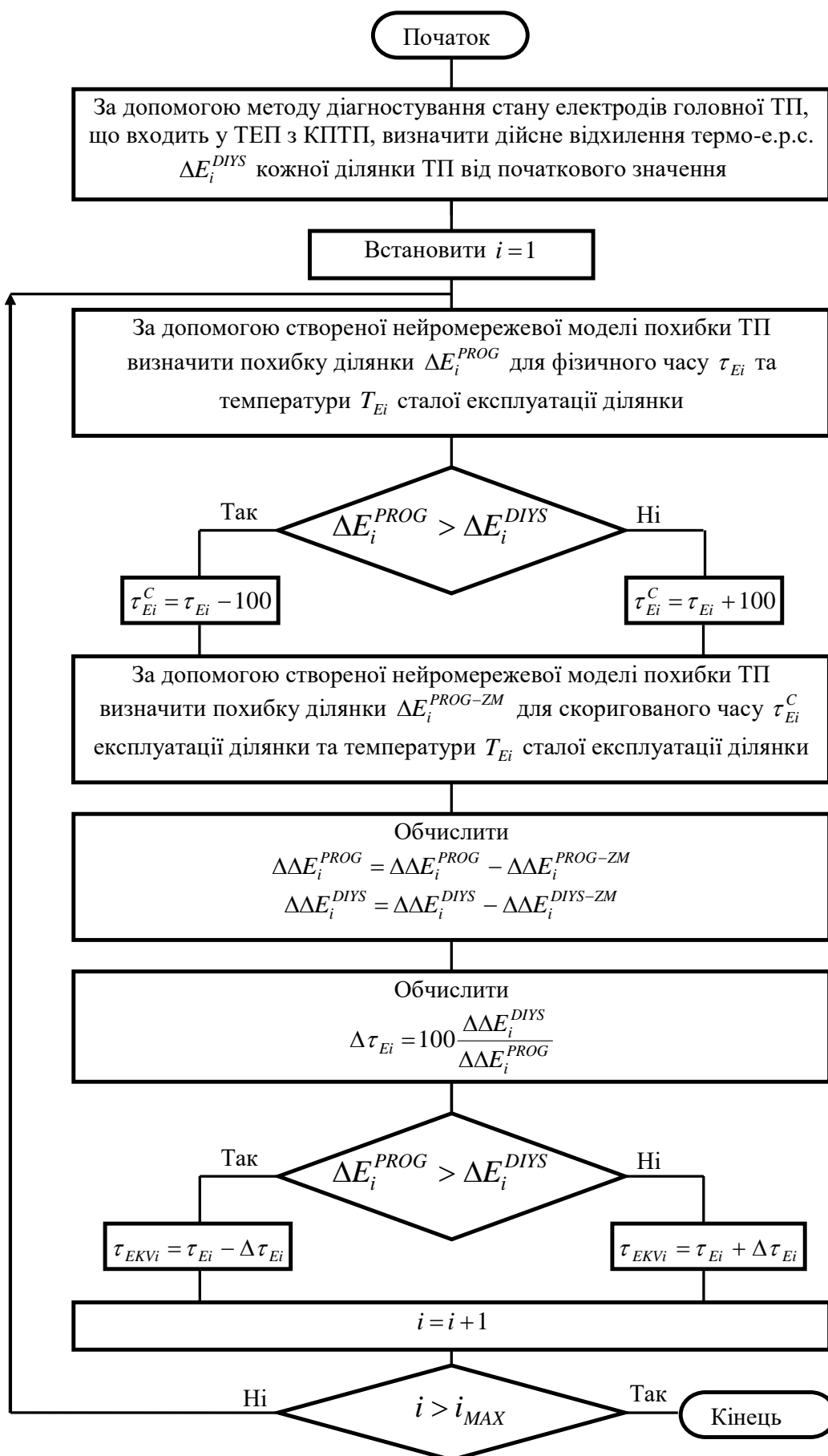


Рис. 3.6. Алгоритм визначення еквівалентного часу експлуатації ділянок ТП

За результатами порівняння співвідношення приростів похибки при збільшенні або зменшенні часу експлуатації на 100 годин і відхилення дійсної похибки від прогнозованої обчислюється дійсне відхилення еквівалентного часу експлуатації від фізичного часу експлуатації ТП. Далі отримане дійсне відхилення еквівалентного часу експлуатації від фізичного часу експлуатації додається до фізичного часу (якщо до фізичного часу було додано 100 годин) або віднімається від нього (якщо від фізичного часу було віднято 100 годин). Таким чином отримуємо еквівалентний час експлуатації кожної ділянки ТП  $\tau_{EKVi}$ .

Для оцінки адекватності математичної моделі за значеннями еквівалентного часу експлуатації проводимо аналіз відповідності отриманих значень  $\tau_{EKVi}$  для всіх ділянок ТП значенню фізичного часу експлуатації ТП  $\tau_E$ . Періодичне визначення еквівалентного часу експлуатації  $\tau_{EKVi}$  всіх ділянок електродів ТП дає можливість відслідковувати процес деградації останніх та ефективність конструктивно-технологічних методів підвищення точності вимірювання температури. Також важливу інформацію про процеси деградації електродів ТП дає аналіз самих отриманих значень еквівалентного часу їх експлуатації. При цьому можливі наступні випадки:

1. отримані значення еквівалентного часу експлуатації  $\tau_{EKVi}$  ділянок термоелектродів близькі до фізичного часу їх експлуатації, тобто  $\tau_{EKVi} \approx \tau_E$ , а різниці між ними для окремих ділянок теж малі, тобто  $\tau_{EKVi} - \tau_E \ll \tau_E$  (на рівні таких, які можуть бути викликані випадковими похибками вимірювання під час експериментального визначення  $E_i^{VYM}$ ). Це означає, що математична модель похибки ТП цілком адекватно відображає процес деградації електродів ТП, а використовувані методи корекції похибок вимірювання температури мають у даному випадку високу ефективність.
2. отримані значення еквівалентного часу експлуатації  $\tau_{EKVi}$  ділянок

електродів ТП істотно відрізняються від фізичного часу їх експлуатації, тобто  $\tau_{EKVi} \neq \tau_E$ , але різниці між ними для окремих ділянок малі, тобто  $\tau_{EKVi} - \tau_{EKV}^{SER} \ll \tau_E$ , де

$$\tau_{EKV}^{SER} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \tau_{EKVi}, \quad (3.23)$$

тобто на рівні таких, які можуть бути викликані випадковими похибками вимірювання під час експериментального визначення  $E_i^{VYM}$ . Це означає, що умови, при яких проведені експериментальні дослідження похибок  $\Delta e^{DR}$ , що послужили основою для побудови математичної моделі похибок ТП і були використані для визначення еквівалентного часу експлуатації ділянок електродів даної ТП, значно відрізняються від поточних умов її експлуатації. Якщо еквівалентний час експлуатації  $\tau_{EKVi}$  всіх ділянок електродів ТП менший за фізичний, то умови експлуатації ТП сприятливіші (у середовищі об'єкта вимірювання немає шкідливих домішок, які пришвидшують деградацію електродів ТП, а, можливо, є домішки, що сповільнюють процеси деградації). Якщо еквівалентний час експлуатації  $\tau_{EKVi}$  всіх ділянок електродів ТП більший за фізичний, то умови експлуатації ТП жорсткіші (у середовищі об'єкта вимірювання є шкідливі домішки, які пришвидшують деградацію електродів ТП). Однак в цілому математична модель похибки ТП доволі адекватно відображає процес деградації її електродів. Корекція математичних моделей ділянок електродів ТП зводиться до використання відповідного коефіцієнта  $K_{MMi}$ , отриманого згідно із (3.17), (3.18), для створення індивідуальних математичних моделей похибки окремих ділянок ТП та ТП у цілому, діагностування якої проводиться у даному місці експлуатації. Методи корекції похибок вимірювання температури за такими індивідуальними математичними моделями похибок мають у даному випадку також високу ефективність.

3. отримані значення еквівалентного часу експлуатації  $\tau_{EKVi}$  ділянок електродів ТП близькі до фізичного часу, тобто  $\tau_{EKVi} \approx \tau_E$ , але різниці між ними для окремих ділянок великі, більші деякого допустимого значення  $\Delta\tau_E^{DOP}$ , тобто  $\tau_{EKVi} - \tau_{EKV}^{SER} > \Delta\tau_{EKV}^{DOP}$ , причому відхилення  $\tau_{EKVi}$  від середнього значення  $\tau_{EKV}^{SER}$  не можна пояснити випадковими похибками вимірювання під час експериментального визначення  $E_i^{VYM}$ . Це означає, що математичні моделі похибки ділянок ТП погано відображають процес деградації її окремих ділянок. Можливо у даних умовах експлуатації діють домішки, що впливають на швидкість деградації електродів ТП, але не як у п. 2 при температурах експлуатації всіх ділянок електродів, а вибірково, у деякому діапазоні температур експлуатації. Тому методи корекції похибок вимірювання температури, які використовують згадані математичні моделі, будуть мати у даному випадку низьку ефективність. Значення допустимого відхилення  $\Delta\tau_{EKV}^{DOP}$  еквівалентних часів експлуатації  $\tau_{EKVi}$  ділянок термоелектродів від середнього значення  $\tau_{EKV}^{SER}$  вимагає додаткового дослідження. Такі дослідження можуть бути проведені шляхом достатньо частого діагностування ділянок електродів ТП у даних умовах експлуатації. При цьому доцільно використати розроблений оперативний метод діагностування стану електродів ТП. За результатами визначення похибок від дрейфу ФП ділянок ТП та від їх набутої термоелектричної неоднорідності можливий перехід до індивідуальних математичних моделей похибок окремих ділянок електродів ТП, які краще відображають процеси деградації цих ділянок [97 – 101]. Ознакою вдосконалення математичних моделей буде зменшення відхилення індивідуальних часів експлуатації  $\tau_{EKVi}$  ділянок електродів від середнього значення  $\tau_{EKV}^{SER}$ , тобто наближення до варіантів 1 або 2. У такому випадку ефективність використовуваних методів корекції

похибок вимірювання температури буде зростати.

4. отримані значення еквівалентного часу експлуатації  $\tau_{EKVi}$  ділянок електродів ТП значно відрізняються від фізичного часу  $\tau_E$  їх експлуатації, тобто  $\tau_{EKVi} \neq \tau_E$ , а різниці між ними для окремих ділянок великі, більші деякого допустимого значення  $\Delta\tau_E^{DOP}$ , тобто  $\tau_{EKVi} - \tau_{EKV}^{SER} > \Delta\tau_{EKV}^{DOP}$  (відхилення  $\tau_{EKVi}$  від середнього значення  $\tau_{EKV}^{SER}$  не можна пояснити випадковими похибками вимірювання під час експериментального визначення  $E_i^{VYM}$ ). Це означає, що математичні моделі похибки ділянок ТП практично не відображають процес деградації цих ділянок. Ці математичні моделі не доцільно використовувати у даному випадку (методи корекції похибки ТП вимірювання температури на основі цих математичних моделей матимуть або низьку ефективність, або навіть можуть збільшувати похибку вимірювання температури). Необхідна побудова інших математичних моделей похибки ділянок ТП у даних умовах експлуатації. Для цього можна використати результати визначення похибок ділянок ТП від дрейфу їх ФП та від набутої термоелектричної неоднорідності за допомогою оперативного методу, розробленого у даному розділі, а також результати визначення поточної похибки ТП у цілому за допомогою оперативного методу, розробленого у другому розділі.

Отримані значення еквівалентних часів експлуатації дають змогу адаптувати загальну математичну модель похибки ТП до умов експлуатації даного конкретного ТЕП. Це, в свою чергу, дає змогу підвищити точність корекції похибок вимірювання температури за його допомогою, а також більш коректно оцінити невиключені похибки вимірювання температури. Для оцінки невиключеної похибки від дрейфу ФП ділянок ТП можна використати отримані при діагностуванні ТП індивідуальні відхилення еквівалентного часу експлуатації  $\tau_{EKVi}$  ділянок термоелектродів від середнього значення  $\tau_{EKV}^{SER}$ . Для

проведення такої оцінки доцільно провести прогноз похибки від дрейфу ФП кожної ділянки ТП  $\Delta E_i^{DR}$  як для індивідуального еквівалентного часу її експлуатації  $\tau_{EKVi}$ , так і для еквівалентних часів експлуатації у межах відхилень цих індивідуальних часів експлуатації від середнього значення  $\tau_{EKV}^{SER}$  для всіх ділянок, тобто  $\tau = \tau_{EKV}^{SER} \pm \Delta\tau$ , де  $\Delta\tau = \tau_{EKVi} - \tau_{EKV}^{SER} \Big|_{MAX,MIN}$ .

Відхилення отриманих для еквівалентних часів експлуатації  $\tau_{EKVi} \pm \Delta\tau$  значень похибок від дрейфу ФП ділянок ТП від значення  $\Delta e_i^{DR}$  будуть відповідати невиключеній похибці вимірювання температури від індивідуального дрейфу ФП ділянок ТП.

Для оцінки невиключеної похибки від набутої термоелектричної неоднорідності можна використати результати вимірювання температури зон нагріву ТЕП з КПТП під час його експлуатації. Для цього, аналогічно як і для похибки від дрейфу ФП ТП, слід знайти максимальні відхилення температур кожної зони від її середнього значення та підставити відповідні температури як аргументи математичної моделі. Максимальні відхилення отриманих похибок від набутої термоелектричної неоднорідності  $\Delta E_i^{NEOD}$  для граничних температур кожної зони  $T_{SERi} \pm \Delta T_i \Big|_{MAX,MIN}$  будуть відповідати невиключеній похибці вимірювання температури від набутої термоелектричної неоднорідності.

Слід відзначити, що аналітична оцінка похибок розробленого методу діагностування доволі складна та не обов'язково потрібна. Адже зрозуміло, що похибка визначення індивідуального еквівалентного часу її експлуатації  $\tau_{EKVi}$  ділянок ТП, через відносно велику похибку вимірювання під час вимірювання змін генерованої ТП термо-е.р.с.  $E_i^{VYM}$  при поступовому пересуванні профілю температурного поля відповідно до рис. 3.4 та низьку чутливість ТП, буде на рівні декількох відсотків. Але значно більшою буде відхилення визначених індивідуальних еквівалентних часів експлуатації  $\tau_{EKVi}$  ділянок ТП через

нерівномірність процесу деградації її електродів [253, 254]. І висока точність розробленого методу діагностування не дає ніяких переваг. Для аналізу похибок цього методу, доцільніше використати метод імітаційного моделювання для визначення впливу параметрів системи вимірювання температури та процесу деградації на невиключену похибку розробленого оперативного методу діагностування стану електродів ТП. Такі дослідження будуть проведені у наступному параграфі.

У цьому параграфі розроблено оперативний метод визначення еквівалентного часу експлуатації ТП в цілому  $\tau_{EKV}$  або її ділянок  $\tau_{EKVi}$  як комплексної оцінки їх стану, що дає змогу визначити їх місце у математичній моделі змін ФП ТП, побудованій на базі результатів експериментальних досліджень однотипних ТП у аналогічних умовах. Еквівалентний час експлуатації  $\tau_{EKV}$  ТП у цілому або еквівалентний час експлуатації  $\tau_{EKVi}$  віртуальних ділянок, на які розбита ТП, дає змогу більш адекватно оцінити похибки, що можуть виникнути у даних умовах при подальшій експлуатації ТП та забезпечити кращі умови обґрунтованого вирішення питання про доцільність або необхідність заміни ТП або ТЕП у цілому.

### 3.5 Імітаційне дослідження методу діагностування

Як було вказано у § 2.5, методи експериментальних досліджень мають суттєвий недолік – можна дослідити лише обмежену кількість варіантів реалізації досліджуваних методів і засобів. Обмеження торкаються не тільки затрат часу на проведення великої кількості експериментів. Обмежена кількість варіантів пов'язана також з тим, що компоненти із потрібними параметрами не завжди доступні.

Спрощений МПТ [239, 240] (згідно із структурною схемою рис. 2.18), дає змогу дослідити вимірювальний канал у режимі визначення похибки ТП за розробленим у другому розділі оперативним методом визначення похибки головної ТП, що входить у склад ТЕП з КПТП, за результатами вимірювання



термо-е.р.с. у двох профілях температурного поля – ABCD та AB2C2D (див. рис. 2.10). При цьому МПТ (див. рис. 2.18) має дві основні лінії – обчислення початкових (прийняті рівними номінальним) та дійсних значень генерованої головною ТП термо-е.р.с. у двох профілях температурного поля.

При реалізації оперативного методу діагностування стану електродів головної ТП проводиться вимірювання її термо-е.р.с. у багатьох профілях температурного поля. Тобто МПТ для дослідження методу діагностування стану електродів головної ТП має бути аналогічним до розробленого у § 2.5, але має мати кількість потоків обчислення термо-е.р.с., генерованої головною ТП, у всіх профілях температурного поля (див. рис. 3.4). Для дослідження невиключеної похибки визначення похибок ділянок головної ТП, що входить у ТЕП з КПТП, стан електродів якої діагностують, розіб'ємо її електроди на вісім віртуальних ділянок, як це показано на рис. 3.7. На рис. 3.7 також враховано ділянки злиоту та вільних кінців. При цьому п'ять ділянок, що прилягають до злиоту, під час експлуатації знаходяться постійно у профілі температурного поля експлуатації (виділений потовщеною штриховою лінією профіль ABCD, див. рис. 3.7). Наступні ділянки під час експлуатації знаходяться постійно при температурі вільних кінців.

Дослідження методу визначення еквівалентного часу експлуатації проведемо для вимірюваної температури 800°C (температура злиоту). Для того, щоби зменшити методичну похибку від впливу теплового потоку від першої зони нагріву на злиот, виконано рекомендацію [133, 253] – температура першої зони завжди рівна температурі злиоту.

Під час діагностування профіль температурного поля ABCD поступово зсувають у профіль AB1C1D (див. рис. 3.7, де точка C1 і D зливаються). При цьому для кожного профілю діагностування (на рис. 3.7 позначені тонкими штриховими лініями) вимірюють генеровану головною ТП термо-е.р.с.

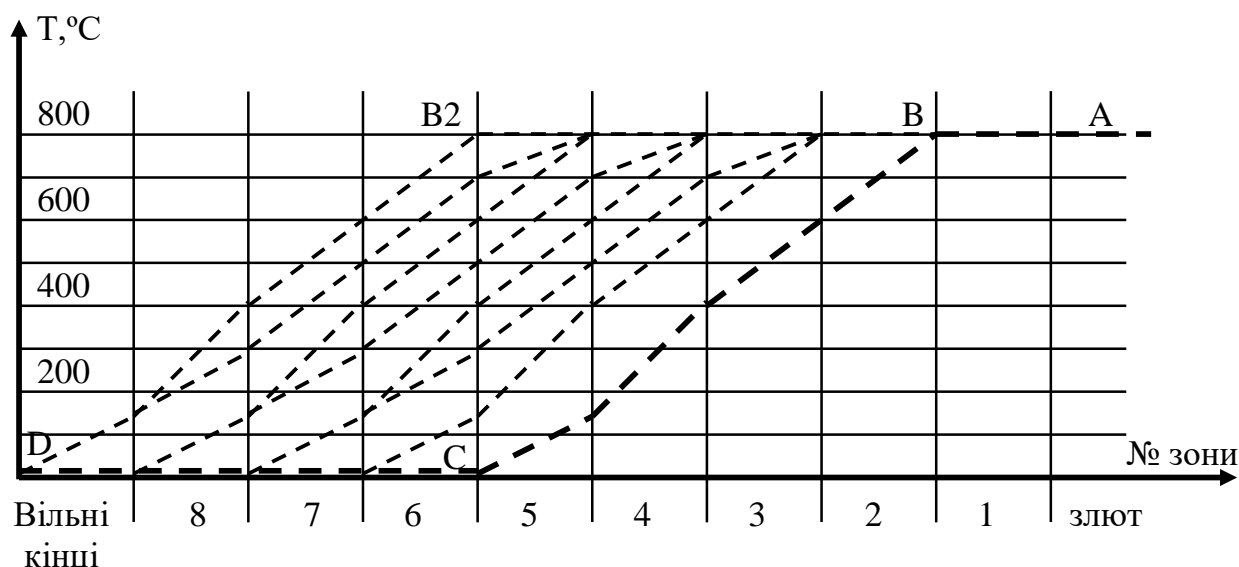


Рис. 3.7. Профілі температурних полів експлуатації (виділений потовщеною штриховою лінією профіль ABCD) та діагностування (тонкі штрихові лінії)

МПТ [239 - 241] дослідження методу діагностування стану електродів головної ТП повинен імітувати залежність реальної температури на кінцях ділянок від похибок систем регулювання. Ці похибки повинні імітуватися випадковими числами  $r_1 \dots r_8$ , та коефіцієнтом їх впливу на похибку  $K_{REG}$  згідно з формулою

$$\Delta T_i = K_{REG} (r_i - 0,5), \quad (3.24)$$

де  $\Delta T_i$  – температури на кінцях віртуальних ділянок, на які розбита ТП, що діагностується;  $r_i$  – випадкові числа, індивідуальні для кожної зони нагріву.

Через те, що індивідуальний стан ділянок електродів діагностованої ТП (їх похибки від дрейфу ФП та від набутої термоелектричної неоднорідності) за час експлуатації дуже змінюється, відхилення питомої термо-е.р.с. ділянок ТП необхідно імітувати як систематичну та випадкову складові. Систематичні похибки імітуються однаковими для всіх ділянок блоками, що імітують детерміновану зміну питомої термо-е.р.с. від температури та часу постійної експлуатації кожної ділянки. Детермінована зміна  $\Delta e_{DET}$  імітується згідно із спрощеною моделлю дрейфу ФП ТП відповідно до формули

$$\Delta e_{DETi} = AT_{EXPi} + BT_{EXPi}^2, \quad (3.25)$$

де  $\Delta e_{DETi}$  – детермінована зміна питомої термо-е.р.с.  $i$  – тої ділянки ТП, що діагностується;  $T_{EXP}$  – температура експлуатації  $i$  – тої ділянки електрода ТП, що діагностується;  $A, B$  – коефіцієнти, що задають швидкість деградації електродів ТП, задано  $A = 25 \cdot 10^{-4} \mu V / ^\circ C^2$ ,  $B = 2 \cdot 10^{-6} \mu V / ^\circ C^3$ .

Індивідуальні відхилення питомої термо-е.р.с. від їх детермінованої зміни задаються випадковими числами  $r_9 \dots r_{16}$ , та коефіцієнтом їх впливу на модель  $K_{DEG}$

$$\Delta e_{VYP} = K_{DEG} (r_i - 0,5), \quad (3.26)$$

де  $\Delta e_{VYP}$  – індивідуальні відхилення питомої термо-е.р.с. від їх детермінованої зміни;  $r_i$  – випадкові числа  $r_9 \dots r_{16}$ , індивідуальні для кожної ділянки ТП.

Вплив випадкової похибки вимірювальної системи імітується випадковими числами  $r_{17} \dots r_{21}$ , та коефіцієнтом їх впливу на результат вимірювання  $K_{VYP}$

$$\Delta E_{VYP} = K_{VYP} (r_i - 0,5), \quad (3.27)$$

де  $\Delta E_{VYP}$  – випадкова похибка вимірювальної системи;  $r_i$  – випадкові числа  $r_{17} \dots r_{21}$ , індивідуальні для кожного профілю температурного поля при діагностуванні ТП.

Таким чином, для дослідження методу діагностування стану електродів головної ТП необхідно виконати такі процедури:

1. Задати профілі температурних полів експлуатації та діагностування шляхом задання номінальних температур кінців віртуальних ділянок, на які розбита головна ТП, що входить у ТЕП з КПТП та проходить діагностування.
2. Задати максимально допустимі випадкові відхилення профілів температурних полів експлуатації та діагностування шляхом задання

коефіцієнта  $K_{REG}$  у (3.24).

3. Задати номінальну питому термо-е.р.с. ТП (при дослідженні методу діагностування стану електродів нелінійністю ТП нехтуємо) та швидкість її зміни при деградації електродів ТП під дією температури експлуатації для заданого часу експлуатації. Систематичну складову відхилення питомої термо-е.р.с. ділянок ТП доцільно імітувати згідно із (3.25), а його випадкову складову – згідно із (3.26) шляхом задання коефіцієнта  $K_{DEG}$ .
4. Задати максимально допустимі випадкові відхилення результатів вимірювання термо-е.р.с. головної ТП під час діагностування шляхом задання коефіцієнта  $K_{VYP}$ .
5. Розрахувати різниці температур всіх віртуальних ділянок для номінальних профілів температурних полів експлуатації та діагностування, а також для дійсних профілів температурних полів експлуатації та діагностування (з врахуванням похибок, заданих відповідно до п. 2).
6. Розрахувати термо-е.р.с., генерованих всіма віртуальними ділянками ТП для номінальних профілів температурних полів експлуатації та діагностування при дійсних питомих термо-е.р.с. ТП ділянок (з врахуванням похибок від їх деградації, заданих відповідно до п. 3).
7. За результатами обчислень, отриманих у п. 6 розрахувати термо-е.р.с., генеровані ТП у всіх профілях температурного поля, і додати до них випадкові складові похибки результатів вимірювання термо-е.р.с. головної ТП, задані відповідно до п. 4.
8. Скласти систему рівнянь (3.19) для умов, знайдених при виконанні пп. 5 (використати різниці температур всіх ділянок для номінальних профілів температурних полів експлуатації та діагностування) і 7 (використати термо-е.р.с., генеровану ТП з врахуванням випадкової складової похибки результатів вимірювання термо-е.р.с. головної ТП).

9. Розв'язати отриману при виконанні п. 8 систему рівнянь відносно дійсних питомих термо-е.р.с. всіх віртуальних ділянок, на які розбита ТП.
10. Порівняти отримані у результаті виконання п. 9 дійсні питомі термо-е.р.с. всіх віртуальних ділянок, на які розбита ТП із дійсними питомими термо-е.р.с. всіх віртуальних ділянок, на які розбита ТП, заданими при виконанні п. 5. Отримані відхилення будуть становити похибку розробленого у параграфі 3.4 методу діагностування стану електродів ТП.

Як видно з викладеної вище методики, структура МПТ для дослідження методу діагностування стану електродів ТП повинна бути значно складніша за МПТ для дослідження розробленого у параграфі 2.4 методу визначення поточної похибки ТП. Тому відповідний МПТ недоцільно реалізувати у Excel. Через те, що розроблюваний МПТ (більшість його процедур) повинна бути використана у робочій системі, для його реалізації доцільно вибрати середовище програмування LabView.

Середовище програмування LabView представляє собою повністю графічну мову програмування [207], що надає велику кількість готових компонентів як для збору даних так і для їх відображення. Це графічна мова програмування, що використовує для створення програм зображення замість текстових рядків. На противагу текстовим мовам програмування, де команди описують порядок виконання програми, LabView використовує інформаційні потоки (потоки даних), де дані описують процес виконання програми. Програми на LabView називаються віртуальними інструментами (VI), тому що їхній вигляд і дії імітують фізичні інструменти (осцилографи, тестери, частотоміри, тощо). Кожен VI використовує функції, що маніпулюють вводом від інтерфейсу користувача або іншого джерела і виводять інформацію або передають до файлів або інших комп'ютерів. При цьому середовище програмування LabView дає як широкі можливості взаємодії з різним апаратним забезпеченням (стандартизованої та індивідуальної, яка

визначається користувачем), так і створення повноцінного програмного забезпечення. На сьогодні провідні фірми апаратного забезпечення для збору даних надають в комплекті до своїх пристроїв уже готове програмне забезпечення на LabView. В разі потреби на основі цих модулів можна надбудувати власне програмне забезпечення.

Подана у Додатку А блок-схема реалізації викладеної методики має, відповідно до термінології середовища програмування LabView, структуру «плоска послідовність». Ця структура передбачає послідовне виконання кожного із 11 кадрів (див. Додатки А-П) послідовно, зліва направо. Кожен кадр представляє собою окрему, повністю автономну підпрограму, яка записує у файл результати свого виконання [22, 23, 24]. Кожен наступний кадр починає виконання з читання інформації (заданих даних або результатів, отриманих у кадрах, які були виконані раніше). При цьому кожен кадр має доступ до всіх файлів, отриманих у результаті виконання всіх попередніх кадрів. Така модульна структура програмного забезпечення дає можливість відносно легко налагоджувати та тестувати кожен кадр у автономному режимі.

Внутрішня структура кожного кадру подана у Додатках Б, В, Д, Е, Ж, И, К, Л, М, Н, П. При цьому використано графічний код програми відповідно до методу візуального програмування, який використовується середовищем програмування LabView [207].

На рис. 3.8 приведені результати дослідження впливу на невиключену похибку визначення похибки ділянок головної ТП змін похибок підсистем регулювання температури вздовж електродів цієї головної ТП, тобто коефіцієнта  $K_{REG}$ . Як видно з рис. 3.8, на відміну від результатів проведеного у § 2.5 дослідження оперативного методу визначення похибки головної ТП, збільшення похибки регулювання суттєво впливає на невиключену похибку визначення похибки ділянок головної ТП. Допустимі з огляду впливу на невиключену похибку визначення похибки ділянок головної ТП похибки регулювання становлять  $1...3^{\circ}\text{C}$ , що вимагає створення відповідної системи регулювання високої точності.

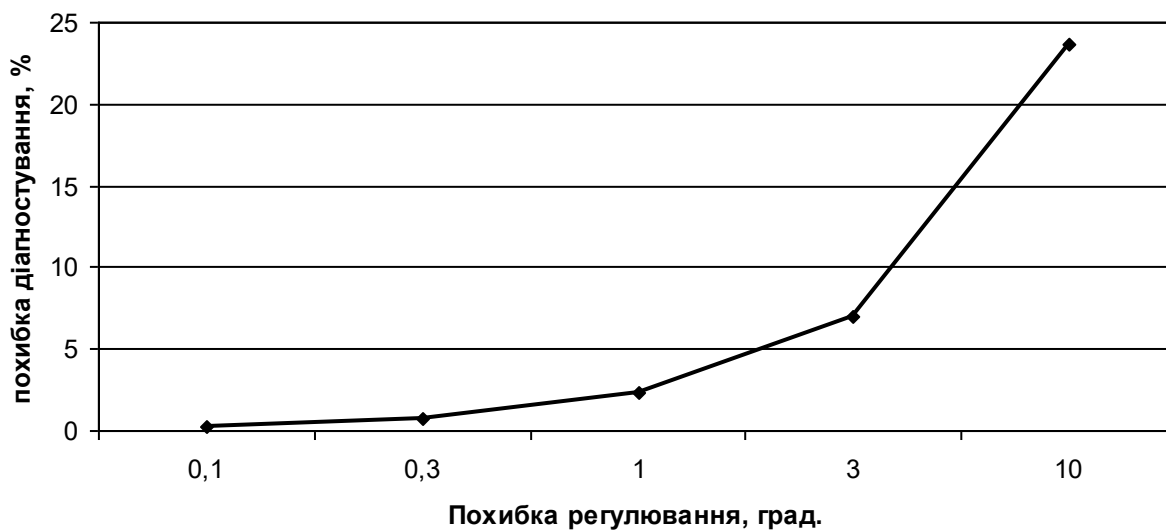


Рис. 3.8. Результати дослідження впливу на невиключену похибку визначення похибки ділянок головної ТП коефіцієнта  $K_{REG}$

На рис. 3.9 приведені результати дослідження впливу на невиключену похибку визначення похибки ділянок головної ТП індивідуальних відхилень процесу деградації від заданої моделі та коефіцієнта швидкості її наростання  $K_{DEG}$ . Як видно з рис. 3.9, аналогічно до результатів проведеного у § 2.5 дослідження оперативного методу визначення похибки головної ТП, збільшення коефіцієнта  $K_{DEG}$  мало впливає на невиключену похибку визначення похибки ділянок головної ТП.

На рис. 3.10 приведені результати дослідження впливу на невиключену похибку визначення похибки ділянок головної ТП випадкової похибки вимірювальної системи, тобто впливу коефіцієнта  $K_{VYP}$ .

Як видно з рис. 3.10, на відміну від результатів проведеного у § 2.5 дослідження оперативного методу визначення похибки головної ТП, збільшення коефіцієнта  $K_{VYP}$  незначно впливає на невиключену похибку визначення похибки ділянок головної ТП. Допустимі з огляду впливу на невиключену похибку визначення похибки ділянок головної ТП випадкові похибки вимірювальної системи становлять 5 ... 10 мкВ (включаючи вплив

завад нормального і загального виду), що вимагає створення відповідної виміральної системи.

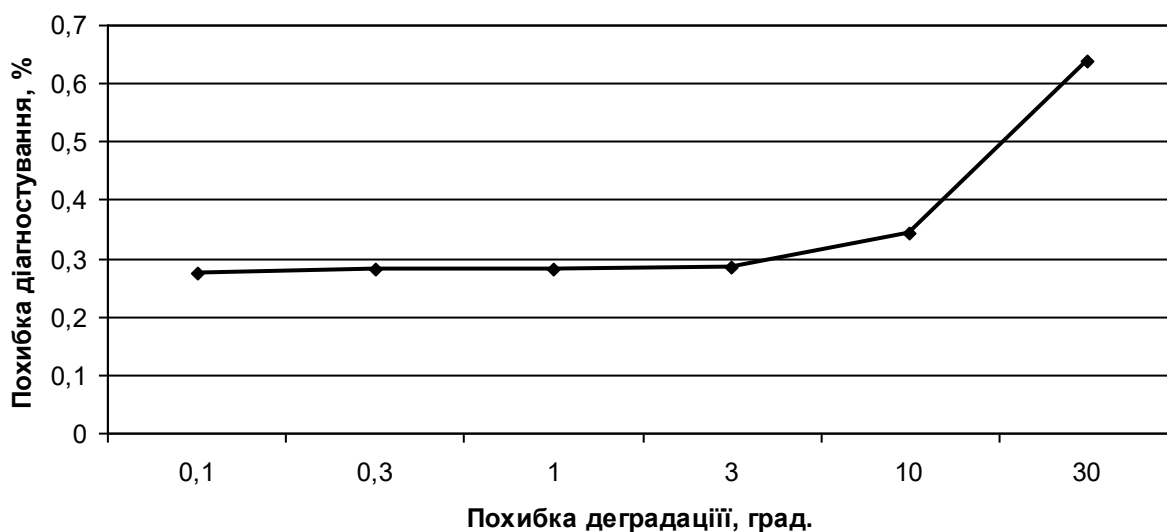


Рис. 3.9. Результати дослідження впливу на невиключену похибку визначення похибки ділянок головної ТП коефіцієнта  $K_{DEG}$

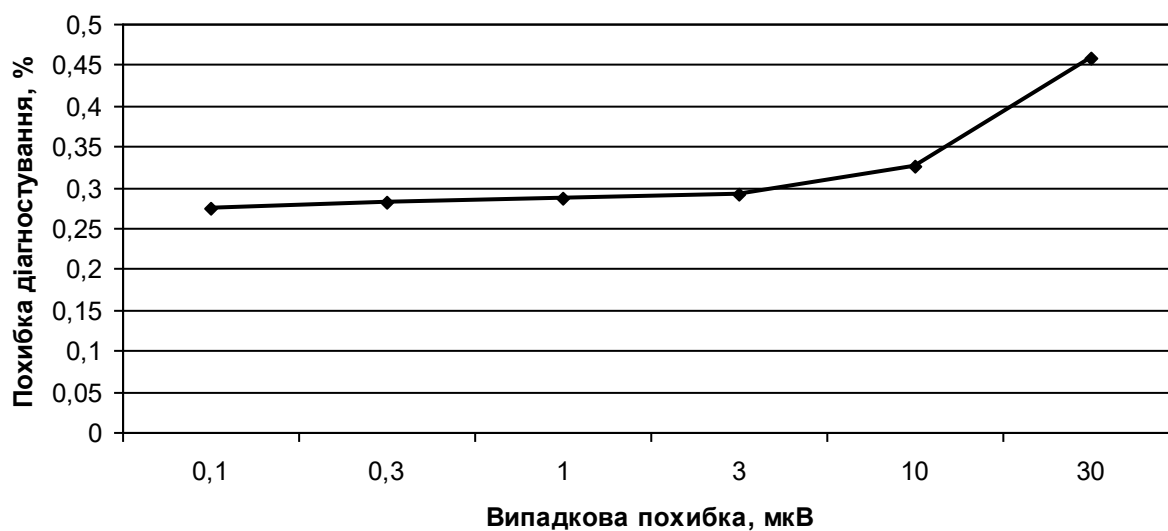


Рис. 3.10. Результати дослідження впливу на невиключену похибку визначення похибки ділянок головної ТП коефіцієнта  $K_{VYP}$

Таким чином, дослідження оперативного методу діагностування стану електродів головної ТП, що входить у склад ТЕП з КПТП, показали, що, на



відміну від дослідженого у другому розділі оперативного методу визначення поточної похибки ТП у цілому, досягнення високої точності діагностування можливе лише при використанні каналів регулювання значно вищої якості. Це вимагає створення відповідних методів регулювання. У той же час вимоги до вимірювальних каналів можуть бути зниженими.

У даному параграфі розроблено спрощену структуру метрологічного програмного тесту, який використано для дослідження оперативного методу діагностування стану ділянок електродів головної ТП, зокрема, впливу на невиключену похибку визначення похибки ділянок головної ТП похибок підсистем регулювання температури вздовж електродів цієї головної ТП, індивідуальних відхилень процесу деградації її ділянок та випадкової похибки вимірювальної системи. Показано, що оперативний метод діагностування стану ділянок електродів головної ТП вимагає високої якості системи керування профілем температурного поля для забезпечення високої точності діагностування.

### **3.6 Спеціалізований термоелектричний перетворювач з оперативним діагностуванням стану електродів**

Якщо необхідно проводити лише періодичне діагностування стану електродів ТП, можна використати конструктивно простіше технічне рішення, ніж розроблений у [133, 134] ТЕП з КПТП. Через те, що похибка визначення еквівалентного часу експлуатації у такому випадку може бути доволі велика, немає необхідності створювати та підтримувати зміни профілю температурного поля під час діагностики з високою точністю. У такому випадку можна значно спростити конструктивну схему ТЕП з КПТП – залишити, як це показано у [223], лише одну зону нагріву, температура якої контролюється (встановлюється) за допомогою однієї додаткової ТП.

Основну ідею такого ТЕП із оперативним самодіагностуванням (ТЕП із СД) пояснює рис. 3.12. Для проведення діагностування достатньо змінити заданим чином профіль температурного поля вздовж електродів ТП в зоні, яка

генерує основну термо-е.р.с. у зоні градієнту профілю температурного поля об'єкта вимірювання температури [223 - 228]. При цьому ширина зони зміни профілю температурного поля повинна охоплювати саме ті ділянки електродів ТП, для яких імовірність деградації є максимальною та саме вони генерують основну термо-е.р.с. Саме такий ТЕП із СД і показаний на рис. 3.12. Зона зміни профілю температурного поля охоплює майже всю зону градієнту, поза нею знаходяться ділянки, які експлуатуються при низьких температурах і тому деградують повільніше. Зміна профілю температурного поля в зонах, що знаходиться в рівномірному температурному полі, тобто генерують відносно малу термо-е.р.с., дозволяє оцінити стан тих ділянок електродів ТП, які мало впливають на її сумарну термо-е.р.с. Тому така оцінка не доцільна. Слід відзначити, що зміну профілю температурного поля, аналогічно до інших методів підвищення точності вимірювання температури, розроблених у другому та третьому розділах, проводять тоді, коли температура з'єднаних кінців ТП залишається постійною, що можна визначити за результатами вимірювання температури об'єкта іншими сенсорами, сталістю умов експлуатації, споживаної або генерованої потужності тощо.

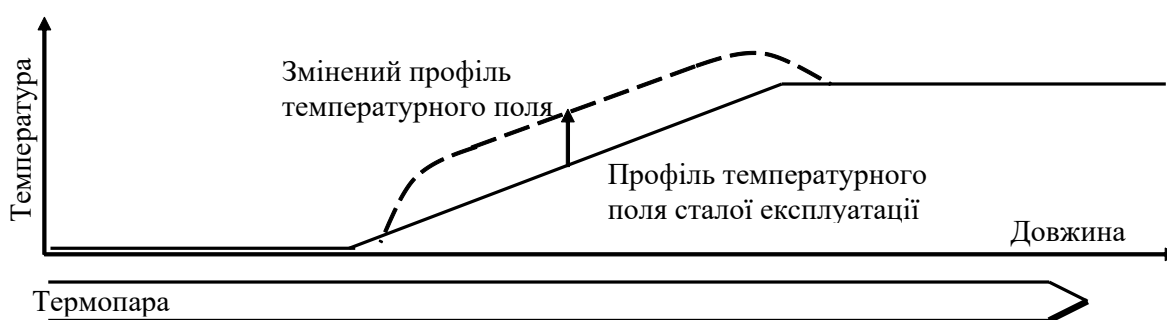


Рис. 3.12. Профілі температурного поля вздовж електродів ТП при діагностуванні їх стану

В результаті створеної зміни профілю температурного поля ті ділянки ТП, що генерують основну термо-е.р.с., змінять температуру. Якщо електроди ТП не деградували (тобто залишилися однорідні), то сумарна термо-е.р.с. ТП не зміниться [8, 188]. Якщо електроди ТП деградували (тобто мають значну

набуту в процесі тривалої експлуатації термоелектричну неоднорідність), то сумарна термо-е.р.с. ТП зміниться [122]. За значенням зміни генерованої ТП термо-е.р.с., як це показано у § 3.3, можна судити про еквівалентний час експлуатації ТЕП із СД [217, 225]. Тим самим можна орієнтовно (без врахування індивідуальних особливостей деградації ділянок ТП) оцінити похибки цього ТЕП із СД у даних умовах експлуатації за допомогою математичної моделі похибки однотипних ТП.

Зміну профілю температурного поля, показану на рис. 3.12, можна реалізувати також при використанні ТЕП з КПТП [133, 134]. Однак ТЕП з КПТП доволі складний, а з точки зору приблизного діагностування стану електродів ТП його конструкція явно надлишкова. Пропонований варіант діагностування електродів ТП доцільно реалізувати так, щоби максимально використати елементи існуючих ТЕП.

Конструктивна схема ТЕП із СД [223 - 228], що дає змогу реалізувати спрощений варіант методу діагностування ТП, подана на рис. 3.13. В склад розробленого ТЕП із СД входять основна ТП 1 та додаткова ТП 2, захисний металевий або керамічний чохол 3, чотирьохканальні ізоляційні втулки (буси) 4, одна з яких, 5, повинна мати довжину, що відповідає довжині зони градієнта профілю температурного поля об'єкта вимірювання температури (див. рис. 3.12). Також в склад ТЕП із СД (див. рис. 3.13) входять нагрівач 6, розміщений на поверхні втулки 5, і головка 7, яка має чотири контакти 8.

Коли температура об'єкта вимірювання (тобто злїоту ТП 1) залишається стабільною (і її зміни не передбачаються), вмикається нагрівач 6, що змінює профіль температурного поля вздовж електродів ТП 1 (див. штрихову лінію профілю температурного поля на рис. 3.12). Зміна профілю температурного поля контролюється в одній точці з допомогою ТП 2 (див. рис. 3.13). За відомою за результатами вимірювання ТП 2 зміною температури для відповідної до злїоту ТП 2 ділянки можна визначити приблизні зміни температури інших ділянок. Для цього можна використати аналітичний розв'язок рівняння теплопровідності вздовж корпусу ТЕП або результати

експериментальних досліджень макетного взірця такого ТЕП із СД на етапі його проектування. Далі отримані значення температури  $T_{Di}$  використовують при опрацюванні результатів діагностування за методикою, викладеною у § 3.4. Наявність тільки одного нагрівача та однієї додаткової ТП суттєво спрощує розроблений ТЕП із СД порівняно з ТЕП з КПТП [133, 134], але дозволяє діагностувати стан електродів ТП з достатньою для більшості випадків точністю.

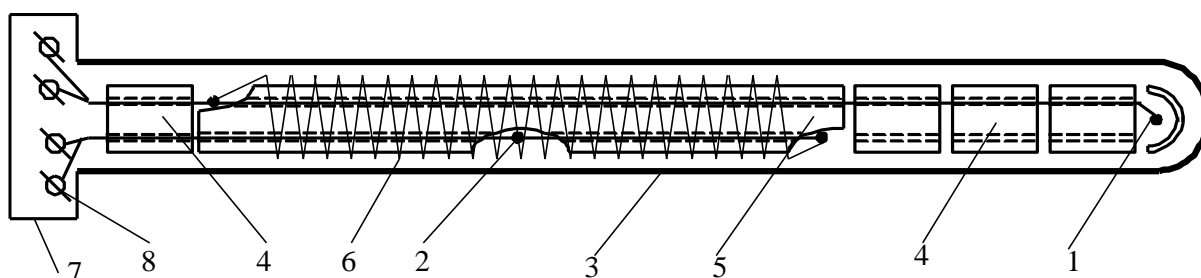


Рис. 3.13. Конструктивна схема розробленого ТЕП із спрощеним діагностуванням стану електродів ТП

Для створення можливості використання у ТЕП із СД максимальної кількості деталей серійних ТЕП вузол нагрівача 6 можна виконати як напилене покриття (металом або сплавом) однієї ізоляційної втулки (буси) 5 (рис. 3.14), яка, для усунення необхідності створення контактів між різними втулками, виконана, згідно з рис. 3.13, достатньо довгою (такі довгі втулки широко використовуються при виготовленні серійних ТЕП). Залежно від потрібного опору нагрівача 6 напилення може бути суцільним або, з допомогою маски, використаної при напиленні, сформоване у вигляді спіралі (спіраль може бути сформована також шляхом прорізання суцільного напиленого шару, аналогічно, як це робиться при виготовленні метало-плівкових резисторів).

Для розміщення з'єдну додаткової ТП 2 у центрі нагрівача у втулці 5 (після напилення нагрівача 6) зроблено виріз (рис. 3.14), що відкриває два канали втулки 5. Саме в ці канали протягують електроди ТП 2, електроди ТП 1 протягують в канали, не відкриті вирізом в центрі втулки 5. Вирізи роблять також на кінцях втулки 5 (до напилення), при цьому торці втулки 5 захищають

від напilenя. Виводи нагрівача 6 підключають до з'єдн. ТП 2 (для чого до її з'єдн. приварюють відповідний провідник або продовжують один з її електродів) та до одного з електродів ТП 1 (для чого до нього приварюють відповідний провідник). Підключення плівкових виводів нагрівача 6 до електродів може бути здійснене шляхом зварювання, пайки високотемпературним припоєм або напilenя нагрівача 6 на втулку 5, на якій вже закріплені дротові або стрічкові виводи нагрівача 6. Нагрівач 6 виявляється підключеним між електродами ТП 1 і ТП 2.

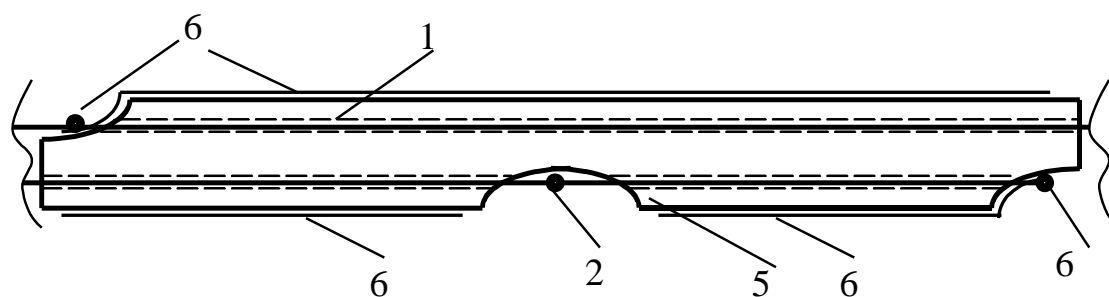


Рис. 3.14. Конструктивна схема вузла нагрівача ТЕП із СД

Таким чином, крім вузла, пов'язаного з втулкою 5, решта деталей розробленого ТЕП із СД повністю відповідають деталям серійних ТЕП.

Схема ввімкнення розробленого ТЕП із СД приведена на рис. 3.15. Як видно з цієї схеми, підключення нагрівача 6 між основною 1 та додатковою 2 ТП дало змогу зменшити кількість контактів розробленого ТЕП до чотирьох. Такі чотирьохконтактні головки ТЕП використовуються в ТЕП з подвійними термопарами. Розділення комутаторів на вимірювальний і силовий викликане різними вимогами до них. Вимірювальний комутатор має забезпечити малу паразитну термо-е.р.с. при перемиканні ТП 1 і ТП 2. При цьому струм у колі близький до нуля. А силовий комутатор має забезпечити пропускання струму нагрівача 6. Також він повинен надійно відділити вимірювальне коло від силового, для усунення шунтування вимірювальних каналів.

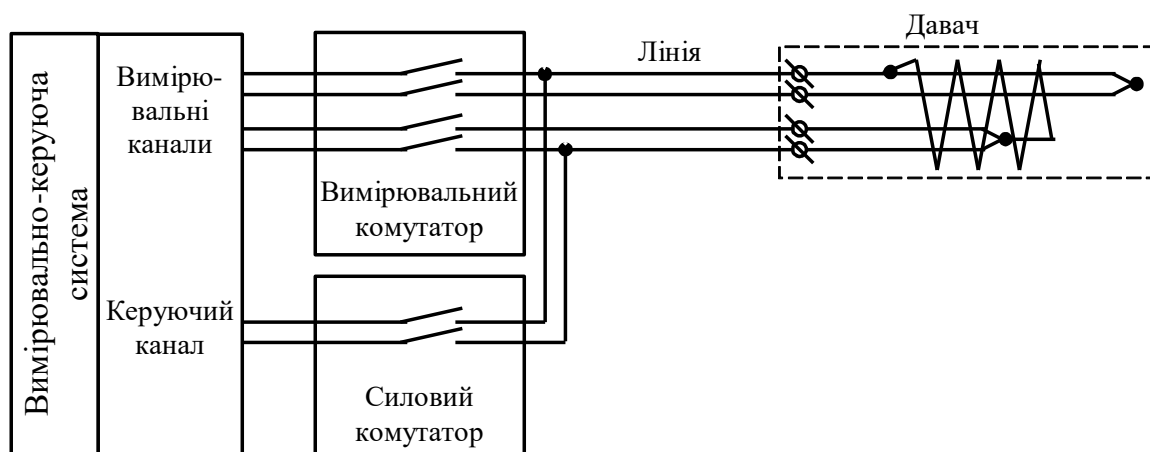


Рис. 3.15. Схема підключення ТЕР із СД до вимірювально-керуючої системи

Слід відзначити, що вимірювально-керуюча підсистема (рис. 3.15) повинна мати достатню обчислювальну потужність для того, щоби визначити еквівалентний час експлуатації ТЕР.

Похибка від дрейфу ФП ТП  $\Delta E^{DR}$  (математична модель похибки ТП), одержана при експериментальних дослідженнях однотипних ТП в аналогічних умовах експлуатації, описується функцією виду

$$\Delta E^{DR} = \sum_{i=1}^n \Delta E_i^{DR} = \sum_{i=1}^n f_i(T_{Ei}, \Delta T_{Di}, \tau_{Ei}), \quad (3.28)$$

де  $i = \overline{1, n}$  – номер ділянки, на які умовно розбита ТП (згідно із [104], умовою розбиття є настільки мала різниця дрейфів ФП ТП для температур кінців ділянок, що цією різницею можна нехтувати);  $T_{Ei}$  – температура експлуатації  $i$ -тої ділянки ТП;  $T_{Di}$  – температура, в якій  $i$ -та ділянка опинилася після зміни профілю температурного поля,  $\Delta T_{Di} = T_{Ei} - T_{Di}$ ;  $\tau_{Ei}$  – фізичний час експлуатації ділянок, у даному випадку ТП в цілому.

Прийmemo, що у результаті зміни профілю температурного поля отримано експериментальне значення зміни генерованої ТП термо-е.р.с.  $\Delta E_{TP}^{NEOD}$ , викликане термоелектричною неоднорідністю її електродів (якщо би електроди були однорідними, то зміна  $\Delta E_{TP}^{NEOD}$  була би близькою до нуля, такий результат можна отримати на початку експлуатації ТП, коли її

електроди ще практично однорідні). Для даних умов експлуатації, за допомогою математичної моделі дрейфу ФП ТП (3.28), також обчислимо, теоретичне значення цієї зміни  $\Delta E_{MM}^{NEOD}$ , що відповідає новим значенням  $T_{Ei}$  та  $T_{Di}$  (в цьому випадку  $T_{Di} \neq T_{Ei}$ ). Якщо температура зльоту ТП 1 залишається сталою (це можна проконтролювати, як вказано вище, за попереднім і наступним станом об'єкта, станом керуючої дії, яку формує регулятор температури об'єкта або за результатами вимірювань іншими сенсорами температури об'єкта), то зміну генерованої ТП термо-е.р.с.  $\Delta E_{TP}^{NEOD}$  можна повністю віднести до прояву похибки неоднорідності ТП 1.

Як відомо з [122, 188] та показано у першому і другому розділах, похибки неоднорідності та часового дрейфу є проявами одного і того ж явища (деградації електродів ТП), крім того, вони можуть бути обчислені за (3.28). При обчисленні часового дрейфу слід прийняти  $T_{Di} = T_{Ei}$ , а змінною буде час експлуатації  $\tau_{Ei}$ . При обчисленні похибки від набутої неоднорідності для деякого фіксованого часу  $\tau_E = const$ , який відповідає моменту зміни профілю температурного поля, слід враховувати, що  $\Delta T_{Di} \neq 0$ .

Таким чином, в ідеальному випадку, повинна виконуватися рівність

$$\Delta E_{TP}^{NEOD} = \sum_{i=1}^n f_i(T_{Ei}, \Delta T_{Di}, \tau_{Ei}) - \sum_{i=1}^n f_i(T_{Ei}, 0, \tau_{Ei}) . \quad (3.29)$$

Якщо рівність (3.29) справджується, то це означає, що ТЕП, діагностування електродів ТП якого проводиться, експлуатується в умовах, які в цілому відповідають умовам дослідження однотипних ТЕП, тому його еквівалентний час експлуатації практично рівний фізичному, а його похибки визначаються моделями, побудованими за результатами експериментальних досліджень. Однак частіше рівність (3.29) не справджується, що означає відмінність або умов експлуатації цього ТЕП від умов досліджень однотипних ТП, або індивідуальних властивостей його ТП від досліджуваних. В обох випадках слід знайти такий еквівалентний час  $\tau_{EKV}$  експлуатації ТЕП із СД (точніше його чутливого елемента – ТП 1), який відповідав би (з точки зору

ступеня деградації електродів ТП 1) часу експлуатації досліджуваних ТП (а значить і похибки цієї ТП відповідали би похибкам досліджуваних ТП). Умову, що дозволяє визначити  $\tau_{EKV}$ , можна сформулювати наступним чином

$$\Delta E_{TP}^{NEOD} - \sum_{i=1}^n f_i(T_{Ei}, \Delta T_{Di}, \tau_{EKV}) - \sum_{i=1}^n f_i(T_{Ei}, 0, \tau_{EKV}) \rightarrow 0. \quad (3.30)$$

Значення  $\tau_{EKV}$  з умови (3.30) може бути знайдене довільним способом. Якщо функції  $f_i$  задані аналітично та є неперервними та однорідними, доцільне аналітичне знаходження  $\tau_{EKV}$ . В іншому випадку можна застосувати довільні чисельні методи (поділу відрізка навпіл, Ньютона, хорд тощо [227]). Слід відзначити, що похибка визначення  $\tau_{EKV}$ , по відношенню до похибки вимірювання температури, є похибкою другого порядку малості, тому висока точність його знаходження не потрібна.

Знаючи еквівалентний час  $\tau_{EKV}$  експлуатації ТП можна визначити за допомогою математичної моделі похибки ТП відповідні до цього часу, максимальні межі дрейфу ФП ТП та максимальну похибку від набутої термоелектричної неоднорідності при характерних для даного об'єкта вимірювання змінах профілю температурного поля. При цьому зміни профілю температурного поля експлуатації, характерні для даних умов експлуатації ТЕП, можна оцінити за результатами вимірювання температури за допомогою ТП 2. Також, знаючи еквівалентний час  $\tau_{EKV}$  експлуатації ТП можна прийняти обґрунтоване рішення про заміну ТЕП в цілому або (при можливості), лише його ТП 1. Також, при визначенні еквівалентного часу експлуатації у декількох профілях температурного поля (при різних потужностях нагрівача б, тобто при різних температурах нагріву, які фіксуються ТП 2) можна оцінити адекватність використовуваної моделі похибки згідно із методикою, викладеною у § 3.4.

Як видно із представлених конструктивних схем, розроблений ТЕП із СД має нескладну конструкцію, використовує більшість деталей та конструктивних вузлів існуючих ТЕП (є лише один нестандартний вузол –



нагрівач б), але забезпечує діагностування стану електродів своєї ТП 1. При цьому не використовуються робочі еталони (висока метрологічна автономність), єдиною умовою проведення діагностування є сталість температури об'єкта вимірювання на час його проведення (для ТП з діаметром електродів до 1,2 мм – 20 ... 25 хвилин). ТЕП із СД може бути використаний і у керуючих системах, для яких зміна термо-е.р.с. ТП під час діагностування (за рахунок прояву похибки від набутої термоелектричної неоднорідності) не викличе аварійних ситуацій. При цьому можливе встановлення обмежень на максимальну зміну цієї термо-е.р.с., тобто встановлення відповідного критерію заміни ТЕП або ТП в його складі.

Тому ТЕП із СД може бути широко використаний для підвищення метрологічної надійності систем вимірювання температури різноманітних термоагрегатів, особливо тих, ТЕП яких працюють в складних, слабо вивчених умовах, при наявності агресивних речовин, які можуть відносно швидко змінити ФП ТП. В цих умовах розроблений метод діагностування електродів ТП може значно підвищити метрологічну надійність вимірювальних і керуючих систем.

З викладеного можна зробити висновок, що простота конструкції ТЕП із СД отримана за рахунок ускладнення опрацювання результатів діагностування. Визначення еквівалентного часу експлуатації вимагає вирішення наступних задач:

1. Побудови достатньо повної та точної математичної моделі похибки ТЕП, точніше електродів ТП, як функції дії впливаючих величин. Це вимагає виявлення результатів дослідження залежності похибки електродів ТП від різних впливаючих величин (або проведення відповідних експериментальних досліджень) та їх об'єднання в спільну базу даних. Далі необхідно розробити методи узагальнення цих даних та побудови математичних моделей, що відбивають залежності похибки електродів ТП від потрібних впливаючих величин (тих, що діють в даному місці експлуатації ТЕП із СД).

2. Розроблення методів достатньо точного опису зміни профілю температурного поля (див. рис. 3.12) за відомими потужністю нагрівача (або енергією, що поступила на нагрівач), отриманою від цього зміною температури в одній точці (ця зміна визначається ТП 2, див. рис. 3.13), та конструкцією ТЕП (розмірами елементів, що входять в ТЕП і впливають на зміну профілю температурного поля, матеріалами, з яких ці елементи виготовлені та параметрами цих матеріалів).
3. Методики обчислення еквівалентного часу експлуатації ТЕП розробленим методом на основі результатів, отриманих при виконанні пп. 1, 2.
4. Оцінки похибки визначення еквівалентного часу експлуатації ТЕП розробленим методом. Через відносно малу чутливість відомих ТП (від 10 до 70 мкВ/°С) точність визначення змін термо-е.р.с. ТП під дією впливаючих величин невисока, тому похибка визначення еквівалентного часу експлуатації ТЕП може бути досить велика. Можливо аналітичні обчислення змін профілю температурного поля при нагріві (при реалізації п. 2) не дозволять визначити ці зміни достатньо точно (щоби отримати прийнятну похибку визначення еквівалентного часу експлуатації ТЕП), тоді необхідно розробити методику проведення відповідних експериментальних досліджень.

У даному параграфі розроблено конструктивну схему спеціалізованого ТЕП із СД і структурну схему відповідної системи, які дають змогу реалізувати оперативний метод діагностування стану електродів його ТП без використання робочого еталону.

### 3.7 Висновки до третього розділу

1. Проведені шляхом аналізу теплових процесів аналітична оцінка методичної похибки, викликаной впливом тепла Джоуля і визначення впливу тепла Пельтьє на розподіл температури вздовж електродів ТП дали змогу визначити умови, за яких доцільно використовувати оперативний метод діагностування стану електродів ТП на базі ефекту Пельтьє.
2. Розроблені теоретичні основи методу діагностування стану електродів ТП у процесі експлуатації без використання робочого еталону шляхом визначення поточних значень похибок їх окремих ділянок від дрейфу ФП та від набутої термоелектричної неоднорідності показали доцільність визначення узагальненого критерію оцінки стану електродів ТП.
3. Як узагальнений критерій оцінки стану електродів ТП обґрунтовано вибір індивідуального еквівалентного часу експлуатації всіх віртуальних ділянок, на які розбито електроди ТП.
4. Розроблено оперативний метод визначення еквівалентного часу експлуатації ТП в цілому  $\tau_{EKV}$  або її ділянок  $\tau_{EKVi}$  як комплексної оцінки їх стану, що дає змогу визначити їх місце у загальній математичній моделі змін ФП ТП, побудованій на базі результатів експериментальних досліджень однотипних ТП у аналогічних умовах експлуатації. У такому випадку еквівалентний час експлуатації  $\tau_{EKV}$  ТП у цілому або еквівалентний час експлуатації  $\tau_{EKVi}$  віртуальних ділянок, на які розбита ТП, дає змогу більш надійно оцінити похибки, що можуть виникнути у даних умовах при подальшій експлуатації ТП та забезпечити кращі умови обґрунтованого вирішення питання про доцільність або необхідність заміни ТП або ТЕП у цілому.
5. Дослідження впливу впливаючих величин на невиключену похибку визначення еквівалентного часу експлуатації ділянок головної ТП розробленим оперативним методом діагностування стану ділянок її електродів, за допомогою розробленого спрощеного метрологічного

програмного тесту, показало максимальний вплив похибок підсистем регулювання температури вздовж електродів цієї головної ТП. Це показало необхідність розроблення відповідного методу регулювання.

6. Розроблено конструктивну схему спеціалізованого ТЕП із СД, що використовує лише один нестандартний вузол, і структурну схему відповідної системи, які дають змогу реалізувати оперативний метод діагностування стану електродів його ТП без використання робочого еталону.

## Розділ 4. РЕАЛІЗАЦІЯ МЕТОДІВ ОПЕРАТИВНОГО МЕТРОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИМІРЮВАННЯ ПІДВИЩЕНИХ ТЕМПЕРАТУР

### 4.1 Піч з керованим профілем температурного поля

Розроблена у [133 - 135] конструкція ТЕП з КПТП повністю виконує всі вимоги щодо формування заданого профілю температурного поля вздовж електродів його головної ТП. Але така конструкція доволі складна, вона не передбачає заміни головної ТП в складі ТЕП з КПТП після того, коли ТП вичерпає свій ресурс роботи (похибка стане надто великою або пройде обрив її електродів). Крім того – не можна використовувати стандартизовані ТЕП.

У [257 - 261] ТЕП з КПТП функціонально розділено на дві частини – сам ТЕП, що вимірює температуру об'єкта, і піч, яка реалізує керування профілем його температурного поля. Така конструкція простіша, можна використати стандартизовані ТЕП, які замінюють при потребі. Для усунення впливу змін градієнту температурного поля об'єкта на профіль температурного поля цього стандартизованого ТЕП, ця піч (див. рис. 2.10) мусить розміщуватися в зоні градієнту температурного поля об'єкта, тобто в стінці об'єкта і кріпитися, наприклад, фланцем до стінки об'єкта. Сам стандартизований ТЕП має проходити через таку піч.

Однією з проблем при конструюванні печі є розміщення виводів. Якщо базуватися на конструктивній схемі ТЕП з КПТП, розробленій у [133 - 135], то виводи всіх нагрівачів та вільні кінці ТП, що контролюють температуру окремих зон, мусять бути виведені на зовнішній торець циліндричного корпусу печі та підпаяні до відповідного роз'язтя. Тоді розміщення великої кількості високотемпературних ізоляторів вимагає відносно великої площі, тобто нераціонального збільшення діаметра печі.

Радикально зменшити кількість виводів можна сумістивши нагрівачі з сенсорами (ТП) температури зон нагріву печі з [257 - 261]. Таке суміщення досягається шляхом виконання циліндричного спірального нагрівача печі із

сплаву, що відповідає одному з електродів ТП – сенсорів температури зон (наприклад, з алюмелю). Відводи нагрівача, що ділять нагрівач на окремі секції, виконують із сплаву, що відповідає іншому електроду ТП (наприклад, хромелю). Таким чином поєднуємо нагрівачі та сенсори температури його зон. За рахунок суміщення різко зменшується необхідна кількість виводів печі. Якщо прийняти кількість зон за  $n$ , то для ТЕП з КПТП [133] потрібно  $4n$  виводів, а для багатозонної печі –  $n + 2$  виводів. Наприклад, при 8-ми зонах, для ТЕП з КПТП [133] потрібно 36 виводів, а для багатозонної печі – 10 виводів. Крім того, конструкція багатозонної печі спрощується за рахунок відсутності сенсорів температури зон та елементів їх кріплення.

Конструкцію багатозонної печі з керованим профілем температурного поля пояснює рис. 4.1 [257 - 261]. Циліндричний спіральний нагрівач 1 виконано, наприклад, з алюмелю, а його відводи 2 – з хромелю (нагрівач разом з кожним відводом, представляє собою ТП типу ХА). Виводи нагрівача та відводів розміщені з однієї сторони корпусу печі 3 – на торцевій стінці 4.

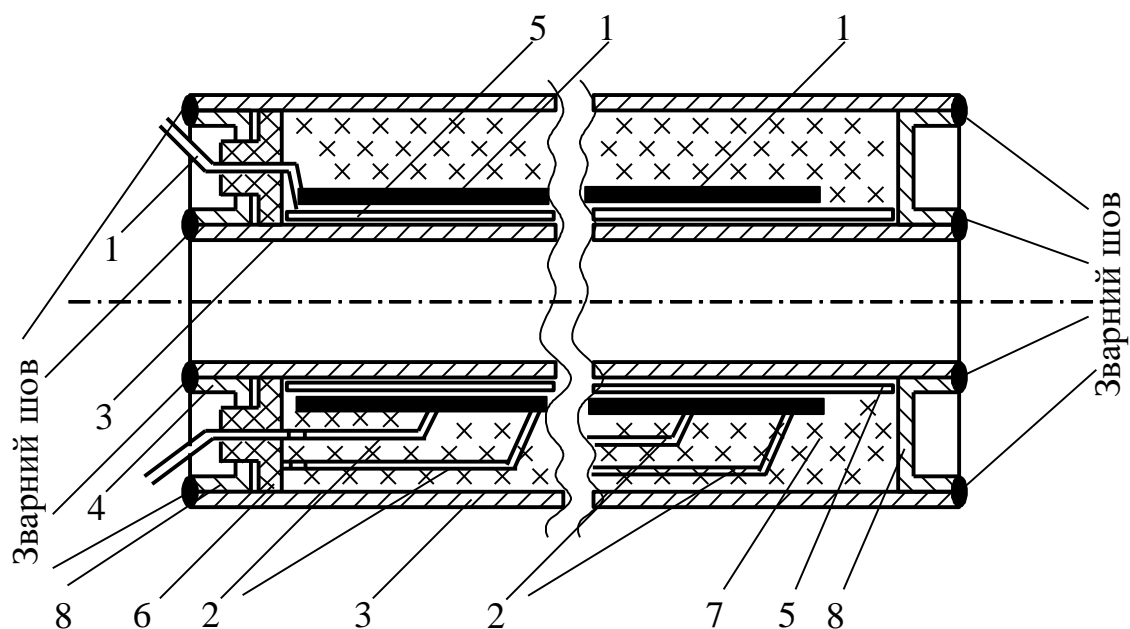


Рис. 4.1. Конструкція багатозонної печі з керованим профілем температурного поля

Циліндричний спіральний нагрівач 1 вимагає ізоляції від корпусу печі.

Її забезпечує тонкостінний (стінки 1 ... 2 мм) керамічний циліндр 5, на який нагрівач 1 одягається з легким натягом. Натяг забезпечують намотуванням нагрівача 1 на циліндричну оправку меншого на 1 ... 2 мм діаметру, ніж циліндр 5 і одягають на циліндр 5 шляхом пружного "розкручування".

Виводи нагрівача 1 і його відводи 2 ізольовані від корпусу печі 3 за допомогою керамічних втулок 6 грибовидної форми, причому їх зміщення відносно корпусу печі 3 обмежено керамічним циліндром 5 і стінкою 4. При роботі витки нагрівача 1 не можуть зміщуватися – виводи і відводи нагрівача 1 зігнуті перед і після проходження через втулки 6 (рис. 4.1). Тому нагрівач 1 при нагріві обмежено зміщується вздовж витків його спіралі (теплоізоляція 7 сипка, пудра окису алюмінію або кремнію) але не торкається корпусу печі 3.

При складанні печі доцільний такий порядок (див. рис. 4.1):

- 1.Приварюють до внутрішньої трубчатої стінки печі 3 ліву кришку 4.
- 2.Вставляють у кришку 4 втулки 6.
- 3.Одягають з натягом на керамічний циліндр 5 нагрівач 1, який має тільки перший раз зігнуті виводи та відводи.
- 4.Одягають циліндр 5 з нагрівачем 1 і відводами 2 на вузол, отриманий в п. 1, потрапляючи виводами та відводами в отвори втулок 6.
- 5.Згинають виводи нагрівача 1 і його відводи 2 другий раз.
- 6.Герметизують втулки 6 з допомогою високотемпературної емалі.
- 7.Одягають на вузол, отриманий в результаті виконання п. 5, зовнішню трубчатую стінку печі 3 та приварюють її до лівої кришки 4.
- 8.Засипають і ущільнюють теплоізоляційний порошок 7.
- 9.Встановлюють праву кришку 8 та приварюють її.
10. Кріплять до корпусу 3 печі роз'язття (на рис. 4.1 не показане) та припаюють до його контактів виводи нагрівача 1 та його відводи 2.

Як видно з цього переліку операцій, він не містить складних, рідко вживаних та дорогих операцій. Фотографія макета печі подана на рис. 4.2. Виводи нагрівача 1 та його відводи 2 через комутатор підключають до входів і виходів багатоканальної вимірювально-керуючої системи (рис. 4.3).



Рис. 4.2. Загальний вигляд макета багатозонної печі

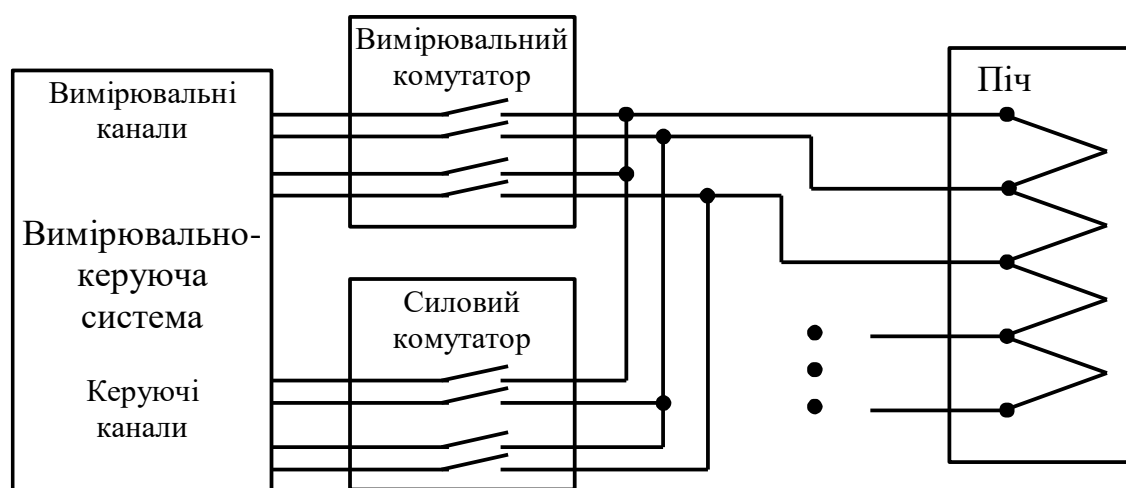


Рис. 4.3. Схема підключення багатозонної печі

У схемі рис. 4.3 до ключів, які підключають нагрівач 1 та його відводи 2, ставляться різні вимоги. Ключі, що підключають ТП до входів системи, доцільно виконати на герконових реле з додатковими термовирівнювачами [52, 233, 234] для забезпечення малої паразитної термо-е.р.с. Ключі, що підключають нагрівач 1 та його відводи 2 до виходів керуючих каналів мають забезпечити струм нагрівачів при нагріві та малий паразитний струм витoku при вимірюванні. Їх доцільно виконати на електромагнітних реле.

В зв'язку з тим, що створені нагрівачем 1 і відповідними відводами 2 злоти ТП (сенсори температури окремих зон) знаходяться на границях цих зон (вимірюють температуру не в центрі зони, а температуру на межі суміжних



зон), керування профілем температурного поля багатозонної печі має деякі особливості. Якщо керуючі канали реалізують традиційні закони регулювання, то температуру центрів зон можна з достатньою для вимог багатозонної печі точністю визначити як середню температуру на межах зон. Якщо використати нейромережеві методи керування [262], то при навчанні НМ врахує положення сенсорів температури.

Слід відзначити, що ТЕП з КПТП, варіант якого був досліджений у [133], не міг реалізувати розроблені оперативні методи визначення похибки та діагностування ТП через обмежені зміни профілю температурного поля. Для реалізації цих методів розроблена багатозонна піч повинна забезпечити, у першу чергу, можливість створення відповідної температури своїх зон та прийнятний час реалізації розроблених оперативних методів. Для цього вона має мати необхідну потужність нагрівачів і відповідну систему регулювання.

Максимально необхідну потужність [263] нагрівачів  $H_1 - H_n$  можна приблизно оцінити прийнявши, що зона, в якій вони знаходяться, є безконечним циліндром, який має сталі температури внутрішньої  $t_1$  (температура, яку утримують нагрівачі) та зовнішньої  $t_2$  (температура оточуючого середовища) стінок. Тоді, згідно із [229, 232], можна записати

$$Q = -F\lambda \frac{dt}{dr} = -2\pi r l \lambda \frac{dt}{dr}, \quad (4.1)$$

де  $Q$  – тепловий потік через бокову поверхню циліндра;  $F$  – площа бокової поверхні циліндра на одиницю довжини  $l$ ;  $r$  – радіус циліндра;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу циліндра.

Щодо багатозонної печі, то матеріал циліндра – це шар теплоізоляції, що покриває нагрівачі. Температури  $t_1$  та  $t_2$  пов'язані співвідношенням

$$t_1 - t_2 = \Delta t, \quad (4.2)$$

де  $\Delta t$  – максимальна зміна температури, яку повинні реалізувати нагрівачі каналів керування ТЕП з КПТП.

Згідно із [229, 232, 250, 263], одним з рішень диференціального рівняння (4.1) буде залежність погонного теплового потоку через зовнішню стінку

циліндра (відношення  $Q$  до  $l$ ), яку можна визначити як

$$\frac{Q}{l} = \frac{\pi(t_1 - t_2)}{\frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_1}{d_2}} = \frac{2\pi\lambda\Delta t}{\ln \frac{d_1}{d_2}}, \quad (4.3)$$

де  $d_1$  і  $d_2$  – зовнішній та внутрішній діаметри циліндра,  $\lambda = 0,15 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ .

Виходячи з вищенаведеного можна записати

$$d_1 - d_2 = 2h, \quad (4.4)$$

де  $h$  – товщина шару теплоізоляції нагрівачів ТЕП з КПТП.

Залежності (4.1) – (4.4) дають змогу обчислити погонний тепловий потік, необхідний нагрівачам зон для реалізації необхідної зміни температури вздовж електродів головної ТП. Тепловий потік рівний потужності нагрівача зони. Залежності погонної потужності нагрівачів (Вт) від максимальної зміни температури ( $^{\circ}\text{C}$ ) для різної товщини теплоізоляції (м) представлено на рис. 4.4 [263]. Як видно з рис. 4.4, потужність нагріву до 1 кВт/м потрібна при тонкому шарі теплоізоляції (до 1,5 см) і змінах профілю температурного поля, що відповідають максимальній вимірюваній температурі до 1100  $^{\circ}\text{C}$ .



Рис. 4.4. Залежності максимальної погонної потужності нагрівачів ТЕП з КПТП від максимальної зміни температури та товщини шару теплоізоляції

Для прямого застосування ТЕП з КПТП (стабілізація профілю температурного поля) зміни температури не перевищують 30 - 50 $^{\circ}\text{C}$ , а довжина зони одного нагрівача не повинна перевищувати 0,1 – 0,2 м [133, 134]. Тоді

максимальна потужність нагрівачів зон не буде перевищувати 20 – 50 Вт, що цілком прийнятно.

Для розроблених оперативних методів визначення похибки головної ТП і діагностування стану її електродів у процесі експлуатації характерні зміни профілю температурного поля близькі до вимірюваної температури. Для конструювання багатозонної печі треба узгодити параметри нагрівачів (матеріал і діаметр провідників) з потрібною потужністю, точніше напругою та струмом. Тому визначимо опір  $R$  нагрівача багатозонної печі [251]

$$R = \rho L / S \quad , \quad (4.5)$$

де  $\rho$  – питомий опір хромелю ( $\rho \approx 0,65 \text{ Ohm} \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$ ) або алюмелю ( $\rho \approx 0,4 \text{ Ohm} \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$ );  $L$  – довжина провідника;  $S$  – площа його перерізу.

В свою чергу для багатозонної печі можна записати

$$L = n \cdot \pi \cdot d_2 \quad , \quad S = \pi \cdot d_p^2 / 4 \quad , \quad (4.6)$$

де  $n$  – кількість витків нагрівача,  $n$  можна визначити як  $n = l / (d_p + w)$ ;  $d_p$  – діаметр провідника нагрівача;  $l$  – довжина однієї секції нагрівача;  $w$  – товщина ізоляції провідника нагрівача (при суцільному намотуванні) або відстань між провідниками (при намотуванні з примусовим кроком).

Якщо підставити (4.6) у (4.5), отримаємо

$$R = 4\rho \frac{l \cdot d_2}{d_p^2 (d_p + w)} \quad . \quad (4.7)$$

Для макета, описаного та дослідженого в [248, 249], маємо  $d_2 = 0,02 \text{ m}$ ,  $l = 0,1 \text{ m}$ ,  $d_p = 0,5 \text{ mm}$ ,  $w = 0,5 \text{ mm}$ ,  $\rho \approx 0,65 \text{ Ohm} \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$  (хромель [27]). Підставивши ці дані в (4.7), отримаємо  $R \approx 20 \text{ Ohm}$ . Для зміни температури на  $800^\circ\text{C}$ , згідно із рис. 4.4, при товщині теплоізоляції макета 20 мм, потрібна максимальна потужність нагрівачів до 500 Вт/м, тобто 50 Вт на одну зону. Тому максимальний струм нагрівача буде близько 1,6 А, а напруга живлення близько 32 В. Отримані дані прийнятні для практичного використання.

Очевидно, що для великих термоагрегатів, зокрема, печей потужних

теплових електростанцій, такі та навіть більші потужності прийнятні, вони не викличуть спотворення їх функціонування. А для малих термоагрегатів слід вирішувати окремо узгодження такого ТЕП з об'єктом вимірювання. Зменшити напруги і струми нагрівачів можна збільшенням товщини або якості теплоізоляції, як це показано на рис. 4.5 і 4.6.

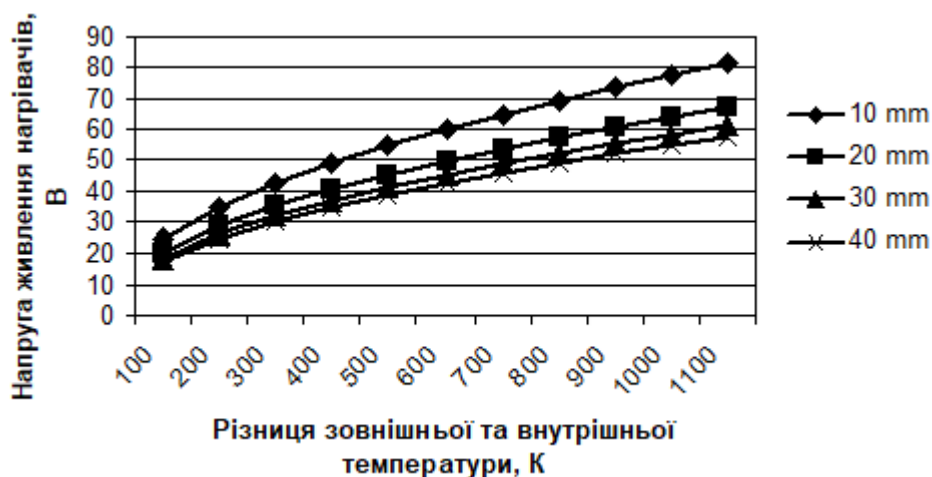


Рис. 4.5. Залежність необхідної напруги живлення нагрівача від товщини теплоізоляційного шару (мм)

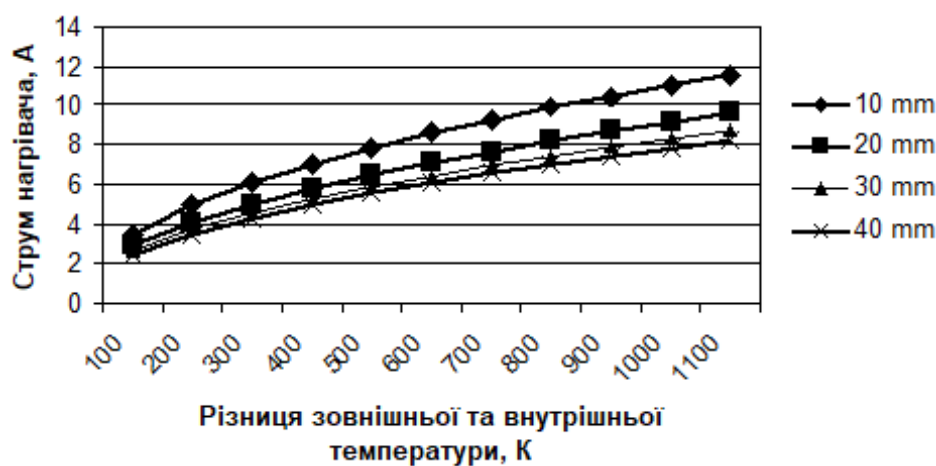


Рис. 4.6. Залежність необхідного струму нагрівача від товщини теплоізоляційного шару (мм)

Як було вказано на початку параграфу, для систем, що використовують розроблені оперативні методи визначення похибки та діагностування ТП, важливим є також час нагріву та охолодження зон печі. Конструктивна схема нагрівачів печі [133, 134], де представлені лише ті елементи, що впливають на

тривалість нагріву-охолодження, представлена на рис. 4.7. На трубчатому корпусі печі намотані секції нагрівачів зон  $H_1 \dots H_N \dots H_K$ .

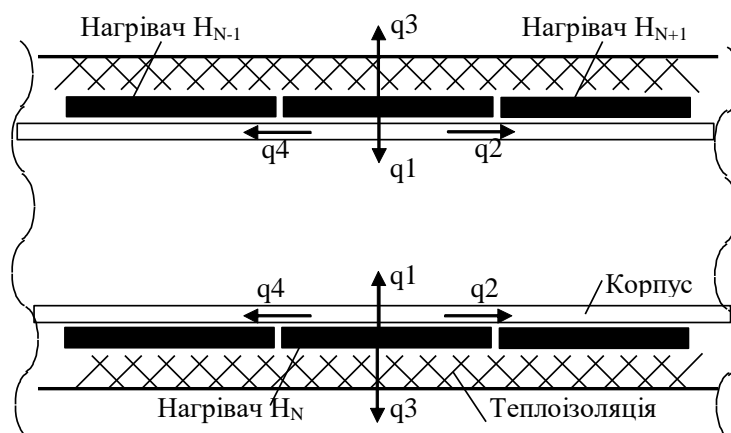


Рис. 4.7. Конструктивна схема нагрівачів ТЕП з КІТТ

З рис. 4.7 видно, що кожен нагрівач створює чотири теплові потоки:

1.  $q_1$ , спрямований до центра печі. Тут  $q_1$  є корисним, якраз він створює заданий профіль температурного поля вздовж термоелектродів ТП;
2.  $q_3$ , протилежний до  $q_1$ , спрямований назовні печі.  $q_3$  визначає теплові втрати, тому його інтенсивність зменшена за допомогою теплоізоляції;
3.  $q_2$  і  $q_4$ , спрямовані до наступної та попередньої зони нагрівача.

Теплові потоки  $q_1$ ,  $q_2$ ,  $q_4$  нагрівають сам ТЕП з КІТТ,  $q_3$  визначає втрати тепла, тому саме він визначає час нагріву та охолодження. Щодо  $q_3$  зону печі можна розглядати як циліндр, що має розміщений по осі нагрівач, покритий теплоізоляцією. Теплова потужність нагрівача у встановленому режимі є постійною. Тоді погонну потужність нагрівача  $Q/l$ , необхідну для збільшення температури до максимальної розрахуємо як [229, 232, 250]

$$\frac{Q}{l} = \frac{\pi(T_N - T_S)}{\frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_1}{d_2}} = \frac{2\pi\lambda(T_N - T_S)}{\ln \frac{d_1}{d_2}}, \quad (4.8)$$

де  $T_N$  – температура визначення похибки, тобто нагрівача після закінчення нагріву;  $T_S$  – температура оточуючого середовища – можна вважати, що

$T_s = 0$ ;  $d1$  – зовнішній діаметр теплоізоляції печі;  $d2$  – зовнішній діаметр нагрівача;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності теплоізоляції.

Через те, що потужність нагрівача  $Q/l$  погонна, не пов'язана з довжиною зони печі, її надалі можна не враховувати – вона не впливає на час нагріву і охолодження печі. Оцінимо ці часи за законом Ньютона-Ріхмана [229, 250]. Диференціальне рівняння для усталеного режиму при температурі  $T$  прогріву поверхні печі як функції часу  $\tau$  має вид

$$qd\tau = cV\rho dT + \alpha S(T - T_s)d\tau, \quad (4.9)$$

де  $q$  – тепловий потік, викликаний різницею температур між нагрівачем  $T_N$  і середовищем  $T_s$ , тут  $q = Q/l$ ;  $c$  – питома теплоємність матеріалу теплоізоляції (теплоємністю решти елементів печі нехтуємо, вона порівняно мала через їх малий об'єм);  $V$  – об'єм матеріалу теплоізоляції печі,  $V = S_T l$ ;  $S_T$  – площа перерізу теплоізоляції;  $l$  – довжина зони печі – через те, що  $q$  погонний, приймаємо  $l$  за одиницю;  $S$  – площа зовнішньої поверхні охолодження теплоізоляції печі;  $\alpha$  – коефіцієнт теплопередачі зовнішнього чохла;  $\rho$  – густина матеріалу теплоізоляції;  $T_s$  – початкова температура нагрівача печі (перед нагрівом), можна вважати, що  $T_s = 0$ .

Через те, що потужність нагрівача  $Q/l$  погонна решту параметрів печі (зокрема, об'єм  $V$ ) беремо також з розрахунку на 1 м довжини. Розв'язком диференціального рівняння (4.9) відносно часу  $\tau$  є залежність температури  $T$  прогріву поверхні печі від часу  $\tau$  та інших параметрів печі [232, 250]

$$T = T_s + \frac{q}{\alpha S} \left(1 - e^{-\frac{\alpha S}{cV\rho} \tau}\right). \quad (4.10)$$

При охолодженні печі після визначення похибки ТП тепловий потік  $q^3$  спрямований у протилежному, порівняно з нагрівом, напрямку (див. рис. 4.7). Для оцінки часу охолодження використаємо закон охолодження Ньютона [229, 250]. Диференціальне рівняння для усталеного режиму охолодження поверхні нагрівача від температури  $T$  як функції часу  $\tau$  має вид

$$dq = -\alpha S(T - T_S)d\tau . \quad (4.11)$$

При охолодженні потужність нагрівачів рівна нулю, а тепловий потік  $q_3$  створюється нагрітою піччю. Врахувати теплоємність печі в цілому дуже важко. Аналіз показав, що домінує теплоємність теплоізоляції через відносно велику товщину стінки [229, 232, 250], тому будемо враховувати лише її. Тоді зміну теплового потоку  $dq$  можна оцінити, згідно із [229, 232, 250], як

$$dq = mcdT , \quad (4.12)$$

де  $m$  – маса теплоізоляційного матеріалу, її можна визначити як

$$m = V\rho = S_T l\rho . \quad (4.13)$$

Через те, що розрахунок виконується для погонної потужності, довжину  $l$  приймаємо за одиницю. Підставивши (4.13) у (4.12), отримаємо

$$\frac{dT}{d\tau} = -\frac{\alpha S}{cS_T l\rho}(T - T_S) . \quad (4.14)$$

Згідно із [229, 232, 250], розв'язком диференціального рівняння (4.14) відносно часу  $\tau$  [268] є залежність температури  $T$  поверхні нагрівача

$$T = (T_S - T_N) \cdot e^{-\frac{\alpha S}{cV\rho}\tau} , \quad (4.15)$$

де  $T_N$  – початкова температура нагрівача при охолодженні рівна температурі експлуатації ТП;  $T_S$  – температура оточуючого середовища, вважаємо  $T_S = 0$ .

Для макетного взірця ТЕП з КПТП [248, 249]  $d_2 = 22\text{mm} = 0,022 \text{ m}$ ,  $d_1 = 50\text{mm} = 0,05 \text{ m}$ ,  $T_N = 1000^\circ\text{C}$ ,  $T_S = 0^\circ\text{C}$ , звідки  $S_T = 0,00633 \text{ m}^2$ ,  $l = 1 \text{ m}$ ,  $V = 0,00633 \text{ m}^3$ ,  $S = 0,157 \text{ m}^2$ ; матеріал теплоізоляції має  $c = 800 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ ,  $\alpha = 8 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ ,  $\lambda = 0,15 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ,  $\rho = 400 \text{ kg/m}^3$  [29, 251].

Погонна потужність нагрівача, згідно із (4.8),  $Q/l = q = 1147,4 \text{ W/m}$ . Для роботи регулятора потрібен запас потужності, вибираємо  $Q/l = q = 2000 \text{ W/m}$ . Підставивши всі значення у (4.10), отримаємо

$$T = 0 + \frac{2000}{8 \cdot 0,157} (1 - e^{-\frac{8 \cdot 0,157}{800 - 0,00633 \cdot 400} \tau}) \approx 1592 \cdot (1 - e^{-0,00062\tau}). \quad (4.16)$$

Графік нагріву зони до максимальної температури подано на рис. 4.8. Надлишкова потужність нагрівачів  $Q/l$  дозволяє досягнути температури  $T_N = 1000^\circ\text{C}$  за приблизно 1600 секунд (26 хвилин). Через те, що ТЕП з КПТП є об'єктом регулювання з тісним тепловим зв'язком, підсистеми регулювання мусять використовувати відповідні алгоритми керування [133, 262, 264, 265]. Тому дійсний час встановлення температурного поля метрологічної перевірки буде більшим за час визначений [266] із рис. 4.8.

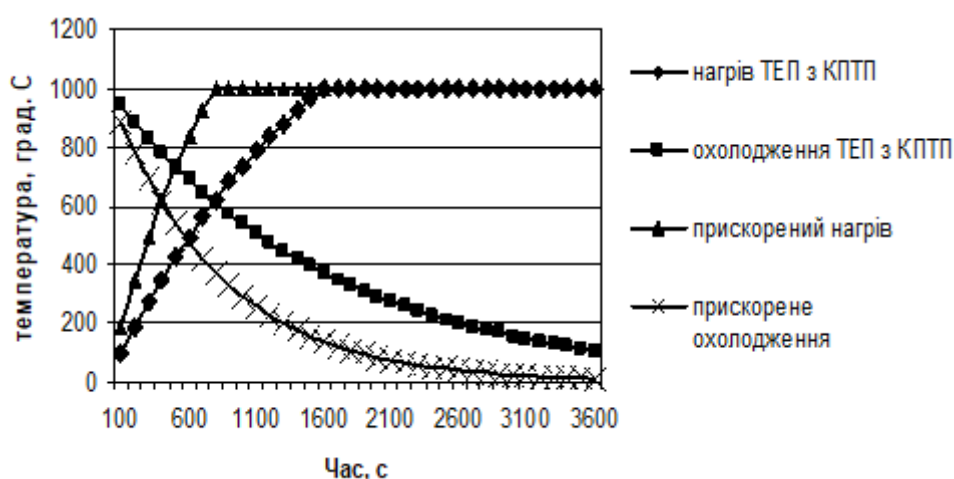


Рис. 4.8. Графіки нагріву та охолодження зони максимального нагріву ТЕП з КПТП

Процес охолодження зони після визначення похибки ТП описується (4.15), після підстановки параметрів ТЕП з КПТП отримаємо

$$T = (1000 - 0) \cdot e^{-\frac{8 \cdot 0,157}{800 - 0,00633 \cdot 400} \tau} \approx 1000 \cdot e^{-0,00062\tau}. \quad (4.17)$$

Графік охолодження зони з максимальної температури теж подано на рис. 4.8 [266]. Через відсутність засобів інтенсифікації охолодження, цей процес ще повільніший. За годину після вимкнення нагрівачів залишкова температура перевищує  $100^\circ\text{C}$ . Такі параметри нагріву та охолодження визначаються використанням матеріалом теплоізоляції. Досконаліший матеріал забезпечить значно менший час нагріву та охолодження. Відповідні



графіки теж показані на рис. 4.8 під назвами "прискорений нагрів" і "прискорене охолодження". Як видно з графіків, час нагріву скоротиться до приблизно 800 секунд (13 хвилин), а при охолодженні за годину залишкова температура буде приблизно  $10^{\circ}\text{C}$ , чим для ТЕП з КПТП можна нехтувати.

Подані на рис. 4.8 часові залежності показують, що оперативні методи визначення похибки та діагностування неоднорідних ТП вимагають часу для реалізації, прийняттого лише для інформаційно-вимірювальних систем, що працюють не у реальному часі, тобто "відволікання" вимірювальної системи на визначення похибки або діагностування стану електродів головної ТП, що входить у ТЕП з КПТП, не приведе до виникнення аварійних ситуацій.

А використання ТЕП з КПТП у системах регулювання температури може привести до виникнення аварійних ситуацій під час оперативного визначення поточної похибки ТП або діагностування стану її електродів. Усунення цього недоліку у самому ТЕП з КПТП неможливе, необхідні нові структурні рішення при побудові вимірювально-керуючих систем.

У даному параграфі розроблено спеціалізовану багатозонну піч, призначену для керування профілем температурного поля вздовж електродів стандартного ТЕП, що дає змогу реалізувати розроблені оперативні методи визначення його поточної похибки та діагностування стану його електродів. Також проведено розрахунок необхідної потужності нагрівачів зон цієї спеціалізованої багатозонної печі, що дало змогу оцінити конструктивні параметри печі та тривалість реалізації розроблених оперативних методів.

## **4.2 Нейромережевий метод керування профілем температурного поля**

Як було показано у § 3.5, оперативний метод діагностування стану електродів ТП вимагає високої точності регулювання температури у печі, яка створює потрібні профілі температурного поля. Досліджений у [133, 264, 265] ітераційний метод керування профілем температурного поля забезпечує лише стабілізацію профілю температурного поля у ТЕП з КПТП. Його перевагою є

розімкнена структура системи регулювання, у ній відсутній зворотний зв'язок у реальному часі, який є причиною схильності до самозбудження традиційних систем регулювання. Тому процес керування профілем температурного поля є циклічним. У кожному циклі спочатку вимірюють температуру всіх зон, обчислюють керуючу дію та реалізують її. Наступний цикл починається тільки після закінчення перехідного процесу встановлення температури зон печі.

Недоліком дослідженого у [133, 264, 265] методу є низька точність обчислення необхідних змін потужності нагрівачів, особливо при великих змінах температури зон (а саме великих змін температури зон потребують розроблені у другому та третьому розділі оперативні методи визначення похибки ТП і діагностування стану її електродів). Цей недолік принциповий. Він виникає з прийнятих припущень про лінійну залежність приростів температури від потужності нагрівачів. Але при малих змінах температури неадекватність прийнятих припущень фізичним процесам [133, 264, 265] веде до відносно малого зростання кількості циклів ітерації при ліквідації збурень температури. А для великих змін температури ці припущення викликають великі похибки розрахунку керуючої дії. Тому, навіть якщо ітераційний процес сходиться, він вимагає багато циклів.

Таким чином, для вдосконалення дослідженого у [133, 264, 265] методу (і збереження перелічених вище його переваг) необхідно значно підвищити точність обчислення необхідних змін потужності нагрівачів, особливо при великих змінах температури зон. На сьогодні кращі методи регулювання використовують нейронні мережі (НМ) [262]. За рахунок фази навчання НМ адаптується до умов роботи, тому вона забезпечує кращу якість процесу регулювання. Як недолік НМ приписують високі вимоги до обчислювальних ресурсів, але, при навчанні НМ на верхньому ієрархічному рівні системи, НМ, згідно із [100], можуть бути застосовані у мікроконтролерних системах.

Слід відзначити, що розглянуті у [262, 267-269] методи нейромережевого керування вимагають для навчання НМ достатньо точних математичних моделей об'єкта керування. Інший варіант, розглянутий у [262],

передбачає навчання НМ на об'єкті керування, оснащеному високоточним регулятором – тоді НМ навчається імітувати такий регулятор. Для ТЕП з КПТП на базі розробленої печі, через наявність багатьох зон нагріву та значний тепловий зв'язок між ними, ідентифікація параметрів математичної моделі є дуже складною задачею [269, 270] і вимагає великого об'єму експериментальних досліджень безпосередньо на об'єкті вимірювання температури.

Розроблений метод [271 - 275] полягає у тому, що, по-перше, на НМ подають не тільки відхилення температури всіх зон від заданої (як у звичайному і нейромережевому регуляторі), а значення температури всіх зон (так НМ враховує нелінійні властивості печі). По-друге, для навчання НМ не створюють спеціальну модель (яка має свої похибки), а проводять навчання безпосередньо на об'єкті (тоді модель та її похибки відсутні).

У структуру нейромережевого регулятора температури зон ТЕП з КПТП (рис. 4.9) входять нагрівачі Н всіх зон ТЕП з КПТП і сенсори Д цих зон (ТП), підключені до входів багато-точкової вимірювальної підсистеми БВП. З неї результати вимірювання температури всіх зон поступають на входи блоків віднімання БВ та нейронної мережі НМ. Виходи НМ поступають на входи блоків керування БК потужністю, виходи яких підключені до нагрівачів Н відповідних зон. Температури всіх зон (нагрівачів Н) задаються блоком задання температури  $B3t^{\circ}$ , виходи якого підключені до входів блоку віднімання БВ. Отримані на виході БВ відхилення температури окремих зон від заданої поступають на входи НМ.

У склад БВП входять комутатор КМ сигналів ТП кожної зони, аналого-цифровий перетворювач АЦП, мікроконтролер опрацювання поточних результатів аналого-цифрового перетворення МК та інтерфейс ІФ. Для синхронізації роботи блоків керування БК (широтно-імпульсні модулятори) та формування затримки між циклами керування (змін потужності нагрівачів Н) в схему введено Таймер. ТЕП з КПТП розміщений у печі ППЧ, оснащеної своїм Регулятором температури і блоком задання температури  $B3t^{\circ}$ .

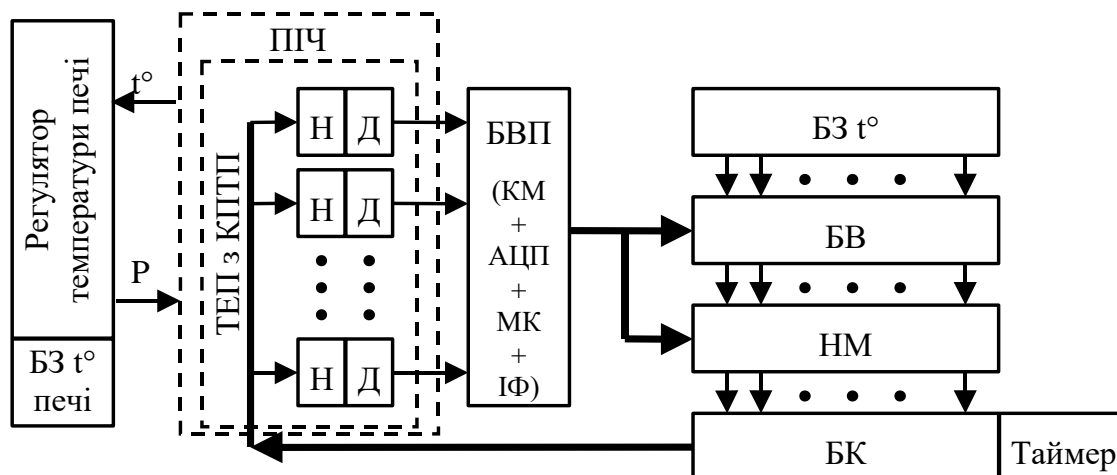


Рис. 4.9. Структурна схема нейромережевого регулятора в режимі підтримання профілю температурного поля ТЕП з КПТП

Нейромережевий регулятор працює циклічно. На початку циклу БВП вимірює поточну температуру кожної зони ТЕП з КПТП. На входи НМ поступають значення поточної температури кожної зони та її відхилення від заданої. НМ обчислює необхідні зміни потужності нагрівачів кожної зони, а блоки керування БК змінюють шпаруватість імпульсів нагрівачів зон. Потім ця шпаруватість не змінюється на протязі трьох постійних часу ТЕП з КПТП.

Як нейронну мережу НМ можна використати відомий тришаровий перцептрон [276], структура якого подана на рис. 4.10. Він має входів вдвічі більше, ніж кількість зон ТЕП з КПТП, а виходів – стільки ж, скільки зон.

Завданням НМ є формування такої керуючої дії, щоби час переходу від поточного профілю температурного поля вздовж електродів головної ТП до заданого був мінімальний. Для цього НМ має бути відповідно навчена.

Для навчання НМ необхідно створити навчальну вибірку [271 - 275], де заданим відхиленням температури кожної зони ТЕП з КПТП (що поступають на вхід НМ) будуть відповідати прирости потужності, здатні привести до заданого профілю температурного поля цілий ТЕП з КПТП (тому, що зони мають значний тепловий зв'язок). Ці прирости потужності апріорі невідомі.

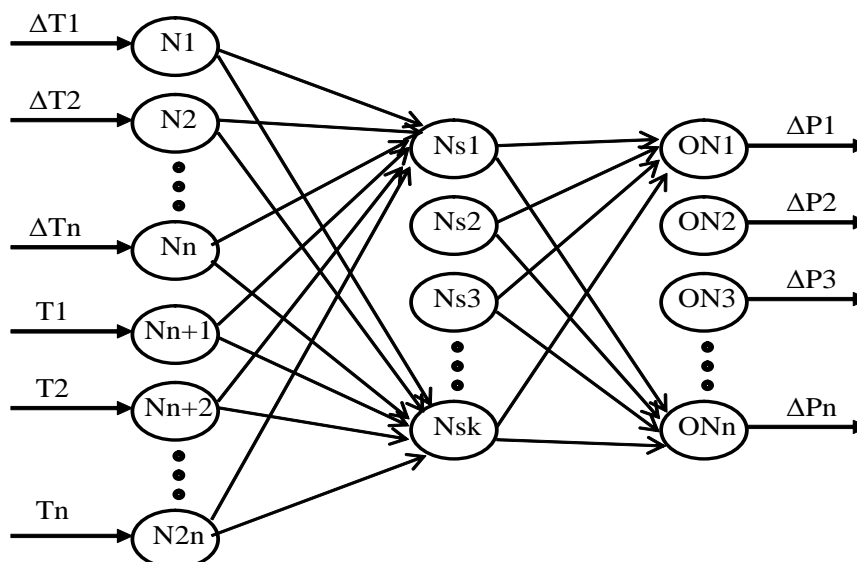


Рис. 4.10. Структура НМ, що використовується для формування керуючої дії

Тому розроблено метод навчання НМ безпосередньо на печі. Для цього на час навчання НМ структуру регулятора змінюють так, як це показано на рис. 4.11. Під час навчання блок задання потужності БЗП випадковим чином задає прирости (як додатні, так і від'ємні) потужності нагрівачів  $N$  кожної зони, які реалізують БК. Після закінчення перехідного процесу БВП визначає реальні температури кожної зони і подає їх на БВ і НМ. Блок БЗт° в момент задання приростів потужності нагрівачів  $N$  отримує від БЗП команду запам'ятати температури, які були до змін потужності нагрівачів  $N$  (які БЗт° подає на БВ). Таким чином, на входах НМ маємо значення температур всіх зон та її змін під дією заданих приростів потужності, тобто ми маємо набір даних, потрібний для формування одного навчального вектора для НМ.

Обчислення потрібних змін коефіцієнтів передачі та зміщень нейронів мережі НМ виконує блок навчання БН. Метою навчання є стан, коли НМ, за результатами вимірювання температури всіх зон, визначає необхідні зміни потужності БК, які мали б повернути профіль температурного поля у початковий стан. Ці необхідні зміни потужності повинні бути рівні (і протилежні за знаком) тим змінам потужності, які випадковим чином задав блок задання потужності БЗП і які реалізували блоки керування БК.

Для того, щоби врахувати при навчанні НМ зміну теплових параметрів

печі [271 - 275] слід не тільки змінювати прирости потужності нагрівачів  $H_1 \dots H_n$ , а також змінювати температуру в печі, де розміщений ТЕП з КПТП.

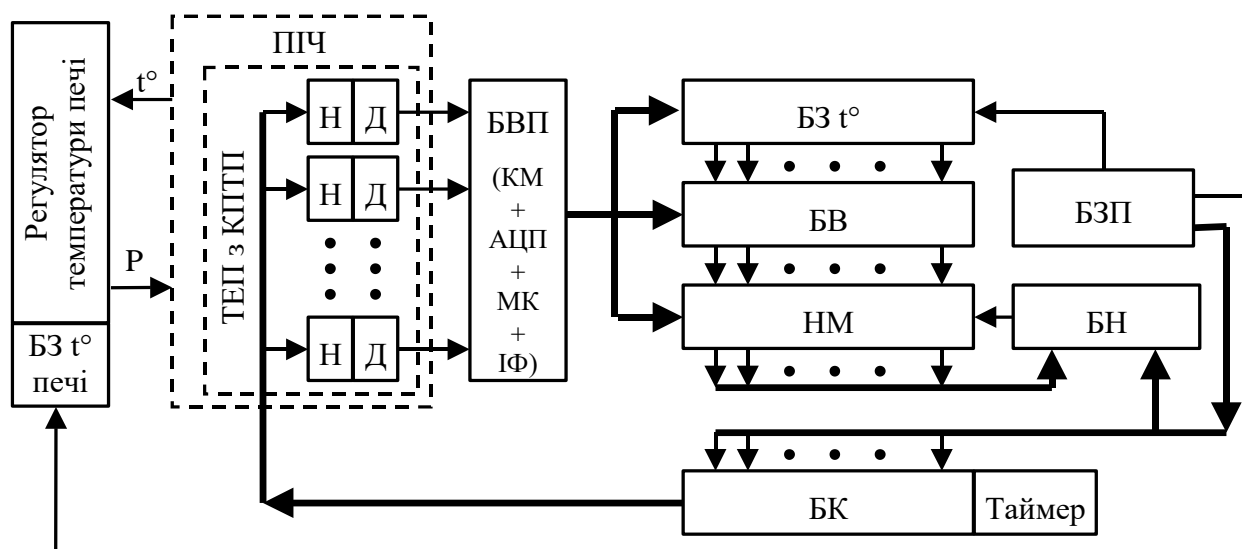


Рис. 4.11. Структурна схема пристрою вимірювання температури в режимі навчання НМ

Для цього на структурній схемі рис. 4.11 передбачено зв'язок між блоком задання потужності БЗП і блоком БЗ $t^\circ$  печі. Порядок формування навчальних вибірок для навчання НМ ілюструє рис. 4.12, де по осі абсцис відкладений час  $\tau$ , а по осі ординат – температуру однієї із зон поблизу зливу головної ТП. На рис. 4.12 подано температури  $t_1^o$ ,  $t_2^o$ ,  $t_3^o$ , що визначаються піччю, і зміни профілю температурного поля  $\Delta t_1^o$ ,  $\Delta t_2^o$ ,  $\Delta t_3^o$ , які створює БЗП шляхом зміни вхідних даних блока керування БК.

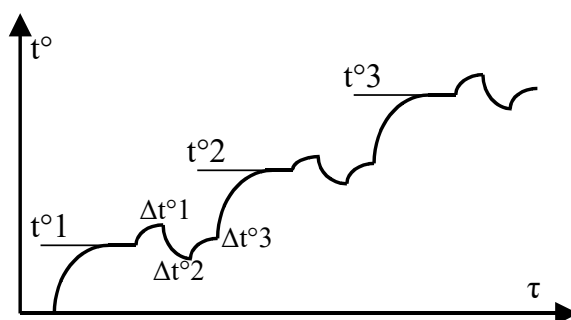


Рис. 4.12. Зміни температури однієї із зон ТЕП з КПТП під час формування навчальної вибірки

Достатня для навчання тришарового перцептрона навчальна вибірка має складатися з 20 – 30 векторів навчання НМ [276], що відповідають реальним змінам температури нагрівачів під дією БЗП, БК і БЗт<sup>о</sup> печі. Далі НМ навчають на цих векторах. Навчання НМ закінчується, коли формовані нею прирости потужності нагрівачів всіх зон будуть задовольняти умову

$$|\Delta P_i - \Delta P_i^{NN}| \leq \varepsilon, \quad (4.18)$$

де  $\Delta P_i$  – заданий приріст потужності  $i$  – тої зони;  $\Delta P_i^{NN}$  – обчислений НМ приріст потужності  $i$  – тої зони;  $\varepsilon$  – допустима похибка оцінки потрібної зміни потужності, яка може бути приблизно оцінена за формулою

$$\varepsilon = \Delta T_i^{DOP} \frac{\Delta P_i}{\Delta T_i}, \quad (4.19)$$

де  $\Delta T_i^{DOP}$  – допустиме відхилення профілю температурного поля для  $i$  – тої зони;  $\Delta T_i$  – значення зміни температури для  $i$  – тої зони, отримане при дії приросту  $\Delta P_i$  потужності  $i$  – тої зони.

Залежності (4.18) і (4.19) нескладні, тому контролювати закінчення навчання НМ може мікроконтролер, який буде обчислювати керуючу дію для БК. При цьому значення  $\Delta T_i^{DOP}$  визначаються допустимою невиключеною похибкою від набутої термоелектричної неоднорідності електродів головної ТП. Через те, що ця невиключена похибка є по відношенню до результату вимірювання температури величиною другого порядку малості, значення  $\Delta T_i^{DOP}$  може бути досить великим – декілька градусів [122, 133].

Але доцільно задати  $\Delta T_i^{DOP}$  в межах 1 - 2<sup>о</sup>С, щоби мати запас для змін профілю температурного поля багатозонної печі від впливу зовнішнього температурного поля за час циклу регулювання. Цей вплив пов'язаний з неідеальною теплоізоляцією печі, власне він визначає невиключену похибку від неоднорідності головної ТП. Аналітичні методи оцінки цього впливу складні та вимагають доволі точного знання індивідуальних параметрів печі та розміщеного у ній стандартизованого ТЕП. Також необхідно знати зміни

цих параметрів під дією температури. Тому слід провести експериментальні дослідження відповідних змін профілю температурного поля ТЕП з КПТП.

У даному параграфі розроблено не схильний до самозбудження нейромережвий метод керування профілем температурного поля, який, у поєднанні із розробленою у попередньому параграфі спеціалізованою трубчатою багатозонною піччю, дає змогу реалізувати розроблені у другому та третьому розділі оперативні методи визначення поточної похибки ТП та діагностування стану її електродів.

### **4.3 Математична модель похибки термопар**

Як було зазначено у третьому розділі, для реалізації розробленого у третьому розділі оперативного методу діагностування стану електродів неоднорідних ТП необхідно створити математичну модель похибки ТП, викликані процесами деградації її електродів. Така математична модель повинна забезпечувати обчислення похибок від дрейфу ФП ТП, а також від набутої у процесі тривалої експлуатації при підвищених температурах термоелектричної неоднорідності її електродів.

Одні з перших математичних моделей похибок ТП були розроблені у [94]. Але це були набори двовимірних моделей, які пов'язували лише максимальні похибки дрейфу ТП різного типу з часом їх експлуатації в цілому. Такі моделі не могли вирішити перелічені задачі та задачі математичного моделювання.

Більш досконалі математичні моделі похибки ТП типу ХА були розроблені у [122, 132, 133]. Вони пов'язували похибку ТП з температурою експлуатації та поточною температурою для двох значень часу експлуатації. Тобто це були тривимірні математичні моделі. Вони дали змогу оцінити похибки ТП типу ХА від набутої в процесі експлуатації термоелектричної неоднорідності ТП [122], виявити найбільш небезпечний режим експлуатації ТП, а також розробити та дослідити метод корекції похибки ТП від набутої в процесі експлуатації термоелектричної неоднорідності [122, 132]. Однак



математичні моделі похибки ТП, розроблені у [132], практично не годяться для визначення еквівалентного часу експлуатації ТП згідно із оперативним методом розробленим у третьому розділі та описаним у [223 - 228].

При побудові складних багатовимірних математичних моделей часто використовують методи, базовані на машинному навчанні, статистичних та нейромережових підходах, методи штучного інтелекту. Такі випадки часто називають розпізнаванням паттернів [267, 268]. У [267] було розглянуто 23 методи розпізнавання і проведено їх якісне та кількісне порівняння. Були розглянуті методи гнучкого незалежного моделювання аналогій класу, дискримінантного лінійного аналізу, найближчого сусіда, статистичного розпізнавання, лінійного дискримінантного аналізу Махаланобіса, лінійного дискримінантного аналізу Баєса, штучних та імовірнісних нейронних мереж, квантування навчального вектора та різні модифікації перелічених методів.

Однак всі відомі методи побудови достатньо точних математичних моделей вимагають достатньо великої кількості даних. А основними труднощами, які виникають при побудові математичних моделей похибки ТП довільного типу, є якраз відсутність достатнього обсягу результатів експериментальних досліджень [50, 141, 142]. При цьому не можна поєднувати результати експериментальних досліджень різних авторів через можливі відмінності в умовах і методиці проведення експерименту. Адже дані досліджень різних авторів можуть відрізнятися майже на порядок [122, 123, 277]. Слід відзначити, що проведення спеціальних експериментальних досліджень з метою отримання достатнього обсягу даних про похибку від дрейфу ФП ТП та/або від набутої термоелектричної неоднорідності є складною та трудомісткою задачею, а їх проведення практично не доцільне. Через різницю між умовами дослідження та експлуатації, а також через значні індивідуальні відхилення процесу деградації окремих ТП, отримане підвищення точності математичних моделей їх похибки приведе до відносно незначного підвищення точності оцінки (прогнозу) похибки конкретних ТП з метою корекції цієї похибки. А розроблені оперативні методи визначення

похибки ТП та діагностування стану її електродів передбачають перехід до індивідуальних математичних моделей ТП у цілому або її окремих ділянок.

При експериментальних дослідженнях похибки ТП з нешляхетних металів найчастіше визначають як зміни відхилення термо-е.р.с. окремих електродів відносно стандартного платинового електрода [58]. Тому моделі похибки ТП доцільно будувати як моделі похибок окремих електродів.

Таким чином, на першому етапі побудови математичних моделей похибок ТП необхідно отримати (спрогнозувати) достатній обсяг результатів дослідження при різних температурах  $T_{Ei}$  та часах  $\tau_{Ei}$  постійної експлуатації, а також, для моделювання похибки від набутої термоелектричної неоднорідності електродів ТП, змін поточної температури  $\Delta T_{Di}$ . Традиційно у таких випадках використовується регресійний аналіз [240, 282, 283]. Саме методи регресійного аналізу [236, 278, 279] найкраще пристосовані для виконання такої суперечливої задачі. Регресійний аналіз дозволяє отримати не тільки математичні залежності змін ФП ТП, а і оцінити статистичну значущість цих залежностей в цілому, а також їх окремих коефіцієнтів [278].

У [100] було запропоновано використати для збільшення кількості точок навчання нейронної мережі додаткову апроксимуючу нейронну мережу. Але, як показали попередні дослідження, апроксимуюча нейронна мережа, при обмеженому числі поданих у [50, 141, 142] результатів експериментальних досліджень, не має переваг перед регресійним аналізом щодо точності.

Перевагою регресійного аналізу є подача моделі як аналітичної залежності. Також у регресійному методі наявні засоби оцінки коефіцієнтів моделі (їх значущості), виявлення та усунення взаємозалежних змінних, а також гетероскедастичності [236, 278, 279]. При регресійному аналізі можна теж обчислити коефіцієнт детермінації, який дає змогу оцінити відповідність моделі наявним даним, а також порівнювати різні моделі між собою.

Для побудови регресійної моделі похибки ТП використаємо результати експериментальних досліджень дрейфу їх ФП, подані у [141, 142], як найбільш повні. Вони дозволяють побудувати як залежність зміни ФП ТП від часу

експлуатації (похибка від дрейфу ФП ТП), так і зміни генерованої ТП термо-е.р.с. від зміни профілю температурного поля вздовж її електродів (похибка від набутої термоелектричної неоднорідності). Ці моделі є мінімальним набором для імітаційного моделювання похибки вимірювання температури різними засобами і системами в процесі життєвого циклу ТП.

Методика дослідження похибок ТП як від дрейфу їх ФП, так і від набутої термоелектричної неоднорідності, передбачає вимірювання зміни генерованої ТП термо-е.р.с. під дією впливаючих величин (часу експлуатації та зміни профілю температурного поля вздовж термоелектродів) відносно результатів першого вимірювання (початкового стану) [50, 141, 142]. Таким чином вдається усунути вплив на результати досліджень відносно великих початкових відхилень ФП ТП від номінальної ФП. Тому для поліномів, отриманих за результатами регресійного аналізу, вільний член, згідно із фізичним змістом результатів досліджень, повинен дорівнювати нулю [280-283]. Інакше отримані моделі втрачають фізичний зміст [284 - 291].

У Додатку Р, на рис. Р.1 подано залежності дрейфу ФП електродів хромель та алюмель для температури експлуатації 800°C [141, 142]. Вони отримані в результаті експериментальних досліджень цих електродів на протязі 10000 годин. Як видно з графіків, загальний вид рівняння регресії для хромелю близький до функцій виду  $\hat{y} = \sqrt[n]{x}$ . Для алюмелю можна використати аналогічний вид рівняння регресії або поліном третього степеня.

Було опрацьовано експериментальні дані [141, 142] та отримано моделі [284 - 293] похибки від дрейфу ФП електродів ТП, які мають найменшу суму квадратів залишків (збурень). У Додатку Р, табл. Р.1 представлено регресійні моделі похибки від дрейфу ФП електродів хромель та алюмель. Як видно з табл. Р.1, всі моделі без вільного члена ( $a_0 = 0$ , дивись рядки 1, 2 табл. Р.1) обох електродів мають одну і ту ж саму особливість. Для них сума залишків (збурень) моделі не дорівнює нулю (рядок 3). А умова рівності нулю суми збурень, згідно із [279, 282], необхідна для того, щоби дана модель була математичним сподіванням досліджуваного процесу наростання похибки

термоелектродів, отже адекватно описувала цей процес.

У відомих регресійних моделях, досліджених класичним методом найменших квадратів (МНК) і його узагальненнями, автори явно або неявно постулюють відмінність від нуля вільного члена [278, 279]. Тобто отримана регресійна модель не може бути застосована для опису процесу дрейфу, оскільки оцінки її коефіцієнтів є зміщеними [278, 279]. Крім того, занижується дисперсія оцінок коефіцієнтів моделі, що, в свою чергу, веде до спотворення їх довірчих інтервалів. В такому випадку кореляційне відношення (коефіцієнт детермінації  $\hat{R}^2$  [278, 279]) вже не служить адекватною характеристикою якості моделі.

Вказаний недолік відсутній у моделях, де вільний член присутній [281] ( $a_0 \neq 0$ , рядки 4, 5 табл. Р.1). Однак, як було сказано вище, такі моделі не мають фізичного змісту (суперечать умові рівності нулю похибки від дрейфу у початковий момент часу) і у табл. Р.1 приведені лише для того, щоб переконатися у принциповій можливості побудови кривої, яка задовольняє умову рівності нулю суми залишків регресії (рядок б) та для порівняння.

Пояснити отримані результати похибками експериментальних досліджень не можна. Адже, по-перше, регресійний аналіз саме призначений для зменшення їх впливу на отримувану математичну модель, по-друге, моделі з вільним членом такого недоліку не мають, хоча базуються на тих самих результатах вимірювань. Крім того, відхилення суми похибок у деяких випадках надто великі.

У Додатку Р, на рис. Р.2 подано графіки залежності похибки хромелю та алюмелю від набутої термоелектричної неоднорідності при зміні поточної температури від 0 до 800°C (при температурі експлуатації 800°C і для часу експлуатації 1000 годин [141]). Як видно з графіків, загальний вид рівняння регресії в цьому випадку близький до функцій дрейфу.

В табл. Р.2 також видно закономірність – при відсутності вільного члена (рядки 2 та 8 табл. Р.2) сума залишків (збурень) моделі не рівна нулю (рядки 3 та 9 табл. Р.2). Як і для табл. Р.1, це не дозволяє використати МНК для

дослідження моделі та адекватного опису похибки електродів ТП. Моделі з вільним членом (рядки 5 та 11 табл. Р.2) приведені для порівняння – в них сума залишків (збурень) рівна нулю (див. рядки 6 і 12 табл. Р.2).

Таким чином, класичний МНК принципово не годиться для інтерполяції та екстраполяції результатів експериментального дослідження похибки ТП та побудови їх математичної моделі похибок. Це можна довести аналітично [282, 285 - 287]. Таке доведення подано у Додатку С.

У [281, 284, 285, 287] було розроблено та досліджено вдосконалений метод найменших квадратів (МНКВ), що дає змогу отримати шляхом регресійного аналізу коректні математичні моделі без вільного члена. Основна вимога до МНКВ полягає у тому, щоби у поліноміальній регресії без вільного члена суму залишків привести до нуля. Для цього пропонується використати метод невизначених множників Лагранжа, який дає змогу звести задачу знаходження умовного екстремуму до задачі безумовного екстремуму. Тому, для подолання недоліків безпосереднього використання МНК стосовно дослідження моделі (С.1), розглянемо задачу знаходження умовного екстремуму

$$Q(a_1, a_2, \dots, a_k) = \sum_{i=1}^n \left( y_i - \sum_{j=1}^k a_j t_i^j \right)^2 \rightarrow \min$$

при умові, що

$$\left( \sum_{i=1}^n t_i \right) a_1 + \left( \sum_{i=1}^n t_i^2 \right) a_2 + \dots + \left( \sum_{i=1}^n t_i^k \right) a_k = \sum_{i=1}^n y_i \quad .$$

Функція Лагранжа

$$L(a_1, a_2, \dots, a_k) = Q(a_1, a_2, \dots, a_k) + \lambda \left[ \left( \sum_{i=1}^n t_i \right) a_1 + \dots + \left( \sum_{i=1}^n t_i^k \right) a_k - \sum_{i=1}^n y_i \right], \quad (4.20)$$

дає можливість звести цю задачу до задачі про безумовний екстремум [298].

Необхідні умови екстремуму функції  $L$  мають вид

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial L}{\partial a_1} = -2 \sum_{i=1}^n \left( y_i - \sum_{j=1}^k a_j t_i^j \right) t_i + \lambda \sum_{i=1}^n t_i = 0, \\ \dots \\ \frac{\partial L}{\partial a_k} = -2 \sum_{i=1}^n \left( y_i - \sum_{j=1}^k a_j t_i^j \right) t_i^k + \lambda \sum_{i=1}^n t_i^k = 0, \\ \dots \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda} = \left( \sum_{i=1}^n t_i \right) a_1 + \dots + \left( \sum_{i=1}^n t_i^k \right) a_k - \sum_{i=1}^n y_i = 0. \end{array} \right. \quad (4.21)$$

Для компактності наступних перетворень введемо позначення

$$T_m = \sum_{i=1}^n t_i^m, m = \overline{1, 2k}; T_{y,m} = \sum_{i=1}^n t_i^m y_i, m = \overline{0, k}. \quad (4.22)$$

Тоді система рівнянь (4.21) набуде такого виду

$$\left\{ \begin{array}{l} T_1 a_1 + T_2 a_2 + \dots + T_k a_k = T_{y,0}, \\ T_2 a_1 + T_3 a_2 + \dots + T_{k+1} a_k + T_1 \frac{\lambda}{2} = T_{y,1}, \\ \dots \\ T_{k+1} a_1 + T_{k+2} a_2 + \dots + T_{2k} a_k + T_k \frac{\lambda}{2} = T_{y,k}, \end{array} \right. \quad (4.23)$$

або

$$T a^* = T_y, \quad (4.24)$$

де

$$T = \begin{pmatrix} T_1 & T_2 & \dots & T_k & 0 \\ T_2 & T_3 & \dots & T_{k+1} & T_1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ T_{k+1} & T_{k+2} & \dots & T_{2k} & T_k \end{pmatrix}, T_y = \begin{pmatrix} T_{y,0} \\ T_{y,1} \\ \dots \\ T_{y,k} \end{pmatrix}, a^* = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \dots \\ a_k \\ \lambda/2 \end{pmatrix}. \quad (4.25)$$

Оскільки система функції  $\{t, t^2, \dots, t^k\}$  є лінійно незалежною, то матриця  $T$  є невиродженою, при цьому

$$T^{-1} = \Delta^{-1} \begin{pmatrix} B_{11} & B_{12} & \dots & B_{1,k+1} \\ B_{21} & B_{22} & \dots & B_{2,k+1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ B_{k+1,1} & B_{k+1,2} & \dots & B_{k+1,k+1} \end{pmatrix}, \quad (4.26)$$

де

$$\Delta = \det T \quad , \quad (4.27)$$

$B_{ij}$  – алгебраїчне доповнення елемента  $(\cdot)_{ij}$  матриці транспонованої до  $T$

$$T' = \begin{pmatrix} T_1 & T_2 & \cdots & T_k & T_{k+1} \\ T_2 & T_3 & \cdots & T_{k+1} & T_{k+2} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ T_k & T_{k+1} & \cdots & T_{2k-1} & T_{2k} \\ 0 & T_1 & \cdots & T_{k-1} & T_k \end{pmatrix} . \quad (4.28)$$

Тому з (4.24) з урахуванням (4.25), (4.26) отримаємо

$$a = BT_y, \quad (4.29)$$

де

$$a = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \cdots \\ a_k \end{pmatrix}, \quad B = \Delta^{-1} \begin{pmatrix} B_{11} & B_{12} & \cdots & B_{1,k+1} \\ B_{21} & B_{22} & \cdots & B_{2,k+1} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ B_{k,1} & B_{k,2} & \cdots & B_{k,k+1} \end{pmatrix} . \quad (4.30)$$

Отже, точка  $(a_1, a_2, \dots, a_k)$ , визначена рівністю (4.28), є стаціонарною. Використання критерію Рауса-Гурвіца до матриці Гесса показує, що функція Лагранжа  $L$  у цій точці досягає мінімуму [289, 291, 298].

Слід відзначити, що з (4.26), (4.28) і (4.30) випливає рівність

$$B \begin{pmatrix} T_1 & T_2 & \cdots & T_k \\ T_2 & T_3 & \cdots & T_{k+1} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ T_{k+1} & T_{k+2} & \cdots & T_{2k} \end{pmatrix} = I_k \quad , \quad (4.31)$$

де  $I_k$  – одинична матриця  $k$  – того порядку.

Отримані за допомогою МНКВ оцінки невідомих параметрів можна назвати МНКВ-оцінками. Для дослідження властивостей МНКВ-оцінок розглянемо випадок нефіксованої вибірки. Тоді результуюча ознака набирає значення  $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$ , які є випадковими величинами, а тому згідно з (4.29) і другим членом співвідношення (4.25)

$$a = BT_Y \quad , \quad (4.32)$$

тобто МНКВ-оцінки  $a_1, a_2, \dots, a_k$  невідомих параметрів  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k$  є також випадковими величинами.

Позначимо

$$\tau = \begin{pmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ t_1 & t_2 & \dots & t_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ t_1^k & t_2^k & \dots & t_n^k \end{pmatrix}, \tau_1 = \begin{pmatrix} t_1 & t_1^2 & \dots & t_1^k \\ t_2 & t_2^2 & \dots & t_2^k \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ t_n & t_n^2 & \dots & t_n^k \end{pmatrix}, Y = \begin{pmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \dots \\ Y_n \end{pmatrix}, \alpha = \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \dots \\ \alpha_k \end{pmatrix}.$$

Тоді з урахуванням (Б.6) і (4.31)

$$\tau\tau_1 = \begin{pmatrix} T_1 & T_2 & \dots & T_k \\ T_2 & T_3 & \dots & T_{k+1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ T_{k+1} & T_{k+1} & \dots & T_{2k} \end{pmatrix}, T_Y = \tau Y, B\tau\tau_1 = I_k, \quad (4.33)$$

а модель (Б.1) у векторно-матричній формі запишеться в такому виді

$$Y = \tau_1\alpha + U, \quad (4.34)$$

де  $U = (U_1, U_2, \dots, U_n)'$ .

Властивості оцінок  $a_1, a_2, \dots, a_k$  виведені у Додатку Т. Там показано, що оцінки  $a_1, a_2, \dots, a_k$  є незміщеними оцінками відповідних невідомих параметрів  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k$ , а також діагональні елементи дисперсійно-коваріаційної матриці є дисперсіями оцінок  $a_1, a_2, \dots, a_k$ . Тому МНКВ можна використати для побудови адекватної моделі похибок ТП.

Як вже було вказано, згідно із [1, 2], на сьогодні ТП типу ХА – найбільш вживані. Тому розширення обсягу результатів досліджень похибок від дрейфу ФП ТП і від набутої термоелектричної неоднорідності проведемо для ТП цього типу. Для цього проведемо інтерполяцію та екстраполяцію результатів експериментальних досліджень за допомогою МНКВ.

На першому етапі створення математичної моделі похибки ТП формуємо базу результатів експериментального дослідження дрейфу ФП ТП для різних значень температури  $T_E$  і часу  $\tau_E$  експлуатації ТП, а також зміни поточної температури  $T_D$  якнайбільшого обсягу. Найбільший обсяг



результатів експериментальних досліджень дрейфу ФП ТП подано у [141, 142]. Доцільно діапазон значень температур експлуатації  $T_E$  і поточної  $T_D$  вибрати від  $0^\circ\text{C}$  до  $900^\circ\text{C}$  з дискретністю  $100^\circ\text{C}$ , що добре узгоджується з результатами експериментальних досліджень, приведеними у [141, 142]. Тому ж діапазон значень часу  $\tau_E$  експлуатації ТП доцільно вибрати від 0 до 1500 годин з дискретністю 250 годин.

Спочатку за допомогою розробленого МНКВ будуюмо часткові моделі [288, 292, 293]. Кожна така модель повинна бути функцією однієї змінної – або температури  $T_E$  експлуатації ТП, або часу  $\tau_E$  її експлуатації, або ж зміни поточної температури  $\Delta T_D$ . При цьому інші змінні визначають місце даної моделі у загальній моделі похибки ТП. Під час створення віртуальних результатів метрологічної перевірки можлива ситуація, коли, при прогнозі похибки для деяких комбінацій значень  $T_E$ ,  $\tau_E$ ,  $\Delta T_D$  за різними шляхами, отримуємо неоднозначні результати. Попередні дослідження показали, що різниці, що виникають при цьому, відносно малі (не перевищують  $0,6^\circ\text{C}$  для ТП типу ХА), тому ними можна нехтувати. А для усунення неоднозначності доцільно стандартизувати шляхи прогнозу похибки – встановити ієрархію моделей. Якщо є похибка, визначена ієрархічно старшою моделлю, її значення, визначене молодшою моделлю, опускають. При побудові моделі похибки ТП типу ХА прийнята ієрархія моделей  $T_E \Rightarrow T_D$  (найстаршою є модель, де змінною є температура експлуатації  $T_E$ ). Заповнення таблиць, у яких вказано значення похибки ТП відповідно до прийнятої ієрархії математичних моделей, ілюструє рис. 4.13. Кожна таблиця відповідає одному часу експлуатації  $\tau_E$ , тобто відповідає одній поверхні рис. 2.6.

Слід відзначити, що у рис. 4.13 враховано висновок, зроблений у § 2.2 та [188] відносно ТЕП з КППП – коли ділянки головної ТП при зміні профілю температурного поля згідно із (2.23) та (2.24) потрапляють обома кінцями у однакову температуру, вони перестають генерувати термо-е.р.с.

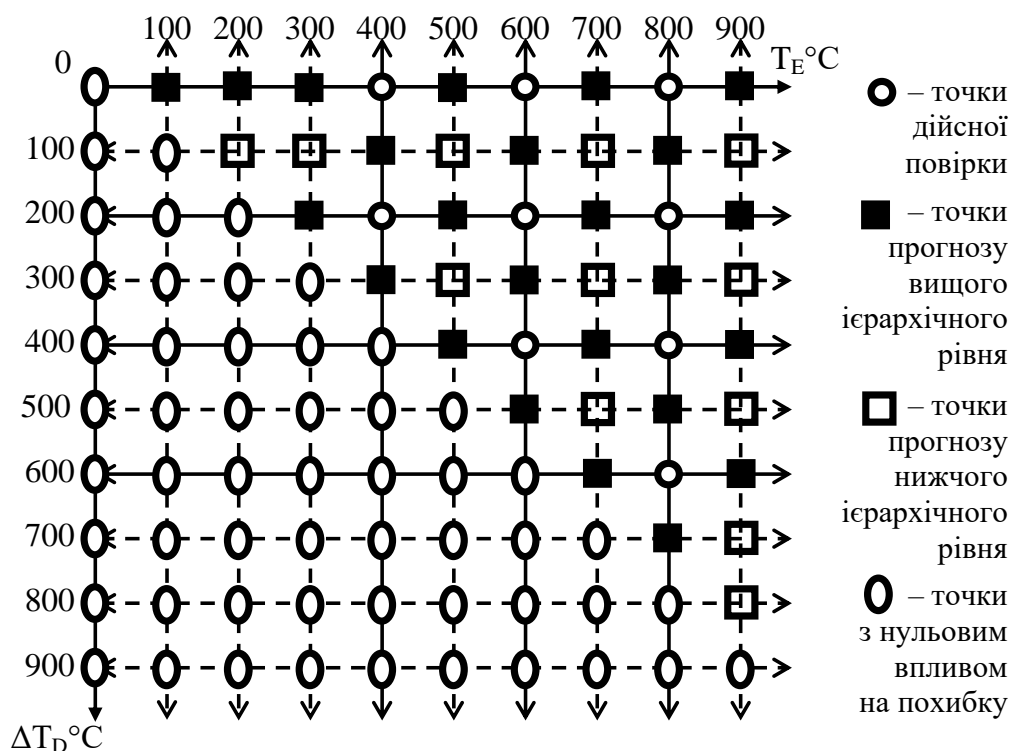


Рис. 4.13. Шляхи побудови регресійних моделей при апроксимації результатів експериментальних досліджень

Тому їх похибка перестає впливати на результат вимірювання. На рис. 4.13 ці точки позначені нулями. По рядках і стовбцях рис. 4.13 відкладено температуру  $T_E$  сталої експлуатації ТП та зміну поточної температури  $\Delta T_D$  відповідно. Як вже було відзначено у § 2.1, якщо температура  $T_E \rightarrow 0$ , то похибка  $\Delta e_{TC}^{DR} \rightarrow 0$ , тобто електроди не деградують. Але якщо електроди не деградують, тоді немає і похибки від набутої термоелектричної неоднорідності, тобто  $\Delta e_{TC}^{NEOD} \rightarrow 0$ . Це також відображено на рис. 4.13.

Результати дійсних експериментальних досліджень (позначені кільцями) розміщуються, згідно із даними [141, 142], практично у центрі рис. 4.13. На їх основі будуюмо регресійні моделі похибок ТП відповідно по осі температури  $T_E$  постійної експлуатації ТП (дані подано безпосередньо у [141, 142]) та по осі зміни поточної температури  $\Delta T_D$ , враховуючи рівність максимальних похибок від дрейфу ФП ТП та від набутої термоелектричної неоднорідності, тобто (2.46). Отримані значення результатів віртуальних експериментальних досліджень, позначені на рис. 4.13 чорними (залитими)

квадратами, служать результатами прогнозу вищого ієрархічного рівня.

Слід відзначити, що, перед заповненням таблиць згідно із рис. 4.13, доцільно перевірити статистичну значущість коефіцієнтів всіх математичних моделей за допомогою Т-критерію [285-287, 293, 294]. Це дає змогу вилучити коефіцієнти при тих членах моделей, які не суттєво впливають на їх похибки. На жаль оцінити якість отриманих за допомогою МНКВ математичних моделей в цілому шляхом обчислення коефіцієнта детермінації неможливо. Це пов'язано з тим, що для математичних моделей, отриманих за допомогою МНКВ не виконується декомпозиція дисперсій.

На основі прогнозу вищого ієрархічного рівня будуюмо регресійні моделі похибок ТП нижчого ієрархічного рівня. При цьому регресійні моделі похибок ТП нижчого ієрархічного рівня будуюмо вздовж осі температури  $T_E$  постійної експлуатації ТП або вздовж осі зміни профілю температурного поля  $\Delta T_D$  залежно від того, де більше даних. У результаті будуть заповнені усі клітинки таблиць згідно із рис. 4.13 Таких таблиць має бути шість, відповідно до діапазону часу експлуатації від 0 до 1500 годин з дискретністю 250 годин. Вони подані у Додатку У. Відповідно до прийнятої ієрархії моделей, інші моделі будуть ще нижчого ієрархічного рівня, ними нехтуємо.

Отримані регресійні моделі похибки від дрейфу ФП ТП для електродів хромель і алюмель діаметром 1,2 мм, що відповідають рядку таблиці  $T_E = 800^\circ C$ , як приклад подані у табл. 4.1. Як видно з цієї таблиці, для отриманих за допомогою МНКВ регресійних моделей дрейфу ФП електродів ТП виявилася достатньою поліноміальна модель другого порядку.

Функція залежності похибки від набутої термоелектричної неоднорідності має дещо складніший характер, тому її регресійні моделі високої точності виявилися також складнішими.

Регресійні моделі похибки від набутої термоелектричної неоднорідності для електродів хромель і алюмель діаметром 1,2 мм, що відповідають стовбцю таблиці  $\Delta T_D = 800^\circ C$ , як приклад подані у табл. 4.2.

Таблиця 4.1. Регресійні моделі дрейфу ФП електродів ТП, отримані за допомогою МНКВ

№		Хромель №1	Хромель №2	Алюмель №1	Алюмель №1	Алюмель №2	Алюмель №2
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Вид моделі	$\hat{y} = a_1 \sqrt[4]{\tau} + a_2 \sqrt[3]{\tau}$	$\hat{y} = a_1 \sqrt[4]{\tau} + a_2 \sqrt[3]{\tau}$	$\hat{y} = a_1 \sqrt[4]{\tau} + a_2 \sqrt[3]{\tau}$	$\hat{y} = a_1 \sqrt[4]{\tau} + a_2 \sqrt{\tau}$	$\hat{y} = a_1 \sqrt[4]{\tau} + a_2 \sqrt[3]{\tau}$	$\hat{y} = a_1 \sqrt[4]{\tau} + a_2 \sqrt{\tau}$
2	Коефіцієнти моделі	a1= 47,35 a2= 6,297	a1=43,41 a2=5,55	A1=13,94 A2= -4,95	a1=2,48 a2=-0,88	a1= -21,7 4 a2= -4,52	a1=-27,06 a2=-0,60
3	Сума похибок	$1,6 \cdot 10^{-12}$ мкВ	$9 \cdot 10^{-13}$ мкВ	$1,1 \cdot 10^{-13}$ мкВ	$4,3 \cdot 10^{-13}$ мкВ	$7,8 \cdot 10^{-14}$ мкВ	$9,2 \cdot 10^{-13}$ мкВ

Як видно з цієї таблиці, для отриманих за допомогою МНКВ регресійних моделей дрейфу ФП електродів ТП можна використати поліноми як другого, так і третього порядку. Регресійна модель третього порядку точніша, але різниця похибок доволі мала.

Таблиця 4.2. Регресійні моделі похибки від набутої термоелектричної неоднорідності електродів ТП, отримані за допомогою МНКВ

		Хромель №1	Хромель №2	Алюмель №1	Алюмель №2
1	2	3	4	5	6
1	Вид моделі	$\hat{y} = a_1 t + a_2 t^2$	$\hat{y} = a_1 t + a_2 t^2$	$\hat{y} = a_1 t + a_2 t^2$	$\hat{y} = a_1 t + a_2 t^2$
2	Коефіц. Моделі	A1=0,45 A2=-3·10 <sup>-4</sup>	a1=0,53 a2=-4,4·10 <sup>-4</sup>	a1=-0,08 a2=-8·10 <sup>-5</sup>	a1=-0,097 a2=-2·10 <sup>-5</sup>
3	Сума похибок	$-1,1 \cdot 10^{-12}$ мкВ	$-2,6 \cdot 10^{-13}$ мкВ	$4,3 \cdot 10^{-14}$ мкВ	$1,8 \cdot 10^{-13}$ мкВ
7	Вид моделі	$\hat{y} = a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3$	$\hat{y} = a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3$	$\hat{y} = a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3$	$\hat{y} = a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3$
8	Коефіц. Моделі	A1=0,36 a2=8,5·10 <sup>-5</sup> a3=-3,44·10 <sup>-7</sup>	a1=0,61 a2=-7,6·10 <sup>-4</sup> a3=2,9·10 <sup>-7</sup>	a1=-0,2 a2=5,5·10 <sup>-4</sup> a3=-4,2·10 <sup>-7</sup>	a1=-0,25 a2=6·10 <sup>-4</sup> a3=-5,7·10 <sup>-7</sup>
9	Сума похибок	$3 \cdot 10^{-11}$ мкВ	$5 \cdot 10^{-11}$ мкВ	$-1,5 \cdot 10^{-12}$ мкВ	$5,6 \cdot 10^{-12}$ мкВ

Як було вказано, отримані за допомогою регресійних моделей таблиці

дійсних та інтерпольованих результатів експериментальних досліджень похибки ТП типу ХА, структура яких відповідає рис. 4.13, подано у Додатку У. Кожна таблиця містить похибки для одного з часів експлуатації (250, 500, 750, 1000, 1250 та 1500 годин), який вказано у лівому верхньому кутку. По горизонталі таблиць вказано температуру експлуатації ділянок електродів ТП (від  $100^{\circ}\text{C}$  до  $900^{\circ}\text{C}$ ), а по вертикалі – поточну температуру (також від  $100^{\circ}\text{C}$  до  $900^{\circ}\text{C}$ ). Результати дійсних експериментальних досліджень у таблиці Додатку У відзначені рамкою.

Розроблена нейромережева модель похибки ТП типу ХА [295-297] представляє собою трьохшаровий перцептрон [280]. Його структура подана на рис. 4.14. Вхідний шар виконує лише розподільчі функції. Схований шар містить 15 нейронів із сигмоїдною функцією активації. Вихідний нейрон – лінійний.

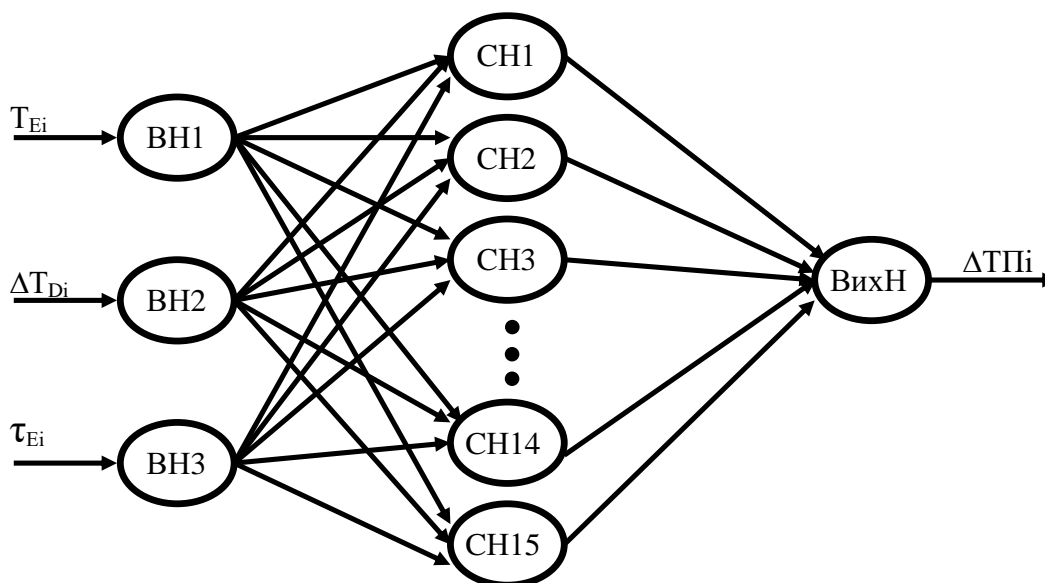


Рис. 4.14. Нейромережева модель похибки ТП

Для побудови нейромережевої моделі похибки ТП необхідно виконати наступні операції:

1. Сформувані навчальну та тестову вибірки для НМ. Як тестову вибірку слід використати повний обсяг результатів дійсного експериментального дослідження та сформованих віртуальних значень при всіх використаних значеннях температури  $T_E$  і часу  $\tau_E$  експлуатації ТП, а також зміни

поточної температури  $\Delta T_D$ . Структура вектора навчальної вибірки для нейронної мережі моделі похибки ТП подана у таблиці 4.3. Сама тестова вибірка подана у додатку Ф. Вона включає всі значення похибки, вказані у Додатку У. Таким чином, у склад тестової вибірки ввійдуть 600 векторів.

Таблиця 4.3. Структура вектора тестової та навчальної вибірки для нейронної мережі моделі похибки ТП

Час експлуатації, год.	Температура експлуатації, °С	Зміна поточної температури, °С	Значення похибки, мкВ
$\tau_E$	$T_E$	$\Delta T_D$	$\Delta_E$

2. Як навчальну доцільно використати тестову вибірку з вилученням, згідно із рекомендаціями [276], приблизно 20% випадкових векторів. Така навчальна вибірка подана у додатку Х. У її склад входять 472 вектори.
3. Навчити НМ з використанням створеної згідно із п. 2 навчальної вибірки, а потім протестувати НМ за допомогою створеної згідно із п. 1 тестової вибірки. При цьому на входи НМ подають значення  $T_E$ ,  $\tau_E$  та  $\Delta T_D$ , на виході отримують значення похибки ТП, викликані деградацією її електродів.
4. Отримати вагові коефіцієнти та зміщення нейронів навченої НМ.

Навчання НМ проводилося у середовищі MatLab2009 за методом Левенберга-Маркуарта [294]. Максимальна допустима середньоквадратична похибка навчання була задана 0,000001. Як було вказано, обсяг навчальної вибірки становив 472 вектори, а тестової – 600 векторів. 128 вибраних випадково векторів тестової вибірки не співпадало з навчальною вибіркою.

Навчання велося на протязі 2000 епох та тривало від 1 до 4 хвилин.

Максимальна відносна похибка навчання (при прогнозі похибок для векторів, що входять у навчальну вибірку) не перевищувала 10,5%, а середня відносна похибка не перевищувала 1,5%. Максимальна відносна похибка тестування (при прогнозі похибок для всіх векторів, що входять і не входять у

навчальну вибірку) не перевищувала 11,3%, а середня відносна похибка не перевищувала 2%. Такі результати можна вважати цілком задовільними, зміщення моделі на 1,5% та 2% є прийнятними.

Розподіл похибок моделі відносно тестової вибірки показано на рис. 4.15. Як видно з рис. 4.15, максимальні значення похибок практично симетричні відносно нуля і доволі рівномірно розподілені по всій тестовій вибірці. Це означає, що похибка моделі носить випадковий характер, тобто є адекватною щодо загального тренду похибок ТП.

Вагові коефіцієнти та зміщення нейронів схованого та вихідного шару нейромережевої моделі похибки термодинамічного типу ХА подані у Додатку Ц.

Для тестування отриманої нейромережевої моделі похибки ТП типу ХА за її допомогою було побудовано графіки, подані на рис. 4.16 ... 4.18.

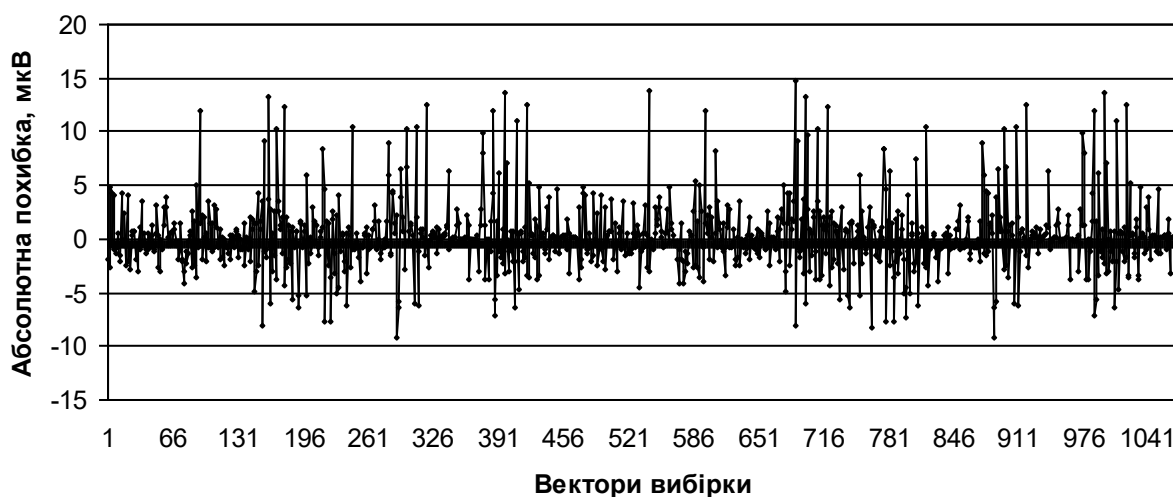


Рис. 4.15. Графік похибок отриманої нейромережевої моделі похибки ТП

На рис. 4.16 подано залежність похибки ТП від температури експлуатації для ТП типу ХА. При цьому час експлуатації вибрано фіксованим (1000 годин), а зміни профілю температурного поля – відсутні. Порівняння отриманих значень похибки з тестовою вибіркою (див. Додаток Ф) показало, що похибка отриманої нейромережевої моделі не перевищує 8,3 мкВ, що приблизно відповідає 0,2°C. Така похибка моделі цілком прийнятна.

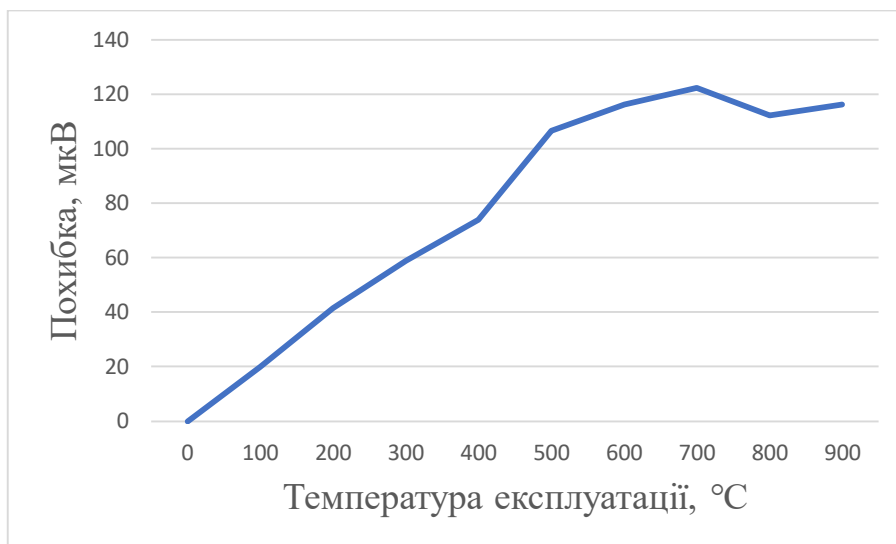


Рис. 4.16. Залежність похибки ТП від температури експлуатації для ТП типу ХА при часі 1000 годин та стаціонарному профілі температурного поля

На рис. 4.17 подано залежність похибки ТП від зміни профілю температурного поля (тобто поточної температури) для ТП типу ХА. При цьому час та температура експлуатації фіксовані (1000 годин, 800°C). Порівняння отриманих похибок з тестовою вибіркою (Додаток Ф) показало, що похибка отриманої нейромережевої моделі не перевищує 15,1 мкВ, що приблизно відповідає 0,4°C. Така похибка моделі також цілком прийнятна.

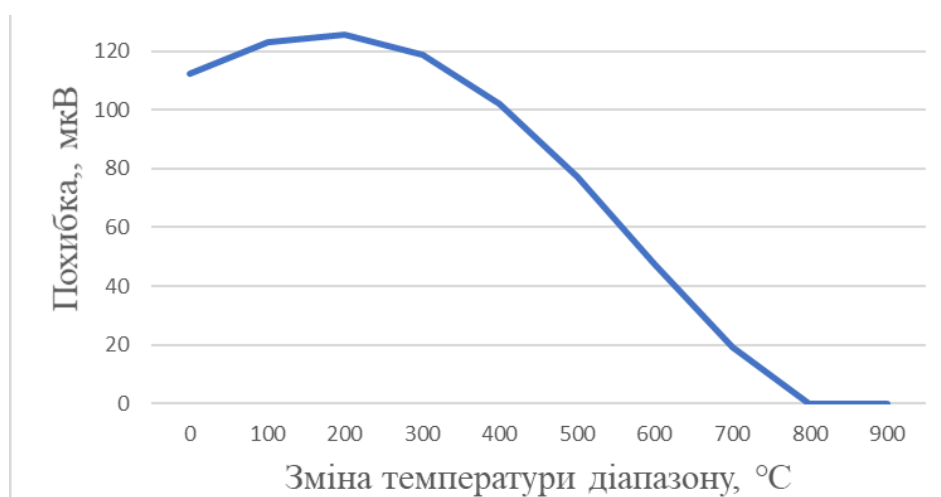


Рис. 4.17. Залежність похибки ТП від зміни поточної температури для ТП типу ХА при температурі експлуатації 800°C та часі експлуатації 1000 годин

На рис. 4.18 подано залежність похибки ТП від зміни часу експлуатації для ТП типу ХА. При цьому температура експлуатації 800°C не змінюється та



зміни профілю температурного поля відсутні. Порівняння отриманих значень похибки з тестовою вибіркою (див. Додаток Ф) показало, що похибка отриманої нейромережевої моделі не перевищує 11,7 мкВ, що приблизно відповідає 0,3°C. Така похибка моделі також цілком прийнятна.

У даному параграфі вдосконалено метод найменших квадратів, а також показано, що поліноміальна модель без вільного члена на його базі може коректно (з точки зору математики) описати залежність похибки ТП від часу та/або температури її експлуатації. Застосування методу дало змогу, шляхом інтерполяції та екстраполяції результатів експериментальних досліджень похибок ТП типу ХА, збільшити їх обсяг і сформуванати навчальну та тестову вибірки для нейромережевої моделі похибки ТП від деградації електродів. Тестування цієї моделі показало її достатньо високу якість – її похибка відносно результатів експериментальних досліджень не перевищує 0,4°C.

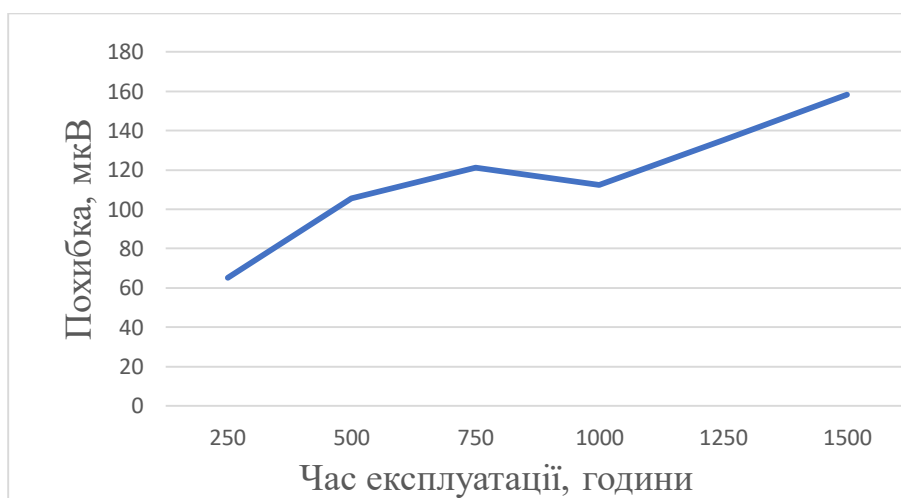


Рис. 4.18. Залежність похибки ТП від часу експлуатації для ТП типу ХА при температурі 800°C та стаціонарному профілі температурного поля

#### 4.4 Структури систем, що реалізують розроблені методи

Розроблені у попередніх розділах оперативні методи визначення похибки ТП і діагностування її електродів потребують відповідних засобів для підвищення точності, метрологічної надійності та автономності систем вимірювання підвищених температур. Але затрати на зменшення похибки ВК

термо-е.р.с. на сьогодні на порядок нижчі, ніж на реалізацію методів підвищення точності ТП. Тому, аналогічно до [173], можна сформулювати правило – якщо похибки ТП до корекції домінували у ВК, то після корекції похибок ТП стан не повинен змінитися – невиключені похибки ТП і надалі повинні домінувати серед інших похибок ВК – похибки ВК повинні надалі бути меншими похибки ТП після реалізації методів підвищення їх точності.

Структура ВК температури за допомогою ТЕП з КПТП, подана на рис. 1.1, має бути багатоточкова [52] – у такій системі легше використати структурно-алгоритмічні методи підвищення точності. Першим компонентом ВК є подовжувальні провідники ПП. Як показано у § 1.1, їх похибки сумірні з похибками ТП, що суперечить прийнятому правилу. Корекція похибки ПП [143] за трудомісткістю сумірна із корекцією похибок ТП. Тому слід усунути самі ПП (і усунути їх похибку), розмістивши сенсор схеми СКТВК в зоні вільних кінців ТП. Тоді ПП будуть мідними і не будуть вносити похибки.

Але тоді розглянута у § 1.1 мостова схема [28, 143] для СКТВК (див. рис. 1.1) має надто велику похибку через вплив провідників підключення сенсора. Пропозиція розмістити у головці ТП розроблену цілу мостову схему з двома термометрами опору [143] (для зменшення різниці між ФП ТП і мостової схеми, див. рис. 1.2) викликає похибку від температурних змін сталих резисторів схеми. Крім того, міст з двома сенсорами дуже трудомісткий у налаштуванні, особливо при переході до індивідуальної ФП, (для підвищення точності), а у [143] не подана методика його налаштування.

У [162] була запропонована потенціометрична схема (див. додаток Ч), що вимагає лише одного термометра опору та одного резистора (стабільного а не точного і розміщеного не у головці ТП, а у корпусі приладу). В цій схемі опір термоперетворювача опору  $R_t$  (розміщений у головці ТП) визначається за опором опорного резистора  $R_n$  за формулою

$$R_t = R_n \frac{N_t}{N_n}, \quad (4.35)$$

де  $N_t$  і  $N_n$  – коди спадів напруги на термометрі опору і опорному резисторі.

При використанні як  $Rn$  резистора С5-5 [298] із  $TKO = 0,005\%/^{\circ}C$  у діапазоні робочих температур  $(20\pm 15)^{\circ}C$  він внесе похибку  $0,075\%$ , що відповідає  $0,18^{\circ}C$ . При використанні АЦП, що входить у мікроконвертор ADUC834 (випадкова похибка менше  $1$  мкВ, нелінійність  $0,0015\%$ ) [151], похибками від  $Nt$  та  $Nn$  можна нехтувати. Опір проводів підключення  $Rt$  практично не впливає на похибку вимірювання [28]. Зміни струму у вимірювальному колі, згідно із [28], теж не впливають на похибку вимірювання  $Rt$ , а оптимальне значення струму можна визначити за [180]. Перевагою схеми є практична відсутність налаштування, достатньо внести у пам'ять дійсні значення  $Rn$  і  $Rt$ . Аналіз похибок показує, що, при визначенні опору  $Rt$  при  $20^{\circ}C$  за допомогою термометра ТЛ-18 [299] похибка СКТВК не буде більшою за  $0,15^{\circ}C$ . Слід відзначити, що схему [162] доцільно використовувати лише при цифровому опрацюванні даних (наприклад, за допомогою мікроконтролера),

Недоліком багатоточкових систем вважають необхідність комутації термо-е.р.с. ТП, які мають малу чутливість. Тому слід використовувати ключі з низькою паразитною е.р.с. та допустимою напругою загального виду та міжканальних завад до  $330$  В [52, 140]. На сьогодні лише реле на герконах з додатковими термовирівнювачами [52, 233, 234] забезпечують такі вимоги. Комутатор на реле типу РГК-15 [52, 234] забезпечує паразитну е.р.с. не більше  $0,5 - 1$  мкВ. Конструкція термовирівнювачів не складна, передбачає виконання контактних площадок, куди впаяні сусідні контакти окремих герконів, як довгих прямокутників тільки із протилежної до реле сторони плати. Зазор між контактними площадками – мінімально допустимий, отвори не металізовані. Контакти герконів впаюють з надлишком припою, що створює валики, а щілину між ними заповнюють теплопровідною пастою на базі окису берилію. Такі термовирівнювачі не вимагають дорогих матеріалів та обладнання, вводиться лише одна технологічна операція – заповнення щілини теплопровідною ізоляційною пастою. Додатково зменшити паразитну е.р.с. можна при подачі на реле на  $1 - 2$  мілісекунди напруги спрацювання та

утримування контактів реле при меншій у приблизно 2,5 рази напрузі. При потребі інвертувати полярність доцільно використати розроблений у [233] ключ на двох реле РГК-15, одне з яких має перехрещені виводи.

Використання окремого підсилювача П (див. рис. 1.1) на сьогодні недоцільне. Наприклад, мікроконвертори ADUC834 містять високоякісний підсилювач [151]. Рівень шумів цих АЦП (0,35 мкВ на діапазонах 20 – 80 мВ) і нелінійність (не більше 0,0015%) задовольняє вимоги систем вимірювання температури найвищої точності. Мікроконтролер, що входить в їх склад, має оперативну пам'ять 2304 Б та пам'ять програм 62 кБ. Його програмують через послідовний інтерфейс (не потрібний програматор). Тому мікроконвертори є найкращою базою для побудови ВК систем вимірювання температури. Високу точність, метрологічну надійність та автономність при високій ефективності забезпечують методи встановлення нуля та калібрування [181], а також методи контролю нелінійності АЦП запропоновані у [300-314].

Інтерфейс ІФ не має безпосереднього відношення до методичної або інструментальної похибки вимірювання, але може її збільшувати за рахунок дії завад загального виду [138 - 140]. Тому ІФ повинен забезпечити опір не менше 100 МОм і ємність не більше 2 пФ. Для мікроконверторів доцільно використати модернізований ІФ типу RS-232 [179], який вимагає всього двох високоякісних оптронів [52].

Для зменшення впливу завад загального виду важливу роль грає блок живлення БЖ (див. рис. 1.1), що повинен мати великий прохідний опір і малу прохідну ємність [138 - 140]. Відомі рішення (екрануючі металеві прокладки та стінки у трансформаторах живлення) доволі складні, такі трансформатори не випускають серійно [138]. У [210 - 213] запропоновано жити ВК від акумулятора / конденсатора великої ємності. Його заряд, за допомогою реле, періодично відновлюють від блока живлення без гальванічної розв'язки. Пристрій керування не дозволяє одночасне спрацювання реле комутатора ТП і реле відновлення заряду акумулятора. Вимоги до мережевого блока живлення низькі, його завади практично не потрапляють у вимірювальний

канал, зокрема, вигідно використати зарядний пристрій мобільних телефонів.

Розглянувши доцільне виконання всіх блоків високоточного вимірювального каналу температури оцінимо похибку вимірювання ним термо-е.р.с. ТП  $\Delta_E$  та похибку отримання значення температури  $\Delta_{ZT}$  за його допомогою, а також перевіримо, чи вдається виконати сформульоване на початку параграфа правило:

1. подовжувальні провідники відсутні, тому їх похибка рівна нулю;
2. похибка схеми корекції температури вільних кінців не перевищує  $0,15^\circ\text{C}$  [162, 163, 298, 299];
3. похибка комутатора менша  $0,5\text{мкВ}$ , що для ТП типу ХА рівне  $0,025^\circ\text{C}$  [233, 234];
4. при встановленні нуля ADUC834 (шуми –  $0,35\text{ мкВ}$ , [151]) його адитивна похибка не буде більшою  $1\text{мкВ}$ , що для ТП типу ХА відповідає  $0,025^\circ\text{C}$ ;
5. при калібруванні ADUC834 [151], його мультиплікативна похибка не буде більшою похибки джерела напруги калібрування та подільника. Похибка  $\Delta_{DK}$  стабілізатора AD780 [315] рівна  $0,01\%$  при вихідній нарузі  $2,5\text{ В}$ . Для калібрування діапазонах  $20, 40$  і  $80\text{ мВ}$  використаєм подільник HP1-22 [316]. Сумарна мультиплікативна похибка буде менша  $0,015\%$  ( $0,25^\circ\text{C}$ );
6. сумарну похибку обчислювального каналу (корекції температури вільних кінців, лінеаризації, розрахунку температури за значенням термо-е.р.с. ТП), при використанні подвійної розрядності, можна оцінити на  $0,15^\circ\text{C}$ .

Сумарна похибка електричного тракту ВК (пп. 1...6) не більша  $0,35^\circ\text{C}$ . Якщо порівняти цю похибку із невиключеними похибками ТЕП з КППП (див. §2.4), то видно, що сформульоване на початку параграфа правило виконано. Вибрані технічні рішення забезпечують похибку електричного тракту ВК значно меншу за похибку ТП. При цьому отриманий ВК не надто складний і дорогий, хоча для ТП без корекції явно надлишковий.

Як показано у § 4.1, час виконання розроблених оперативних методів визначення похибки ТП та діагностування стану її електродів надто великий, щоби реалізувати їх безпосередньо у складі систем регулювання температури

більшості об'єктів. Хоча за рахунок потужності нагрівачів можна зменшити час нагріву (див. рис. 4.8), але час охолодження не зменшується. На протязі цього часу ТЕП з КПТП з точки зору регулювання температури об'єкта має значні недоліки – при цілеспрямованій зміні профілю температурного поля зміна термо-е.р.с. головної ТП через набуту термоелектричну неоднорідність може бути не пов'язана із змінами температури об'єкта. Це може вести до розхитування системи регулювання, що може вести до аварійних ситуацій.

Виходом може бути використання ТЕП з КПТП і оперативних методів підвищення його точності не прямо у контурі регулювання (що працює у реальному часі), а у допоміжному, суто вимірювальному ВК, який служить для корекції похибок контуру регулювання [317 - 319]. Слід відзначити, що електроди ТП деградують доволі повільно [29, 34, 50] – ТП типу ХА при температурі експлуатації  $800^{\circ}\text{C}$  у середньому дрейфує зі швидкістю менше  $0,2^{\circ}\text{C}$  на добу. Тобто коригувати похибку ТП варто що 2...5 діб експлуатації.

Тоді ВК, що взаємодіє з ТЕП з КПТП, буде працювати не у реальному часі, а система у цілому повинна бути двоконтурною – контур регулювання повинен працювати у реальному часі. Структура системи подана на рис. 4.19.

Її контур регулювання – близький до традиційного – реалізує закон регулювання, потрібний для даного термоагрегата. Єдиною його відмінністю від традиційних систем є використання ТЕП з КПТП 1 для усунення впливу набутої термоелектричної неоднорідності його головної ТП на результат вимірювання температури відповідно до [133, 134]. Тому перший контур включає вимірювальний канал ВК 1 і канал регулювання КР 1 для підтримки профілю температурного поля ТЕП з КПТП 1, заданого пристроєм Зад. 1 для режиму експлуатації.

Другий контур майже аналогічний першому – містить ТЕП з КПТП 2, вимірювальний канал ВК 2 і канал регулювання КР 2 профілю температурного поля ТЕП з КПТП 2. Відмінність другого контуру полягає у тому, що пристрій задання Зад. 2 періодично змінює профіль температурного поля ТЕП з КПТП 2 для реалізації розроблених оперативних методів визначення похибки ТП і

діагностування стану її електродів.

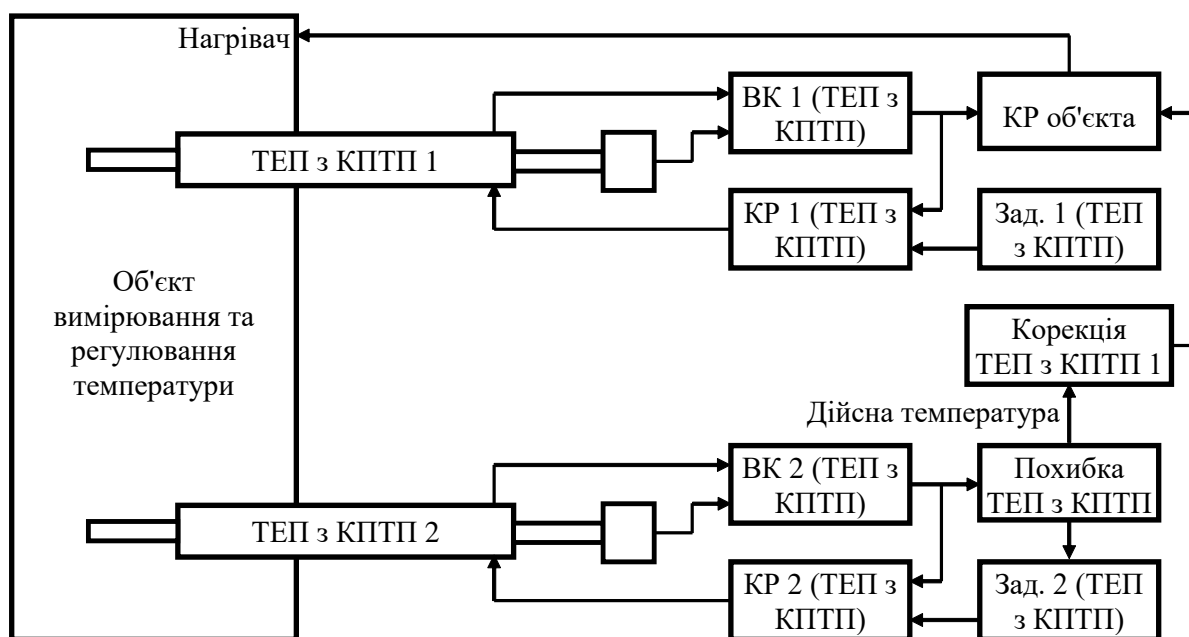


Рис. 4.19 Узагальнена структурна схема двоконтурної системи регулювання температури

Завданням першого контуру є регулювання (підтримання) температури термоагрегата, яке виконує блок КР об'єкта. Завданням другого контуру є підвищення точності першого контуру. Для цього другий контур періодично оперативно визначає похибку головної ТП [219-221], що входить у ТЕП з КПТП 2 і діагностує стан її електродів [223-228]. Після цього проводиться корекція похибки вимірювання температури першим контуром за допомогою блока Корекція ТЕП з КПТП 1. Вихід цього блока, для уніфікації обох контурів, діє на регулятор об'єкта змінюючи відповідним чином регульовану температуру.

ТЕП з КПТП обох контурів розміщені поряд так, щоби температури з'ютів їх головних ТП були однакові. Через те, що похибки ВК 1 та ВК2, які виконані згідно з поданими вище рекомендаціями, значно менші за похибки ТП, різниця температур, виміряних першим і другим контуром, викликана лише похибками головної ТП, що входить у ТЕП з КПТП першого контуру. Тому ця різниця температур буде поправкою для першого контуру.

Однак описаній двоконтурній системі притаманна методична похибка

теплового походження – отримана різниця температур, виміряних першим і другим контуром, все таки викликана не лише похибками головної ТП, що входить у ТЕП з КППП першого контуру, а і різницею самих вимірюваних температур (не ідеальним місцем встановлення ТЕП з КППП 1 і 2).

Слід відзначити, що перший та другий контур розробленої двоконтурної системи практично однакові – обидва контури містять ТЕП з КППП та інші компоненти вимірювального каналу, виконані згідно з поданими вище рекомендаціями. Тому пропонується не визначати наперед роль кожного контуру (робота у складі системи регулювання температури термоагрегата чи корекція похибки вимірювання температури), а періодично міняти цю роль. У такому випадку на протязі деякого часу один контур працює у складі системи регулювання температури термоагрегата, а інший – визначає похибку своєї головної ТП та проводить діагностування стану її електродів за допомогою розроблених оперативних методів. Через деякий час контури міняються ролями. У такому випадку кожен контур вимірює температуру за допомогою головної ТП, що входить у склад ТЕП з КППП даного контуру. Тобто корекція похибки головної ТП не включає різницю температур злутів обох головних ТП. При зміні ролі контурів зміна регульованої температури не буде перевищувати, згідно із § 2.4,  $1,3^{\circ}\text{C}$ , що цілком прийнятно для систем регулювання температури термоагрегата.

Структурна схема такої двоконтурної системи подана на рис. 4.20. У склад кожного контуру входять ТЕП з КППП 1 та 2, вимірювальні канали ВК 1 та ВК 2, канали регулювання КР 1 та КР 2, а також пристрої задання профілю температурного поля Зад. 1 та Зад. 2. Всі ці блоки ідентичні, вони виконані згідно із поданими вище рекомендаціями. Виходами обох контурів є поточні значення температури (з корекцією похибки всіх їх блоків), а входами – режим роботи (у складі системи регулювання температури об'єкта чи визначення похибки головної ТП та діагностування стану її електродів) та профілі температурного поля, які повинні реалізувати КР 1 та КР 2.



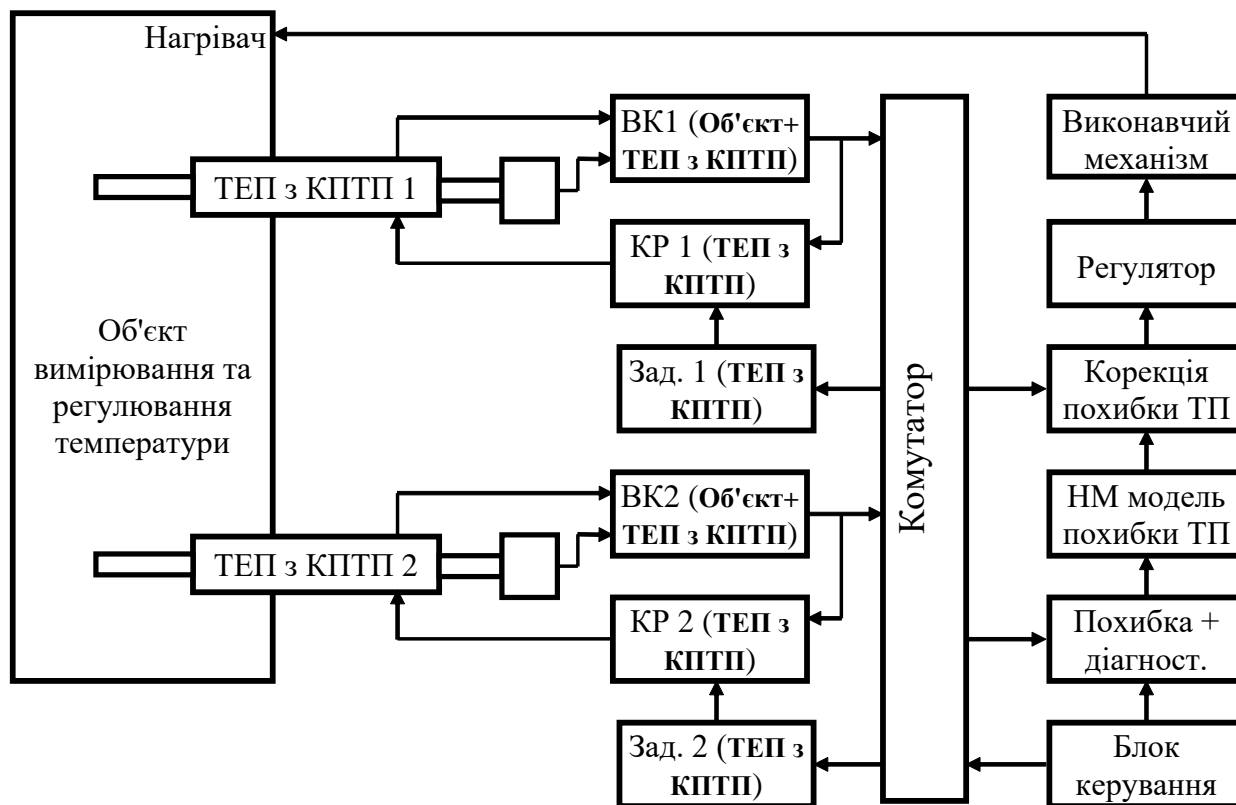


Рис. 4.20. Узагальнена структурна схема вдосконаленої двоконтурної системи регулювання температури

Відповідний режим роботи контурів задає Комутатор, який перемикає відповідні входи і виходи контурів згідно із сигналами блока керування. При цьому вихід контуру, що у даний час працює у складі системи регулювання температури об'єкта, спочатку поступає на вхід блока корекції похибки його головної ТП згідно із її моделлю. Відкориговане значення температури поступає на регулятор температури об'єкта, що реалізує відповідний закон регулювання за допомогою виконавчого механізму. На вхід пристрою задання Зад контуру поступають значення температури, що відповідають профілю температурного поля експлуатації ABCD (див. рис. 2.10).

Вихід контуру, що у даний момент працює у режимі визначення похибки своєї головної ТП та діагностування стану її електродів, поступає на вхід блоку Похибка + діагност. Саме цей блок визначає похибку головної ТП, що входить у склад ТЕП з КПТП цього контуру, проводить діагностування стану її електродів та ініціює оновлення НМ індивідуальної моделі похибки головної ТП згідно із методом, розробленим у § 4.3. На входи цього контуру (на входи

його пристрою Зад.) поступають значення температури зон ТЕП з КПТП, потрібні для визначення похибки головної ТП (профіль АВ1С1D, див. рис. 2.10) та діагностування стану її електродів (профілі температурного поля згідно із рис. 3.4). Отримані індивідуальні НМ моделі похибки головних ТП обох контурів служать для корекції похибки того ТЕП з КПТП, який у даний час працює у контурі регулювання температури термоагрегата.

Таким чином, незважаючи на великі похибки головних ТП обох контурів, похибка вимірювання температури об'єкта буде визначатися їх невиключеною під час корекції похибкою. При цьому різниця температур між зльотами головних ТП, що входять у склад ТЕП з КПТП 1 та ТЕП з КПТП 2, не буде впливати на невиключену похибку цих головних ТП.

Перевагою розроблених двоконтурних систем регулювання є те, що алгоритм керування температурою об'єкта, незважаючи на зміни термо-е.р.с. головних ТП, які викликані змінами профілю температурного поля під час виконання процедур визначення похибки та діагностування стану електродів головних ТП, залишається незмінним. Ці зміни термо-е.р.с. не стосуються контуру, що на даний час працює у складі системи регулювання температури термоагрегата. Тому розхитування системи регулювання температури об'єкта не виникає. Другою перевагою двоконтурних систем регулювання є те, що контур, який у даний момент проводить визначення похибки своєї головної ТП та діагностування стану її електродів, працює не у реальному часі. При зміні температури об'єкта (її сталість - умова успішної реалізації розроблених оперативних методів визначення похибки ТП і діагностування її електродів) чергова спроба визначення похибки може бути проігнорована. При цьому про сталість температури об'єкта можна судити за результатами вимірювання температури контуром, що у даний момент регулює температуру об'єкта. Це дає змогу відсіяти невдалі спроби визначення похибки головної ТП контуру, який проводить заходи з підвищення точності. Тому метрологічна надійність визначення похибки головної ТП буде висока та не залежатиме від змін температури її зльоту. Крім того, розроблені структурні схеми двоконтурної

системи регулювання дають змогу виключити вплив на динамічні властивості контуру регулювання температури об'єкта поганих динамічних властивостей ТЕП з КППП під час визначення похибки своєї головної ТП та діагностування стану її електродів.

У даному параграфі розроблено структурні схеми двоконтурних систем вимірювання і керування температурою об'єктів, які враховують особливості реалізації оперативних методів корекції похибок ТЕП з неоднорідними ТП при побудові систем вимірювання підвищених температур високої точності.

## 4.5 Висновки до четвертого розділу

1. Розроблена спеціалізована трубчата багатозонна піч керування профілем температурного поля вздовж електродів стандартного ТЕП дає змогу реалізувати розроблені оперативні методи визначення поточної похибки головної ТП, що входить у ТЕП з КППП, та діагностування стану її електродів. Розрахунок необхідної потужності нагрівачів зон цієї багатозонної печі дає змогу оцінити конструктивні параметри печі та тривалість реалізації оперативних методів визначення поточної похибки ТП та діагностування стану її електродів.
2. Розроблений нейромережевий метод керування профілем температурного поля ТЕП з КППП не схильний до самозбудження при взаємодії із розробленою раніше спеціалізованою трубчатою багатозонною піччю та дає змогу реалізувати розроблені оперативні методи визначення поточної похибки ТП і діагностування стану її електродів.
3. Вдосконалено метод найменших квадратів, що може коректно описати залежність похибки ТП від часу та/або температури її експлуатації, який дав змогу збільшити обсяг результатів експериментальних досліджень похибок ТП типу ХА за рахунок інтерполяції і екстраполяції та сформуванню навчальної та тестової вибірки для нейромережевої математичної моделі похибки ТП через деградацію її електродів. Тестування моделі показало, що її похибка щодо результатів експериментальних досліджень не перевищує  $0,4^{\circ}\text{C}$ .
4. Розроблені структурні схеми двоконтурних систем вимірювання та керування температурою термоагрегатів дали змогу врахувати особливості реалізації розроблених раніше оперативних методів корекції похибок ТЕП з неоднорідними ТП при побудові систем вимірювання підвищених температур високої точності.

## Розділ 5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗРОБЛЕНИХ МЕТОДІВ

### 5.1 Обладнання для проведення експериментальних досліджень

Для проведення експериментальних досліджень розроблених оперативних методів визначення поточної похибки ТП та діагностування стану її електродів необхідне наступне обладнання:

1. Піч, яка імітуватиме об'єкт вимірювання температури, а також регулятор температури в цій печі. Особливих вимог до цієї печі не ставиться, тому можна використати довільну трубчасту піч, наприклад, типу СУОЛ-0,15.1,1/12М [320];
2. Спеціалізована багатозонна (у макеті 8 зон) трубчаста піч [257 - 261], що, згідно із § 4.1, забезпечує керування профілем температурного поля вздовж електродів стандартного ТЕП, який досліджується;
3. Підсистема вимірювання температури нагрівачів багатозонної печі та керування їх потужністю. Підсистема не мусить бути високої точності – похибка самої підсистеми (без врахування похибки давачів температури, які вимірюють профіль температурного поля печі) може становити 2 – 3°C. Але вона має забезпечити вимірювання температури всіх зон розробленої у § 4.1 багатозонної печі [257 - 261], згаданої у п. 2, вимірювання температури їх вільних кінців, отримання значення температури всіх зон (корекція температури вільних кінців, лінеаризація), обчислення керуючої дії для утримання заданого профілю температурного поля ТЕП з КПТП, підсилення потужності керуючої дії та її реалізацію (встановлення потрібної потужності нагрівачів зон). При цьому підсистема повинна реалізувати відповідний для багатозонних об'єктів метод (закон) регулювання, який не допускає самозбудження. Наприклад, розроблений у [271-275] і §4.2 нейромережевий метод керування з навчанням нейронної мережі на об'єкті керування (тобто багатозонній печі, розміщений у печі СУОЛ);

4. Підсистема вимірювання температури об'єкта вимірювання (печі СУОЛ, згаданої у п. 1) за допомогою ТП, на якій проводиться експериментальне дослідження (похибка якої визначається). До цієї підсистеми ставляться високі вимоги до короткочасної (на час експериментальних досліджень) нестабільності [321] – як мінімум, при дослідженні оперативного методу визначення поточної похибки ТП, її нестабільність, для створення умов достатньо детального вивчення результатів експериментальних досліджень, не повинна перевищувати десятої частини оціненої у § 2.4 невиключеної похибки ТП [242, 243];

5. Стандартний ТЕП, який досліджується. Додатковою вимогою до цього ТЕП є створення можливості задання похибки його ТП [322-324] із достатньою для проведення експериментальних досліджень точністю.

Слід відзначити, що при проведенні експериментальних досліджень підсистеми по п. 3 і 4 можуть бути об'єднані в одну вимірювально-керуючу систему, яка має відповідну точність (згідно із п. 4) та кількість каналів.

Таким чином, для проведення експериментальних досліджень необхідно створити відповідний стенд. Основою для цього стенду було вибрано стенд, на якому було проведено експериментальні дослідження ТЕП з КПТП [321]. Модернізація стосувалася в основному використання розробленої у § 4.1 багатозонної печі [257 - 261], системи керування та програмного забезпечення, яке служить для реалізації розроблених оперативних методів визначення поточної похибки ТП і діагностування її електродів та розробленого у четвертому розділі нейромережевого методу керування профілем температурного поля багатозонної печі [271-275].

Узагальнена структурна схема модернізованого стенда подана на рис. 5.1. В її склад входять піч імітації об'єкта вимірювання та багатозонна піч з керованим профілем температурного поля, а також регулятор Рег.1, багатоточкова вимірювальна підсистема БВПС, багатоканальна керуюча підсистема БКПС та персональний комп'ютер ПК. Температуру, при якій проводяться експериментальні дослідження, підтримує регулятор Рег.1, до

входів якого підключено платиновий термоелектричний перетворювач ТЕП1 типу ПП і термометр опору ТО1 типу 100М (корекція температури вільних кінців), а до виходу нагрівач Н1. Регулятор оснащений також інтерфейсом ІФ1 на базі модифікованого згідно із [179] інтерфейсу типу RS232 (модифікація інтерфейсу полягала на приданні йому мережових властивостей). Результати поточного вимірювання температури та її заданого значення видаються у мережу за запитом ПК. Всі ці елементи не модернізувалися, вони відповідають стенду, описаному у [321].

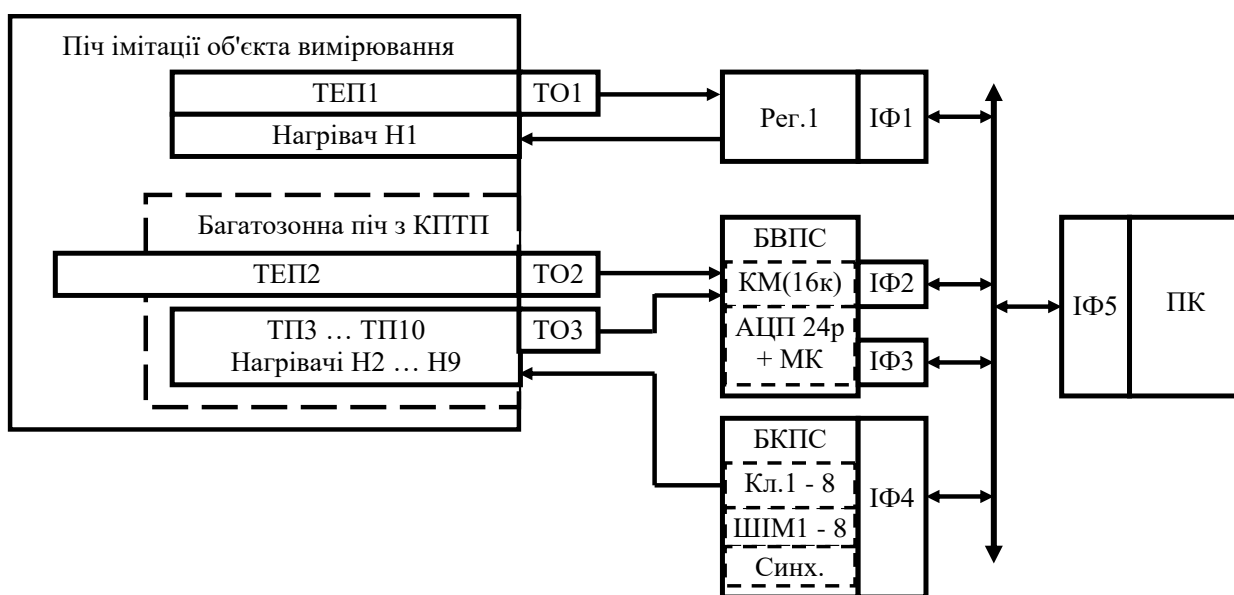


Рис. 5.1. Узагальнена структурна схема стенда для дослідження розроблених методів і засобів

У багатозонній печі з керованим профілем температурного поля (8 зон) розміщено досліджуваний термоелектричний перетворювач ТЕП2, температуру вільних кінців якого вимірює термометр опору ТО2. ТЕП2 та ТО2 підключені до входів 16-ти канального комутатора КМ [52], виконаного на базі реле РГК15 з додатковими термовирівнювачами, реалізованими згідно із [233, 234]. КМ входить у склад багатоточкової вимірювальної підсистеми БВПС. У БВПС входить також мікроконвертор ADUC834 [151] фірми Analog Devices [146], у якому використано 24-х розрядний сигма-дельта АЦП та мікроконтролер. Останній, при реалізації нейромережевого методу керування

багатозонною піччю, може обчислювати значення керуючих впливів за допомогою нейронної мережі. Однак у розробленому стенді, для підвищення гнучкості та полегшення дослідження різних методів, як навчання нейронної мережі, так і її обчислення під час керування температурою, реалізовано на персональному комп'ютері ПК. Тому мікроконтролер циклічно виконує лише наступні операції:

1. розпізнавання команди на проведення циклу вимірювань (поступає від ПК через мережу);
2. встановлення нуля АЦП;
3. калібрування АЦП на діапазонах 20, 40, 80 мВ за допомогою прецизійного стабілізатора AD780 [315] і гібридно-плівкового подільника напруги 301HP5 [325];
4. вимірювання спадів напруги на мідних термометрах опору TO2 та TO3, а також опорному манганіновому резисторі (реалізовано рекомендований у § 4.4 і [162] варіант корекції температури вільних кінців ТП);
5. обчислення опорів термометрів TO2 та TO3 згідно із (4.35);
6. обчислення температур вільних кінців ТП2 і суміщених з нагрівачами Н2 ... Н9 термопар ТП3 ... ТП10, що входять у склад багатозонної печі (із врахуванням індивідуальних ФП TO2 та TO3);
7. видача у мережу команди відключення виходів БКПС від нагрівачів багатозонної печі;
8. вимірювання термо-е.р.с. ТЕП 2 та ТП3 ... ТП10, а також корекція результатів вимірювання температури за даними, отриманими при виконанні пп. 2 і 3;
9. корекція похибки ТЕП2 та ТП3 ... ТП10 від температури їх вільних кінців, корекція похибки нелінійності ТЕП2 та ТП3 ... ТП10 та обчислення значень вимірюваної ними температури;
10. видача у мережу результатів вимірювання температури ТЕП2 та ТП3 ... ТП10;



11. видача у мережу повідомлення про закінчення процесу вимірювань, що грає також роль команди-дозволу підключення виходів БКПС до нагрівачів багатозонної печі;

У складі БВПС, порівняно зі стендом, описаним у [321], модернізовано лише програмне забезпечення мікроконтролера. Тому точність та короткочасна нестабільність БВПС не змінилася. Технічні параметри БВПС приведені у табл. 5.1. Мала короткочасна нестабільність БВПС забезпечується низьким рівнем шумів мікроконвертора ADUC834 [151] та періодичною корекцією його адитивної (встановлення нуля) та мультиплікативної (калібрування) похибок.

Таблиця 5.1. Технічні параметри БВПС

№ п/п	Параметр	Значення
1.	Кількість каналів	16
2.	Діапазон вимірювання	80 мВ
3.	Чутливість	1 мкВ
4.	Границя основної допустимої похибки	$\pm(0,05+0,005(X_{\max}/X-1))\%$
5.	Нестабільність за один день	$\pm(0,0025+0,002(X_{\max}/X-1))\%$
6.	Час вимірювання одного каналу	1,5 с
7.	Зменшення впливу завад нормального виду	70 дБ
8.	Зменшення впливу завад загального виду	140 дБ

Повністю модернізовано БКПС. Структурна схема БКПС подана на рис. 5.2. Потужність нагрівачів Н2 ... Н9 регулюють широтно-імпульсні модулятори ШІМ1 ... 8. Вони реалізовані програмно на мікроконтролері 89С52 [326] та пропускають на нагрівачі Н2 ... Н9 обчислену нейронною мережею кількість періодів мережі відповідно до базової кількості імпульсів. Через те, що використано 8-ми бітний мікроконтролер, базова кількість імпульсів вибрана 250 (відповідає 20 секундному циклу роботи ШІМ).

Нагрівачі Н2 ... Н9 зон багатозонної печі живляться змінним струмом.

Тому у БКПС введено вузол синхронізації, який формує тактові імпульси, що відповідають переходам напруги живлення нагрівачів Н2 ... Н9 через нуль і поступають на вхід переривання IRQ0 мікроконтролера 89С52 [326]. Схема синхронізації складається із першого формувача Ф1, подільника П та другого формувача Ф2. Для зменшення частоти спрацювань ключів Кл.1...8 частота мережі ділиться подільником П на чотири, тобто на широтно-імпульсні модулятори ШІМ1...8 поступають імпульси синхронізації з періодом 80 мс. Ф2 служить для скорочення імпульсів синхронізації до приблизно 20 мкс.

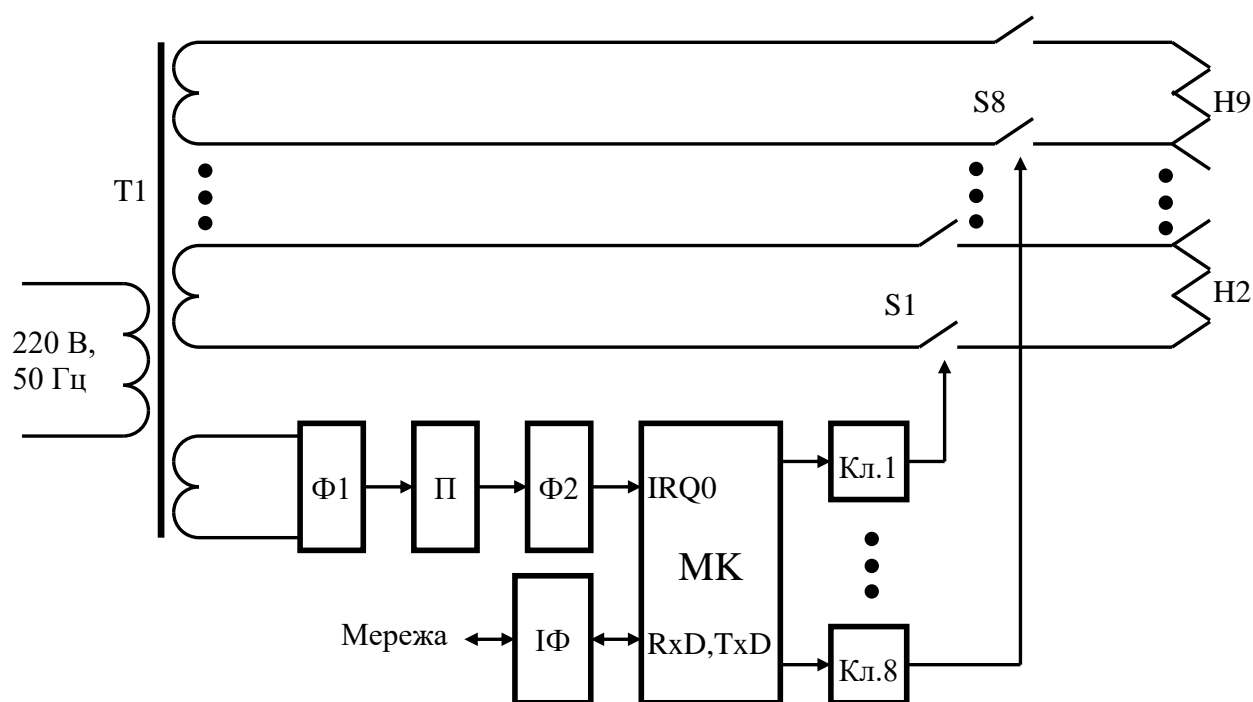


Рис. 5.2. Структурна схема багатоканальної керуючої підсистеми

Для регулювання потужності нагрівачів широтно-імпульсні модулятори ШІМ1...8 на відповідний час вмикають та вимикають ключі Кл.1...8. Як Кл.1...8 використано силові електромагнітні реле з робочим струмом 10 А [327]. Таке рішення дає змогу надійно відключати напругу живлення нагрівачів на час вимірювання їх температури. Через вибір доволі тривалої бази часу (20 секунд) та синхронізації ввімкнення та вимкнення реле з переходами мережі живлення через нуль (коли струм нагрівачів мінімальний) ресурс роботи реле перевищує 600 годин, що цілком досить для проведення

експериментальних досліджень.

Відключення напруги живлення нагрівачів на час вимірювання їх температури проводиться шляхом примусового встановлення у логічний нуль всіх виходів мікроконтролера, що керують реле, безпосередньо після розпізнавання команди на відключення виходів БКПС від нагрівачів багатозонної печі. При цьому робота всіх каналів широтно-імпульсних модуляторів ігнорується. Після розпізнавання команди на підключення виходів БКПС до нагрівачів всі канали широтно-імпульсних модуляторів скидаються, тобто вони починають роботу заново.

Зміну потужності нагрівачів Н2 ... Н9 проводить ПК доволі рідко. Адже розроблений у [271-275] і § 4.2 нейромережевий метод керування профілем температурного поля реалізує розімкнуту систему регулювання. Тому потужність нагрівачів Н2 ... Н9 повинна змінюватися лише після закінчення теплових перехідних процесів, тобто мінімум що години. Тому, аналогічно як і при відключенні напруги живлення нагрівачів на час вимірювання їх температури, всі виходи керування реле примусово встановлюються у логічний нуль безпосередньо після розпізнавання команди на зміну потужності нагрівачів. Далі робота широтно-імпульсних модуляторів відновлюється, але на нагрівачі поступає кількість періодів напруги живлення, що відповідає новому значенню потужності.

Як було показано у § 2.5, методи експериментальних досліджень мають суттєвий недолік – можна дослідити лише обмежену кількість варіантів реалізації досліджуваних методів і засобів. Обмежена кількість варіантів пов'язана з відсутністю деяких компонентів, які мають необхідні для проведення експериментів параметри. Зокрема, обмеження на кількість варіантів експериментальних досліджень методів і засобів корекції похибок ТЕП пов'язана з відсутністю ТЕП із заданими похибками, які повинні бути відкориговані. За допомогою реальних ТЕП можна дослідити лише варіанти корекції похибок, які мають ці реальні ТЕП (точніше ТП, які входять у їх склад). Не відомі ТЕП, похибку яких можна задати під час проведення

експериментальних досліджень. У такому випадку експериментальні дослідження вимірювального каналу температури за участю ТЕП вимушено проводять у два етапи [5, 205] – перевіряють електричний тракт вимірювання температури (фактично канал вимірювання термо-е.р.с. ТП) та сам сенсор температури – ТЕП. Такі експериментальні дослідження мало чим відрізняються від імітаційного моделювання [237]. Вони не дають можливості саме експериментально дослідити особливості оперативних методів визначення поточної похибки ТП та діагностування стану її електродів, що викликає недовіру до них.

Таким чином, впровадження розроблених оперативних методів визначення поточної похибки ТП та діагностування стану її електродів стримується відсутністю ТЕП (точніше ТП), похибки яких можна задавати наперед у потрібних межах для експериментального дослідження впливу на невиключену похибку результату вимірювання температури різних впливаючих величин (наприклад, впливу профілю температурного поля, впливу завад нормального і загального виду та інших) і особливостей виконання цих методів корекції похибок ТП. А неможливість переходу до наскрізного дослідження каналу вимірювання температури зумовлена саме відсутністю ТЕП, у яких можна встановити задане значення похибки.

Принципова схема ТЕП, значення похибки якого можна практично довільно задавати під час експериментальних досліджень, подана на рис. 5.3 [322-324]. До його чутливого елемента, створеного електродами А (наприклад, алюмель) та ділянками Х1, Х2 і Х3 іншого електрода (наприклад, хромель) під'єднані (приварені, припаяні твердим високотемпературним припоєм або зачеканені) два додаткові електроди – М1 і М2. Ці електроди можуть бути, наприклад, мідні (якщо температура дослідження не перевищує 350 - 400°C, наприклад, згідно із [328], при дослідженні методів корекції впливу на результат вимірювання набутої термоелектричної неоднорідності) або срібні (при необхідності дослідження методів корекції похибок ТП при вищих температурах). Додаткові електроди М1 і М2 під'єднують до того електрода

ТП, що, при однакових температурах, створює разом із матеріалом додаткових електродів більшу термо-е.р.с. (має більшу чутливість). Місця підключення цих додаткових електродів вибирають так, щоби вони, при імітації експлуатації ТЕП, потрапили у зону градієнту профілю температурного поля вздовж електродів ТП, як це показано на рис. 5.3 (ділянка X2 розміщена у профілі температурного поля ВС що характеризується максимальною зміною температури).

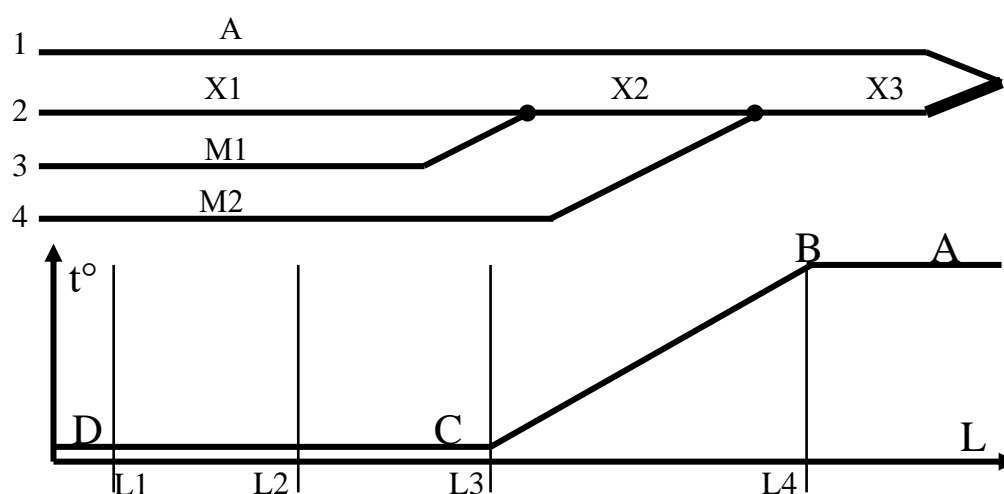


Рис. 5.3. Принципова схема ТЕП, значення похибки якого можна задавати

У складі ТЕП використано чотириохканальні ізоляційні втулки (буси). Через два канали пропущено два термоелектроди ТП, а через два інші – два додаткові електроди. Наприклад, для дослідного зразка ТЕП типу ХА вибрана довжина чохла 120 см. Він розміщений у багатозонній печі із стінкою товщиною 20 мм так, щоби ззовні цієї печі перебував кінець чохла ТЕП довжиною 20 см, а зі сторони вільних кінців – частина чохла довжиною 60 см. Додаткові електроди підключено на відстані 25 см та 55 см від з'єднання (95 см та 65 см від головки ТЕП). Додаткові електроди слід підключати до хромелевого електрода, його чутливість вища за чутливість алюмелевого електрода. Зовнішній вид такого вузла ТП показано на рис. 5.4.

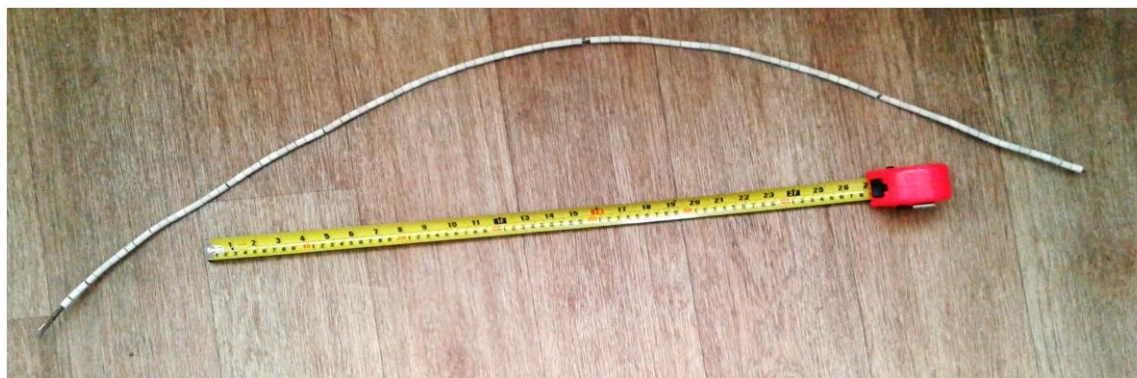


Рис. 5.4. Під'єднання додаткових електродів до ТЕП, значення похибки якого можна задавати

Максимальну похибку поданого на рис. 5.3 ТЕП можна задати шляхом закорочення контактів 3 і 4. Тоді, при умові, що відводи мідні або срібні, отримуємо максимальну зміну генерованої термо-е.р.с. Адже вся ділянка X2 перестає генерувати термо-е.р.с. Значення заданої похибки можна визначити вимірюванням напруги на контактах 3 і 4 коли вони були не закорочені.

Якщо до виводів 3 і 4 підключити змінний резистор R1, як це показано на принциповій схемі рис. 5.5, можна буде задавати проміжні значення похибки ТЕП шляхом зміни опору цього резистора. При цьому значення заданої похибки завжди може контролювати вимірювальний канал K2 шляхом вимірювання напруги на контактах 3 і 4 (на виводах змінного резистора) та порівняння її з напругою, створеною на контактах 3 і 4 без навантаження. Абсолютне значення похибки  $\Delta_{TP}^{ZAD}$ , яка задається, можна обчислити за формулою

$$\Delta_{TP}^{ZAD} = E_{VIL}^{3-4} - E_{RN}^{3-4}, \quad (5.1)$$

де  $E_{VIL}^{3-4}$  – напруга на вільних виводах 3 і 4 (без навантаження);  $E_{RN}^{3-4}$  – напруга на виводах 3 і 4 при підключенні резистора навантаження.

Слід відзначити, що за допомогою змінного резистора R1 можна задати лише від'ємні значення похибок ТЕП – шунтування ділянки X2 може лише зменшити генеровану нею термо-е.р.с. Задати додатні значення похибки ТП можна шляхом пропускання струму через ділянку X2 від зовнішнього джерела E, як це показано на рис. 5.6. Важливим є високоякісне екранування джерела

додаткового струму  $E$ , інакше можливе зростання завад загального виду через взаємний вплив прохідних опорів та ємностей цього джерела та печі, де розміщений ТЕП. Тому найкраще використовувати для створення додаткового струму акумулятор із послідовно ввімкненим магазином опору.

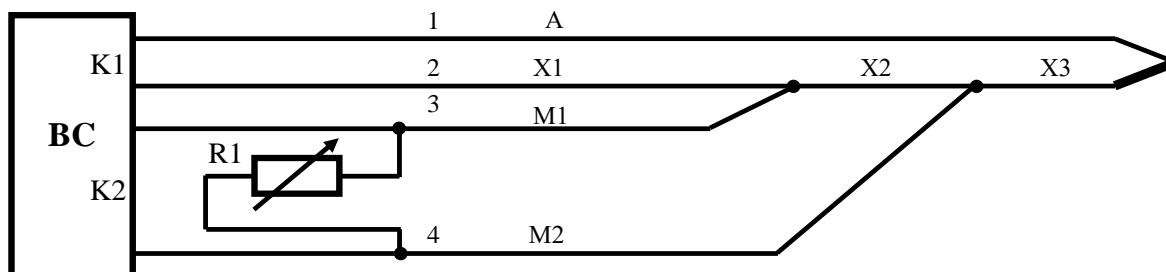


Рис. 5.5. Принципова схема задання значень похибки ТЕП

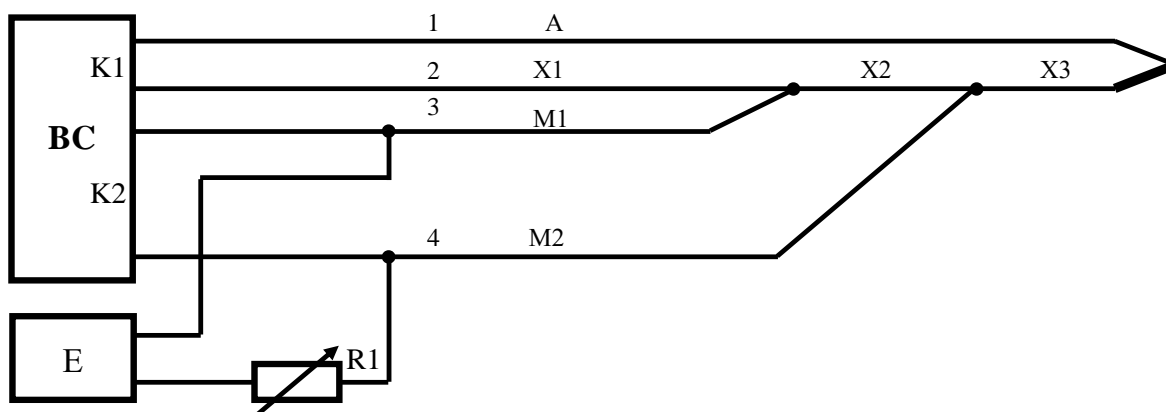


Рис. 5.6. Принципова схема задання додатної похибки ТЕП

Еквівалентна схема задання похибки при використанні схеми рис. 5.5 подана на рис. 5.7. В неї входять генерована ділянкою  $X2$  термо-е.р.с.  $E_{VIL}^{3-4}$  та опори  $R_{X2}$  ділянки  $X2$  хромелевого електрода,  $R_{M1}$  і  $R_{M2}$  мідних додаткових електродів  $M1$  і  $M2$ , а також  $R1$  змінного резистора (магазину опору).

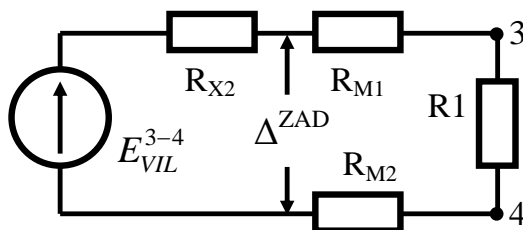


Рис. 5.7. Еквівалентна схема задання значень похибки ТЕП

Як видно з рис. 5.7, дійсна задана похибка  $\Delta_{TP}^{ZAD}$  відрізняється від результату вимірювання її значення у точках 3 і 4 на спади напруги на опорах провідників  $R_{M1}$  і  $R_{M2}$  – розробленому методу задання похибки ТЕП притаманна методична похибка. Тобто внутрішній опір  $R_{X2}$  (опір ділянки X2 хромелевого термоелектрода) еквівалентного генератора  $E_{VIL}^{3-4}$  та опори провідників  $R_{M1}$  і  $R_{M2}$  створюють подільник напруги. Через те, що струм у всьому електричному колі схеми рис. 5.7 однаковий, очевидно, що відносна похибка  $\delta^{ZAD}$  результату вимірювання  $U_{VYM}^{3-4}$  в точках 3 і 4 визначається лише співвідношенням сумарного опору провідників  $R_{M1}$  і  $R_{M2}$  та опору  $R_{X2}$

$$\delta^{ZAD} = \frac{(R_{M1} + R_{M2})}{R_{M1} + R_{M2} + R_{X2}} \cdot 100\% \quad . \quad (5.2)$$

Опори  $R_{X2}$ ,  $R_{M1}$  і  $R_{M2}$  можна визначити за їх геометричними розмірами відповідних електродів та їх матеріалом згідно із [27, 255]

$$R_{X2} = \rho_X \frac{L_{X2}}{S_{X2}} = 0,6 \frac{4 \cdot 0,3}{3,14 \cdot 1,2^2} \approx 0,16 \text{ Ом} \quad , \quad (5.3)$$

$$R_{M1} = \rho_M \frac{L_{M1}}{S_{M1}} = 0,017 \frac{4 \cdot 0,65}{3,14 \cdot 1,2^2} \approx 0,0098 \text{ Ом} \quad , \quad (5.4)$$

$$R_{M2} = \rho_M \frac{L_{M2}}{S_{M2}} = 0,017 \frac{4 \cdot 0,95}{3,14 \cdot 1,2^2} \approx 0,014 \text{ Ом} \quad , \quad (5.5)$$

де  $\rho_X$ ,  $\rho_M$  – питомий опір хромелю та міді відповідно;  $L_{X2}$ ,  $L_{M1}$ ,  $L_{M2}$  – довжина ділянки X2 хромелю та додаткових електродів M1 і M2 відповідно;  $S_{X2}$ ,  $S_{M1}$ ,  $S_{M2}$  – площа перерізу провідників ділянки X2 хромелю та додаткових електродів M1 і M2 відповідно.

Підставивши (5.3), (5.4) і (5.5) у (5.2), отримаємо

$$\delta^{ZAD} = \frac{(0,0098 + 0,014)}{0,16} \cdot 100\% \approx 15\% \quad . \quad (5.6)$$

Така похибка при дослідженнях цілком прийнятна. Із (5.2) ... (5.6)



видно, що чим довші додаткові електроди М1 і М2 та менший їх діаметр, тим більша методична похибка  $\delta^{ZAD}$ . Зменшення довжини ділянки Х2 (див. рис. 5.3) також веде до зростання методичної похибки  $\delta^{ZAD}$ .

Слід відзначити, що методична похибка вимірювання заданого значення похибки ТЕП при формуванні додатної похибки згідно із схемою рис. 5.6 не зростає, лише змінює полярність (при шунтуванні ділянки Х2, згідно із рис. 5.5, виміряні значення заданої похибки будуть нижчі за дійсні, а при пропусканні додаткового струму згідно із рис. 5.6 – вищі).

Заміна міді сріблом дає змогу використати такий ТЕП під час експериментальних досліджень при температурах до 900°C.

У даному параграфі описано модернізований стенд та розроблений ТЕП, значення похибки якого можна гнучко та просто задавати у процесі експериментальних досліджень. Таке обладнання практично вирішує проблему експериментального дослідження методів і пристроїв, що використовуються для корекції похибок ТП, зокрема, розроблених оперативних методів визначення похибки ТП і діагностування її електродів.

## **5.2 Експериментальні дослідження нейромережевого методу керування профілем температурного поля**

Однією з перших проблем, які виникають при реалізації розроблених оперативних методів визначення поточної похибки ТП та діагностування стану її електродів, є забезпечення достатньо точного та надійного встановлення заданого профілю температурного поля вздовж головної ТП у складі ТЕП з КПТП. У [271-275] та § 4.2 розроблено нейромережевий метод керування профілем температурного поля багатозонної печі. Як було показано у четвертому розділі, цей метод забезпечує швидке встановлення заданого профілю температурного поля. Крім того, метод не схильний до самозбудження – він реалізує розімкнуту структуру системи керування. Однак важливою задачею є експериментальне підтвердження основних властивостей

розробленого нейромережевого методу. Для цього слід спочатку розробити методику проведення експериментальних досліджень.

Метою експериментальних досліджень розробленого нейромережевого методу є збір даних про нестабільність профілю температурного поля за час, не менший за тривалість визначення похибки головної ТП, що входить у склад ТЕП з КПТП, а також про неоднорідність формованого профілю температурного поля вздовж електродів цієї головної ТП. Такі дані дадуть змогу оцінити якість розробленого нейромережевого методу керування профілем температурного поля, а також підтвердити коректність проведеної у § 2.3 оцінки похибки визначення похибки головної ТП, що входить у ТЕП з КПТП, на місці експлуатації.

Проведення експериментальних досліджень розробленого нейромережевого методу не вимагає використання взірцевих засобів – визначення нестабільності відноситься до відносних вимірювань, при проведенні яких можна виключити вплив систематичної похибки на результат дослідження. На результат вимірювання нестабільності впливають лише випадкові похибки та нестабільність вимірювальних засобів. Вплив цих похибок буде оцінено в кінці параграфу.

Для експериментальних досліджень розробленого нейромережевого методу виконуємо наступні операції:

1. встановлюємо у печі, яка імітуватиме об'єкт вимірювання температури, температуру на рівні 300 - 350°C, розміщуємо у цій печі багатозонну піч, у яку вставлено ТЕП, значення похибки якого можна задавати, розміщений у стандартному чохлі (фактично цей ТЕП разом з багатозонною піччю створює ТЕП з КПТП), прогріваємо їх дві години;
2. встановлюємо заданий профіль температурного поля багатозонної печі, який приблизно відповідає профілю ABCD (див. рис. 2.10), і прогріваємо дві години;
3. після прогріву вимірюємо (з врахуванням температури вільних кінців) термо-е.р.с. ТП, які визначають профіль температурного поля багатозонної

печі (суміщених з нагрівачами багатозонної печі). Виміряні термо-е.р.с. ТП запам'ятовуємо як  $E1_1^{Z1} \dots E1_k^{Zn}$ , де  $Z1 \dots Zn$  – номери зон нагріву багатозонної печі, а  $\overline{1, k}$  – послідовні номери вимірювань;

4. повторюємо вимірювання згідно із п. 3 що 10 хвилин на протязі двох годин.

Результати вимірювання запам'ятовуємо як  $E2_1^{Z1} \dots E12_k^{Zn}$ .

На цьому самі експериментальні дослідження закінчуються.

Опрацювання результатів експериментальних досліджень полягає у побудові графіків залежності зміни температури в кожній окремій зоні від часу та зміни температури окремих зон від часу. За цими графіками оцінюємо нестабільність температури в окремих зонах та нерівномірність температури вздовж багатозонної печі. Графік відхилення профілю температурного поля від заданого значення залежно від часу  $\tau$  окремо для кожної зони нагріву багатозонної печі подано на рис. 5.8. Як видно з рис. 5.8, різні зони ТЕП з КПТП ведуть себе по різному. У деяких зон нестабільність профілю температурного поля в часі за дві години не перевищує  $0,7^\circ\text{C}$ , у інших сягає  $2,5^\circ\text{C}$ . Однак навіть у випадку максимальної зміни, сама зміна проходить доволі плавно. За 10 хвилин максимальна зміна температури не перевищує  $0,8^\circ\text{C}$  (зафіксована лише в одному випадку). В основному зміни температури не перевищують  $0,5^\circ\text{C}$  за 10 хвилин.

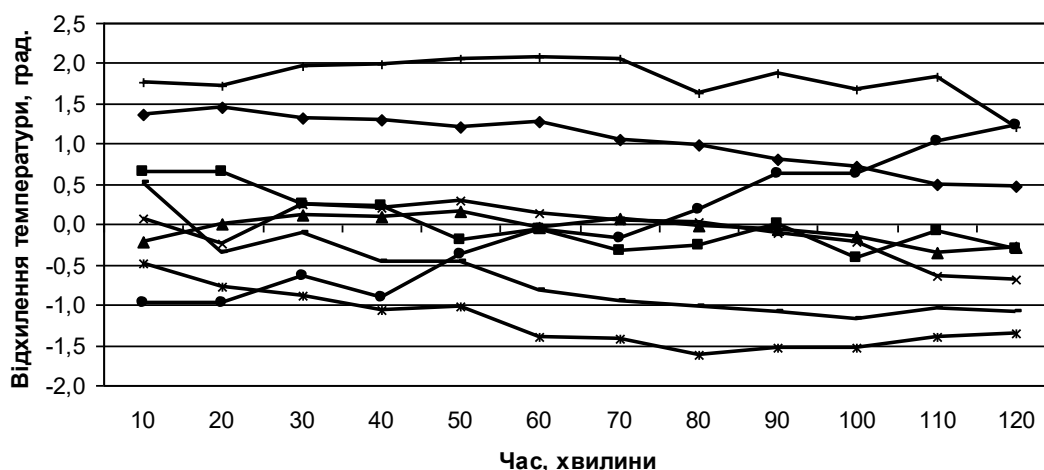


Рис. 5.8. Відхилення профілю температурного поля від заданого значення залежно від часу  $\tau$

На рис. 5.9 подано відхилення профілю температурного поля від заданого значення залежно від номеру зони  $n$ . Як видно з рис. 5.9, різниця

температур між зонами суттєво перевищує нестабільність температури для кожної зони. Різниця температур між зонами сягає  $3,5^{\circ}\text{C}$ , вона доволі стійка. Така різниця температур, як це було показано у [246], не викликає помітних похибок вимірювання температури. Викликана похибка буде в основному систематична, тобто її вплив на результат вимірювання температури буде відповідно зменшений при реалізації оперативних методів визначення похибки ТП і діагностування її електродів.

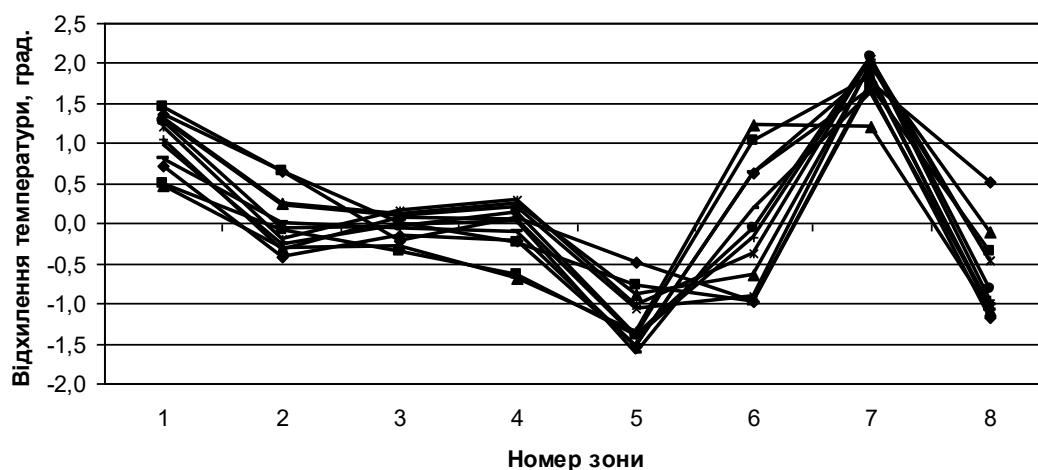


Рис. 5.9. Відхилення профілю температурного поля від заданого значення залежно від номеру зони  $n$

Отримані в результаті експериментальних досліджень результати вимірювань характеризуються похибками, які виникають через наявність випадкової похибки описаної у § 5.1 багатоканальної вимірювальної підсистеми. У цій підсистемі джерелами випадкової похибки є комутатор, АЦП та завади. Як було вказано у § 4.4, похибка комутатора на реле РГК15 з додатковими термовирівнювачами не перевищує  $0,5 \text{ мкВ}$  [52], вона носить саме випадковий характер. Випадкова похибка АЦП, що входить у ADUC834, на діапазоні перетворення  $80 \text{ мВ}$  не перевищує  $0,5 \text{ мкВ}$  [151]. Сумарна випадкова похибка, викликана завадами нормального та загального виду, згідно із проведеною у § 4.4 оцінкою, не перевищує  $1,5 \text{ мкВ}$ .

Сумарна випадкова похибка експериментальних досліджень не перевищує  $1,7 \text{ мкВ}$ , тобто приблизно  $0,04^{\circ}\text{C}$  для використаних ТП типу ХА. До похибки експериментальних досліджень слід віднести також дрейф ТП,

однак за час експерименту (чотири години) при температурі 300°C, ця складова настільки мала, що нею можна нехтувати.

У даному параграфі експериментально досліджено розроблений у § 4.2 та у [271-275] нейромережевий метод керування профілем температурного поля розробленої у § 4.1 та у [257 - 261] багатозонної печі, призначеної для керування профілем температурного поля вздовж стандартного ТЕП. Показано, що часова нестабільність профілю температур окремих зон і розподіл температури по зонах є прийнятними для оперативних методів визначення похибки ТП і діагностування її електродів.

### **5.3 Експериментальні дослідження впливу профілю температурного поля об'єкта на профіль температурного поля ТЕП з КПТП**

Наступним важливим критерієм якості багатозонної печі є вплив змін профілю температурного поля об'єкта на профіль температурного поля, який формує багатозонна піч. Для дослідженого у [133] ТЕП з КПТП неоптимальної конструкції було розроблено спеціальну методику дослідження цього впливу.

Вона полягала у:

1. вимірюванні температури всіх зон при максимальній потужності нагрівачів;
2. вимкненні нагріву однієї зони;
3. вимірюванні температури всіх зон при одній вимкненій зоні;
4. порівнянні (відніманні) результатів вимірювання, отриманих у пп. 1, 2;
5. визначенні відношення між шириною вимкненої зони та шириною основного шляху проникнення змін температури об'єкта (проміжні металеві шайби між нагрівачами);
6. діленні отриманої у п. 4 різниці на отримане у п. 5 значення відношення.

За результатами проведених експериментальних досліджень [133] отримано коефіцієнт впливу змін профілю температурного поля об'єкта на профіль температурного поля головної ТП, що входить у ТЕП з КПТП,

приблизно 25, тобто розроблена у [133] конструкція ТЕП з КПТП послаблює вплив змін профілю температурного поля об'єкта на профіль температурного поля головної ТП у 25 разів, що можна вважати прийнятним (приблизно у стільки ж разів зменшується вплив похибки від набутої термоелектричної неоднорідності на результат вимірювання температури).

Однак ця методика експериментальних досліджень для розробленої у § 4.1 і [257 - 261] багатозонної печі не підходить. У багатозонній печі не можна виділити основний шлях проникнення теплового потоку від оточуючого середовища до електродів стандартного ТЕП (еквівалента головної ТП). Виміряти температуру центра вимкненої зони теж не вдасться – датчики температури зон (злоти нагрівача з відводами) розміщені на краях зон. Крім того, у ТЕП з КПТП [134] ті ТП, що вимірюють температуру зон, розміщені у корпусі разом із головною ТП. А у розроблений у § 4.1 і [257 - 261] багатозонній печі між злотами створених як злоти нагрівача з відводами ТП та електродами стандартного ТЕП (див. рис. 4.1) додатково розміщені ізоляційний керамічний циліндр, корпус багатозонної печі та чохол стандартного ТЕП. Тому вважати, що виміряна датчиками багатозонної печі зміна температури відповідає зміні профілю температурного поля електродів стандартного ТЕП не має підстав.

Тому для розробленої у § 4.1 і [257 - 261] багатозонної печі розроблена нова методика експериментальних досліджень, що передбачає такі операції:

1. встановлюємо у печі, яка імітуватиме об'єкт вимірювання температури, температуру на рівні 300 - 350°C [215, 281, 328];
2. оснащуємо багатозонну піч, у яку вставлено стандартний ТЕП (що разом з багатозонною піччю створює ТЕП з КПТП), додатковою ТП (найкраще кабельною), розміщеною та закріпленою на поверхні багатозонної печі. Стандартний ТЕП розміщуємо у багатозонній печі так, щоби його злот знаходився приблизно навпроти злота додаткової ТП. Вільний вихід із багатозонної печі (куди раніше проходив чохол стандартного ТЕП) закриваємо заглушкою (для усунення паразитних конвекційних теплових

потоків);

3. розміщуємо у печі, яка імітуватиме об'єкт вимірювання температури, багатозонну піч з додатковою ТП, та прогріваємо їх дві години;
4. встановлюємо заданий профіль температурного поля багатозонної печі, що приблизно відповідає ABCD (див. рис. 2.9), і прогріваємо дві години;
5. після прогріву вимірюємо температури за допомогою додаткової ТП  $T1_{DTP}$ , стандартного ТЕП  $T1_{STP}$ , а також температури всіх зон  $T1_{1Z} \dots T1_{8Z}$ ;
6. змінюємо положення багатозонної печі злегка витягаючи її з печі, яка імітуватиме об'єкт вимірювання температури, та прогріваємо у новому положенні дві години;
7. після прогріву вимірюємо температури за допомогою додаткової ТП  $T2_{DTP}$ , стандартного ТЕП  $T2_{STP}$ , а також температури всіх зон  $T2_{1Z} \dots T2_{8Z}$ ;
8. обчислюємо коефіцієнт  $k_{VPL}$  впливу температури зовнішнього середовища на профіль температурного поля стандартного ТЕП за формулою

$$k_{VPL} = \frac{T1_{DTP} - T2_{DTP}}{T1_{TP} - T2_{STP}} . \quad (5.7)$$

На рис. 5.10 подано структурну схему, що пояснює методику експериментальних досліджень впливу профілю температурного поля об'єкта на профіль температурного поля багатозонної печі та стандартного ТЕП, що входить у склад ТЕП з КПТП.

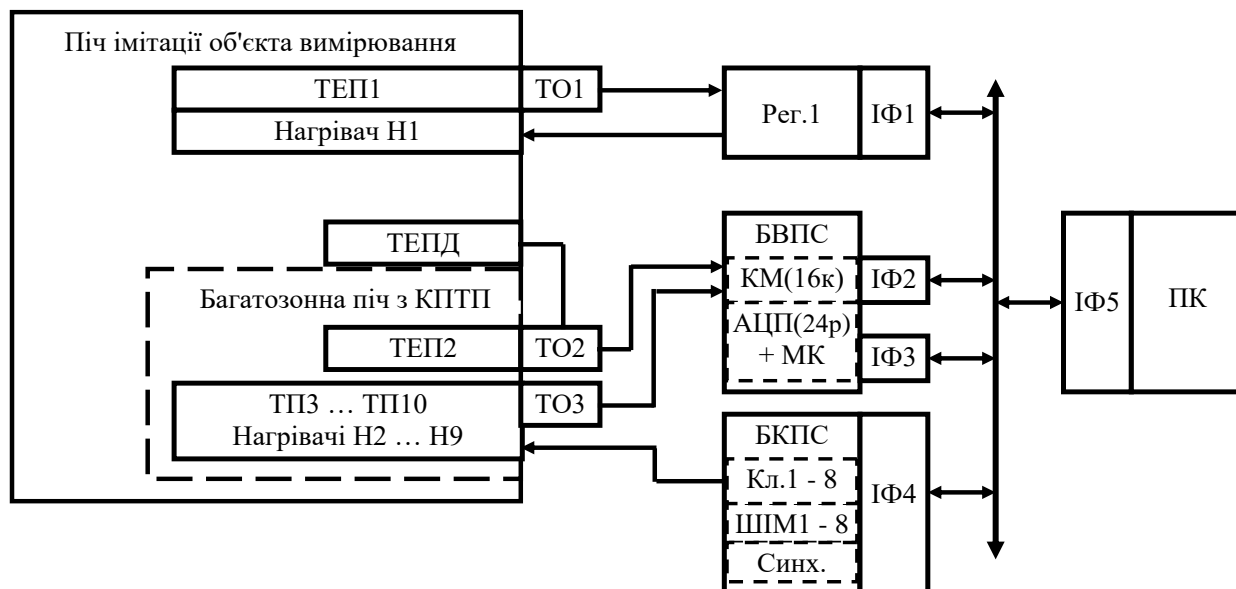


Рис. 5.10. Структурна схема експериментальних досліджень впливу профілю температурного поля об'єкта на профіль температурного поля ТЕП з КПТП

Ця структурна схема та позначення на ній повністю відповідають поданим на рис. 5.1 структурній схемі стенда для дослідження розроблених методів і засобів. Єдині відмінності полягають в тому, що на рис. 5.10 показані додатковий ТЕПД, закріплений на корпусі багатозонної печі, та зміщення стандартного ТЕП, що входить у ТЕП з КПТП. Додатковий ТЕПД, згідно із викладеною вище методикою, служить для вимірювання зміни температури оточуючого повітря при переміщенні багатозонної печі. Зміщений стандартний ТЕП дає змогу виміряти зміну температури всередині багатозонної печі, викликану її переміщенням. Вигляд багатозонної печі із закріпленим додатковим кабельним ТЕПД та зміщеним стандартним ТЕП показаний на рис. 5.11.





Рис. 5.11. Вигляд багатозонної печі із закріпленим додатковим ТЕПД та зміщеним стандартним ТЕП

На рис. 5.12 подано графіки відхилень розподілу температури по зонах багатозонної печі до і після імітації зміни профілю температурного поля об'єкта вимірювання температури. Заданий профіль температурного поля печі становив 300-300-300-250-150-50-25-20°C.

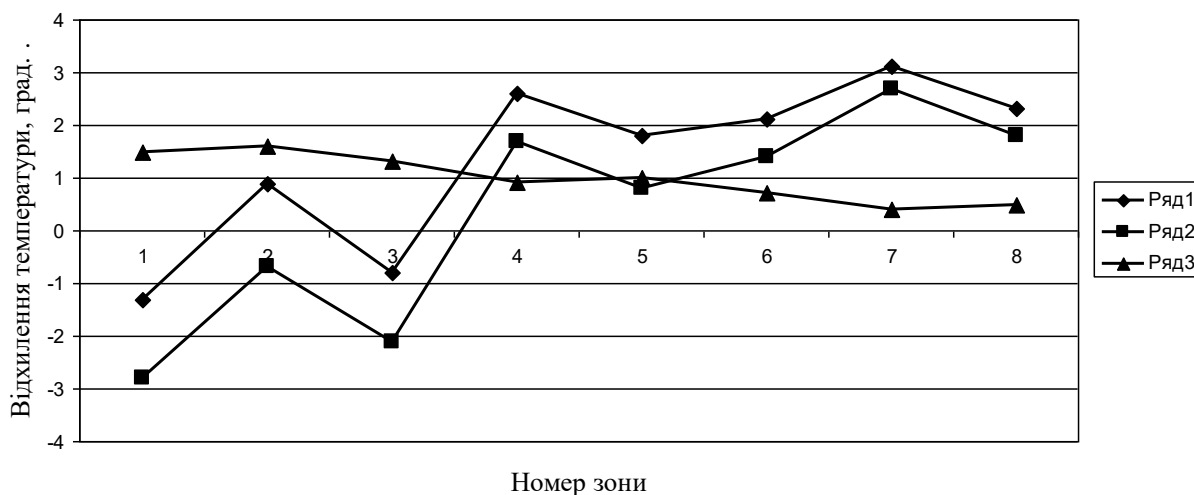


Рис. 5.12. Графіки відхилення розподілу температури по зонах багатозонної печі до і після імітації зміни профілю температурного поля об'єкта вимірювання температури.

Ряд 1 відповідає відхиленням температури зон багатозонної печі від заданого профілю до імітації зміни профілю температурного поля, а ряд 2 –

після. З рис. 5.12 видно, що зміна зовнішньої температури відносно слабо впливає на профіль температурного поля печі. Результати вимірювання температури додатковим ТЕПД складають  $293,6^{\circ}\text{C}$  до переміщення багатозонної печі та  $259,9^{\circ}\text{C}$  після переміщення печі. Таким чином, зміна температури, виміряної за допомогою додаткового ТЕПД на  $33,7^{\circ}\text{C}$ , викликала зміну формованого профілю температурного поля на  $1,6^{\circ}\text{C}$ . Результати вимірювання температури стандартним ТЕП складають  $300,6^{\circ}\text{C}$  до переміщення печі та  $299,7^{\circ}\text{C}$  після переміщення печі. Зміна температури, зафіксована стандартним ТЕП ще менша – не перевищує  $0,9^{\circ}\text{C}$ . Таким чином, коефіцієнт  $k_{VPL}$  впливу температури зовнішнього середовища на профіль температурного поля стандартного ТЕП, згідно із (5.7), становить

$$k_{VPL} = \frac{T1_{DTP} - T2_{DTP}}{T1_{STP} - T2_{STP}} = \frac{293,6^{\circ}\text{C} - 259,9^{\circ}\text{C}}{300,6^{\circ}\text{C} - 299,7^{\circ}\text{C}} \approx 37,4 . \quad (5.8)$$

Такий коефіцієнт впливу цілком прийнятний. Він означає, що зміна профілю температурного поля, викликана зміною температури оточуючого середовища від мінус  $20^{\circ}\text{C}$  до  $40^{\circ}\text{C}$  (близькі до максимальних сезонні зміни температури повітря) викличуть зміну профілю температурного поля на  $60^{\circ}\text{C}/37,4 \approx 1,6^{\circ}\text{C}$ . Така зміна профілю температурного поля викличе зміну термо-е.р.с. стандартного ТЕП, викликану похибкою від набутої термоелектричної неоднорідності, яка у перерахунку на результат вимірювання температури для ТП типу ХА не перевищує  $0,2^{\circ}\text{C}$  [244, 245].

У даному параграфі описано проведені експериментальні дослідження впливу профілю температурного поля об'єкта на профіль температурного поля ТЕП з КПТП (точніше – на профіль температурного поля всередині розробленої у § 4.1 спеціалізованої багатозонної печі). Показано, що цей вплив, при нормальній експлуатації ТЕП з КПТП не перевищує декількох градусів Цельсія, тобто є прийнятним з точки зору компенсації дії похибки від набутої термоелектричної неоднорідності електродів стандартного ТЕП, що входить у ТЕП з КПТП.

#### **5.4 Експериментальні дослідження оперативного методу визначення похибки термопар**

Одним з найважливіших у даній роботі є розроблений у другому розділі оперативний метод визначення поточної похибки головної ТП, що входить у склад ТЕП з КПТП (створеного трубчатою багатозонною піччю, розробленою у [257 - 261] та § 4.1, а також стандартним ТЕП, який розміщений у ній), у процесі експлуатації без використання на місці експлуатації еталонних засобів. Тому експериментальні дослідження цього методу є необхідними. Їх можна провести за допомогою розробленого у § 5.1 ТЕП, значення похибки якого можна практично довільно задавати під час експериментальних досліджень.

Основні труднощі при проведенні експериментальних досліджень виникають через те, що оперативний метод визначення поточної похибки ТЕП з КПТП (у вигляді розміщеного у розробленій у § 4.1 багатозонній печі стандартного ТЕП) на місці експлуатації, для забезпечення високої точності, вимагає перед експлуатацією визначення похибки з використанням робочого еталону – ТП або ТЕП (див. § 2.4). Цю проблему можна вирішити за рахунок використання методу відносних вимірювань. При цьому стандартний ТЕП, оснащений додатковими електродами для імітації його похибок за розробленим у § 5.1 і у [322-324] методом, на час проведення експериментальних досліджень будемо вважати робочим еталоном, ФП якого відповідає номінальній ФП ТП типу ХА. Тому всі вимірювання похибок, імітованих за допомогою розробленого у § 5.1 ТЕП, будемо проводити відносно ФП стандартного ТЕП без імітації похибки (контакти 3, 4 розробленого у § 5.1 ТЕП розімкнуті).

Додаткові труднощі створює те, що для проведення експериментальних досліджень була доступна лише відносно малопотужна та малоінерційна трубчата піч типу СУОЛ-0,15 [320] (максимальна потужність 2 кВт, споживана середня потужність при встановленій температурі 300°C приблизно 600 Вт). Значна зміна профілю температурного поля ТЕП з КПТП при

дослідженні розробленого у другому розділі методу визначення поточної похибки його головної ТП викликає зміну температури печі, якою не можна нехтувати під час визначення похибки ТЕП з КПТП на місці експлуатації. Тому пропонована методика повинна враховувати зміну температури зливу стандартного ТЕП за час проведення експериментальних досліджень.

Методика експериментального дослідження повинна в основному повторювати операції, описані у § 2.4. При цьому слід врахувати, що, при реалізації розробленого оперативного методу визначення поточної похибки головної ТП, що входить у ТЕП з КПТП, на місці експлуатації, профілі температурних полів печей, де проводиться початкове визначення похибки, а також об'єкта вимірювання, згідно з висновками, зробленими у §§ 2.2 і 2.3, практично не впливають на профіль температурного поля вздовж електродів ТЕП з КПТП, визначення похибки якого проводиться. Тому експериментальні дослідження можуть бути проведені в одній печі.

Всі перелічені вимоги виконано у наступній методиці проведення експериментальних досліджень розробленого у другому розділі оперативного методу визначення поточної похибки ТЕП з КПТП на місці експлуатації:

1. встановлюємо температуру печі, яка імітуватиме об'єкт вимірювання температури, на рівні 300 - 350°C, розміщуємо у цій печі ТЕП з КПТП, прогріваємо їх дві години;
2. встановлюємо заданий профіль температурного поля ТЕП з КПТП, який приблизно відповідає кривій ABCD (див. рис. 2.9), і прогріваємо дві години;
3. підключаємо до виводів 3, 4 стандартного ТЕП, значення похибки якого можна задавати, магазин опору R1 (див. рис. 5.5), який створює задану похибку цього ТЕП, і, вимірюючи термо-е.р.с., генеровану ділянкою X2 електрода ТЕП з КПТП (напругу між виводами 3 і 4), при допомозі магазину опору R1 встановлюємо задану (імітовану) похибку ТЕП з КПТП, яку запам'ятовуємо як  $\Delta_{TP}^{IM}$  ;
4. вимірюємо температуру печі, яка імітує об'єкт вимірювання

температури. При цьому виводи 3, 4 (див. рис. 5.3, 5.5) повинні бути розімкнені. Відносні вимірювання у даному випадку реалізуються за рахунок того, що вважаємо, що ФП ТП, яка вимірює температуру печі, відповідає номінальній (тобто її похибку вважаємо умовно рівною нулю). Виміряну термо-е.р.с. ТЕП з КПТП (з врахуванням температури вільних кінців) запам'ятовуємо як  $E^{OV1}$ . Повторюємо ці вимірювання 5 разів що 5 хвилин;

5. паралельно з виконанням п. 4 підключаємо до виводів 3 і 4 ТЕП з КПТП (див. рис. 5.5) магазин опору R1 (імітуємо наявність похибки ТЕП з КПТП), та вимірюємо термо-е.р.с. ТЕП з КПТП (з врахуванням температури вільних кінців), яку запам'ятовуємо як  $E_{TP}^{OV1}$ . Повторюємо ці вимірювання 5 разів що 5 хвилин (синхронно виконуємо пп. 4 і 5);
6. встановлюємо профіль температурного поля ТЕП з КПТП, який приблизно відповідає кривій АВ2С2D (див. рис. 2.10), і прогріваємо дві години;
7. вимірюємо термо-е.р.с. ТЕП з КПТП при підключеному магазині опору R1 (з врахуванням температури вільних кінців), яку запам'ятовуємо як  $E_{TP}^{OV2}$ . Повторюємо ці вимірювання 5 разів що 5 хвилин;
8. паралельно з виконанням п. 7 розмикаємо виводи 3 і 4 (див. рис. 5.3, 5.5), та вимірюємо термо-е.р.с. ТЕП з КПТП (з врахуванням температури вільних кінців), яку запам'ятовуємо як  $E^{OV2}$ . Повторюємо ці вимірювання 5 разів що 5 хвилин (синхронно виконуємо пп. 7 і 8).

На цьому самі експериментальні дослідження закінчуються.

Опрацювання результатів експериментальних досліджень полягає у визначенні зміни температури (точніше термо-е.р.с.) об'єкта вимірювання  $\Delta E^{OV}$  за час зміни профілю температурного поля (див. пп. 4 і 7 методики, поданої вище), а також виміряної за допомогою досліджуваного методу похибки ТП  $\Delta_{TP}^{VYM}$  та порівнянні її з імітованою похибкою  $\Delta_{TP}^{IM}$ . Остання операція дає змогу оцінити складову похибки вимірювання температури за

допомогою ТЕП з КПТП, пов'язану з недосконалістю його конструкції та реалізації досліджуваного методу.

Зміна температури об'єкта вимірювання визначається зміною термо-е.р.с.  $\Delta E^{OV}$ , яка, у свою чергу, визначається як різниця між середніми значеннями результатів вимірювання термо-е.р.с.  $E^{OV1}$  та  $E^{OV2}$ . Слід відзначити, що  $E^{OV1}$  та  $E^{OV2}$  вимірюються однією і тією ж ТП, що входить у склад ТЕП з КПТП (точніше, у стандартний ТЕП, що розміщений у багатозонній печі) на протязі приблизно чотирьох годин, а вимірювана температура (температура, при якій проводяться експериментальні дослідження), згідно із рекомендаціями [328], не повинна перевищувати  $350^{\circ}\text{C}$ . Тому змінами ФП ТП можна нехтувати.

Згідно із досліджуваним методом, похибку ТП  $\Delta_{TP}^{VYM}$  визначають як різницю між генерованими термо-е.р.с. у профілях температурного поля ABCD та AB2C2D (див. рис. 2.9), тобто як різницю середніх значень результатів вимірювання термо-е.р.с.  $E_{TP}^{OV1} - E_{TP}^{OV2}$ . Якщо би температура об'єкта вимірювання не мінялася (тобто  $\Delta E^{OV} \rightarrow 0$ ) та похибка вимірювань була би також нехтовно мала, то визначена похибка ТП  $\Delta_{TP}^{VYM}$  повинна була би бути рівна внесеній (імітованій) при підключенні до контактів 3 і 4 магазину опору R1 похибці  $\Delta_{TP}^{IM}$ . Однак у нашому випадку температура об'єкта вимірювання за час зміни профілю температурного поля (див. п. 6 методики) змінюється. Тому, для оцінки можливостей досліджуваного методу, слід врахувати зміну  $\Delta E^{OV}$ . Таким чином, похибку ТП  $\Delta_{TP}^{VYM}$  слід визначати за формулою

$$\Delta_{TP}^{VYM} = E_{TP}^{OV1} - E_{TP}^{OV2} - \Delta E^{OV} \quad . \quad (5.9)$$

Далі слід порівняти похибку ТП  $\Delta_{TP}^{VYM}$ , визначену експериментально, з внесеною (імітованою) при закороченні контактів 3 і 4 похибкою  $\Delta_{TP}^{IM}$ . Різниця між ними теоретично не повинна бути більшою за випадкову похибку

вимірювального каналу, яка, згідно із § 5.2, не перевищує  $1,8 \mu V$ .

З останнього зрозуміло, чому підсистема вимірювання температури об'єкта вимірювання за допомогою ТЕП з КПТП, похибка якого визначається, повинна мати високу стабільність, малий рівень шуму та високу завадостійкість. Якщо її поточна похибка буде сумірна зі значеннями  $\Delta_{TP}^{IM}$  та  $\Delta_{TP}^{VYM}$ , то похибки визначення  $\Delta_{TP}^{IM}$  та  $\Delta_{TP}^{VYM}$  будуть великими. У такому випадку інформативність результатів експериментальних досліджень буде низькою – за їх результатами не можна буде оцінити метрологічну надійність досліджуваного методу. Тому, крім високої точності підсистеми вимірювання температури, слід збільшувати значення  $\Delta_{TP}^{IM}$  та  $\Delta_{TP}^{VYM}$ . Для цього доцільно мідні відводи (див. рис. 5.3) робити саме від хромелю (генеровані хромелем термо-е.р.с. відносно міді майже втричі перевищують відповідні термо-е.р.с., генеровані алюмелем). Також слід робити достатньо великою довжину відрізка X2 та розміщати його повністю у зоні градієнту профілю температурного поля ABCD.

Для проведення експериментальних досліджень було виготовлено дослідний взірець ТЕП з КПТП на базі ТП типу ХА з діаметром термоелектродів 1,2 мм та довжиною 1,2 м, фотографія якого подана на рис. 5.4. При цьому довжина ділянок термоелектрода хромель становила (див. рис. 5.3)  $X1 = 65$  см,  $X2 = 30$  см,  $X3 = 25$  см. Зовнішній вигляд стенда (див. § 5.1) із розміщеною у ньому ТЕП з КПТП (у складі стандартного ТЕП, розміщеного у багатозонній печі, описаній у § 4.1) показано на рис. 5.13.

Отримані в результаті експериментальних досліджень за викладеною вище методикою значення термо-е.р.с. та відповідні похибки (у мкВ) подані у табл. 5.2. Як показали приведені у табл. 5.2 результати експериментальних досліджень методу визначення похибки ТЕП з КПТП, отримана похибка, за рахунок використання відносних вимірювань, виявилася доволі малою – не більше  $0,3^\circ C$ . Таким чином, метод можна вважати цілком придатним для практичного застосування.



Рис. 5.13. Зовнішній вигляд станда із розміщеною у ньому ТЕП з КПТТ під час дослідження бездемонтажного методу визначення похибки ТЕП у процесі експлуатації

Табл. 5.2. Виміряні значення термо-е.р.с. та отримані значення похибок, мкВ

$N$	$E^{OV1}$	$E^{OV2}$	$\Delta E^{OV}$	$E_{TP}^{OV1}$	$E_{TP}^{OV2}$	$\Delta_{TP}^{VYM}$	$\Delta_{TP}^{VYM} + \Delta E^{OV}$	$\Delta_{TP}^{IM}$	$\Delta_M$
1	13493	13253	240	10506	13226	2721	2961	2966	-5
2	13413	13169	244	10409	13139	2730	2974	2962	12
3	13520	13303	218	10517	13227	2751	2969	2971	-2
4	13650	13406	245	10649	13375	2725	2970	2960	10
5	13604	13381	223	10601	13351	2749	2972	2972	0

Слід відзначити, що використання відносних вимірювань, при яких досліджувана ТП одночасно служить робочим еталоном, значно спростило експериментальні дослідження. Але одночасно було скрито одне із важливих джерел похибки методу, якого не можна уникнути при реальному використанні. Похибка робочого еталону [231], який використовується при первинному калібруванні, повністю ввійде у похибку періодичного



визначення поточної похибки головної ТП згідно із досліджуваним методом, як це враховано у [220, 221] і § 2.4. А допустима похибка еталонних ТП [231] першого розряду сягає  $0,3^{\circ}\text{C}$  (другого розряду –  $0,6^{\circ}\text{C}$ ), чим не можна нехтувати. Теж було скрито похибку, що виникає при первинному калібруванні, яка, згідно із [220, 221], також суттєво впливає на похибку визначення похибки ТП, яка вимірює температуру об'єкта.

Також при проведенні експериментальних досліджень враховувалася зміна температури зльоту ТП за час зміни профілю температурного поля ТЕП з КППП, що складно реалізувати при реальному застосуванні методу. Але для експериментальних досліджень використана піч малої потужності, тому врахування зміни температури зльоту ТП при зміні профілю температурного поля ТЕП з КППП було обов'язковим.

Таким чином, отримане при теоретичному аналізі похибок, проведеному у § 2.4, значення похибки головної ТП значно вище за значення похибки, поданої у табл. 5.2. Саме воно є коректним для реальних умов застосування методу. А проведені експериментальні дослідження показують лише високі потенційні можливості методу, а не його реальну похибку.

Проведені у даному параграфі експериментальні дослідження оперативного методу визначення поточної похибки ТП, що входить у ТЕП з КППП, показали його ефективність та високі потенційні можливості.

## **5.5 Експериментальні дослідження спеціалізованого ТЕП з оперативним діагностуванням стану електродів**

У § 3.2 був розроблений оперативний метод детального діагностування стану електродів ТП під час експлуатації. Цей метод доволі складний у реалізації. Тому у § 3.6 була розроблена спрощена версія цього методу. Вона полягає у створенні вздовж електродів ТП однієї заданої зміни профілю температурного поля. При цьому не використовується розроблена у § 4.1 багатозонна піч, яка може поступово "посувати" профіль температурного поля вздовж електродів. У ТЕП із СД (див. § 3.6) вона замінена вбудованим у корпус

стандартного ТЕП одним нагрівачем і додатковою ТП, яка контролює отриману зміну температури. При цьому зміна профілю температурного поля суто локальна. Можна змінювати лише амплітуду зміни профілю температурного поля шляхом зміни потужності, поданої на нагрівач. Через фактично фіксований опір нагрівача (його зміною під дією зміни температури можна нехтувати) потужність змінюють шляхом зміни напруги на нагрівачі. При цьому немає необхідності у плавній зміні потужності, достатньо мати можливість подавати на нагрівач декілька фіксованих напруг.

Однак аналітично визначити зміну профілю температурного поля під дією нагрівача доволі складно. Необхідно врахувати дію поданої потужності на досить багато компонентів – електроди ТП, керамічні втулки (буси), чохол, а також втрати теплового потоку в оточуюче середовище. Тому доцільніше визначити параметри зміни профілю температурного поля експериментально, шляхом дослідження макетного взірця. При цьому необхідно дослідити також залежність форми профілю температурного поля від потужності нагрівача, що входить у ТЕП із СД.

Конструктивна схема макетного взірця для дослідження спеціалізованого ТЕП з оперативним діагностуванням стану електродів подана на рис. 5.14. В цей макет входять металевий чохол 1, у якому розміщено робочу ТП 2, що вимірює температуру об'єкта вимірювання, нагрівач 3, тепловий потік якого змінює профіль температурного поля, та ТП 4, яка контролює температуру в центрі нагрівача 3. Як 2 і 4 використано ТП типу ХА. Зовнішній вигляд вузла, що містить ТП1, ТП2 та нагрівач 3, показано на рис. 5.15, а фотографія макета ТЕП із СД – на рис. 5.16.

Для дослідження профілю температурного поля та його зміни під дією нагрівача 3 на поверхні чохла 1 закріплені термістори 5. Як видно з фотографії макетного взірця, поданої на рис. 5.16, термістори розміщені рівномірно по довжині чохла що 10 см та закріплені термоусадочною трубкою. У макетному взірці використано малогабаритні термістори у скляному корпусі типу СТ1-19.

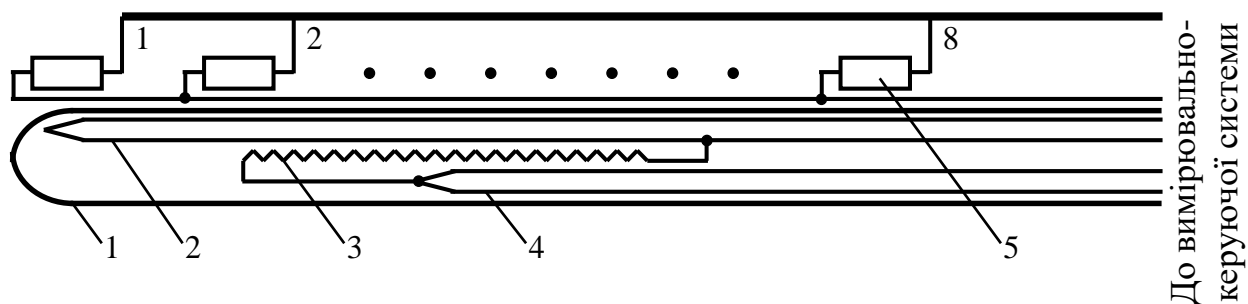


Рис. 5.14. Конструктивна схема макетного взірця для дослідження спеціалізованого ТЕП з оперативним діагностуванням стану електродів



Рис. 5.15. Зовнішній вигляд вузла, що містить ТП 2 і 4 та нагрівач 3



Рис. 5.16. Фото макетного взірця ТЕП із СД, на якому проведено експериментальні дослідження

Вплив великих відхилень ФП термісторів від номінальної зменшено за рахунок переходу до індивідуальної ФП кожного термістора зокрема. Для цього опір всіх термісторів був виміряний при температурах близько  $15^{\circ}\text{C}$  та близько  $60^{\circ}\text{C}$ . Температуру контролювали мідним термометром опору типу

100М. Для зменшення похибки від градієнту температури термістори, разом із термометром опору були поміщені у поліхлорвінілову трубку, яка, у свою чергу, була розміщена у воді з температурою визначення індивідуальної ФП. Вимірювання опору проводилися прецизійним мультиметром типу UT70D по три рази при кожній температурі з інтервалом 10 хвилин. Оцінка випадкового відхилення індивідуальної ФП від середньої показала, що воно не більше за  $0,07^{\circ}\text{C}$ . Систематична похибка індивідуальної ФП термісторів визначалася в основному похибками мультиметра UT70D – систематичною (не більше  $0,08^{\circ}\text{C}$ ) та дискретності (не більше  $0,0125^{\circ}\text{C}$ ), а також термометра опору (не більше  $0,25^{\circ}\text{C}$ ). Сумарна систематична похибка індивідуальної ФП термісторів не перевищувала  $0,27^{\circ}\text{C}$ . Однак її впливом на результат вимірювання змін профілю температурного поля можна практично нехтувати через те, що всі вимірювання проводилися одними і тими самими вимірювальними каналами, а вимірювалися лише зміни опору термісторів (тобто зміни профілю температурного поля).

Для експериментального дослідження макетного взірця його було розміщено у печі (рис. 5.17), що входить у склад стенда, розробленого у § 5.1. Температура у печі була встановлена близько  $150^{\circ}\text{C}$ .



Рис. 5.17. Фото вимірювального стенда під час експериментальних досліджень макетного взірця

Під час експериментального дослідження спочатку було визначено

профіль температурного поля вздовж чохла спеціалізованого ТЕП із СД без ввімкнення нагрівача 3. Результати вимірювання профілю температурного поля подано на рис. 5.18 (нижня крива). Далі була ввімкнена максимальна потужність нагрівача 3 (8 Вт) і теж був визначений профіль температурного поля вздовж чохла. Результати вимірювання також подано на рис. 5.18 (верхня крива). Як видно з рис. 5.18, зміна профілю температурного поля доволі суттєва – її амплітуда близька до  $60^{\circ}\text{C}$  (у зоні №3).

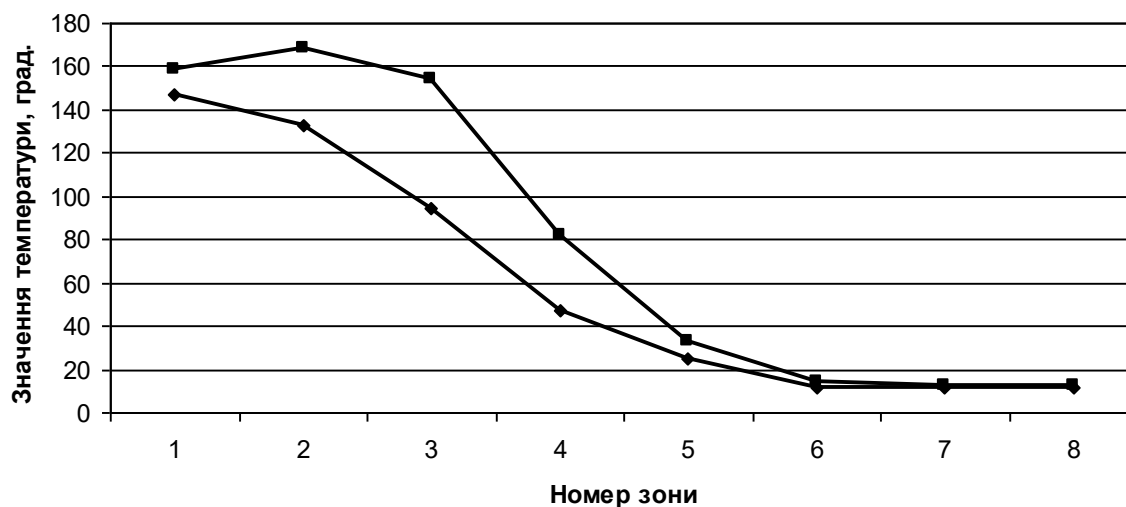


Рис. 5.18. Профілі температурного поля макетного взірця до і після ввімкнення нагріву 8 Вт

Результати дослідження залежності зміни профілю температурного поля макета від часу нагріву для потужності нагрівача 2 Вт, подані на рис. 5.19. Вимірювання розпочато через 20 хвилин після ввімкнення нагрівача. Інтервал між вимірюваннями прийнято 10 хвилин. Як видно з рис. 5.19, зміни профілю температурного поля доволі малі. Вони не перевищують  $2,2^{\circ}\text{C}$ , або 12% від максимального значення зміни профілю температурного поля. Це означає, що 30 хвилин було би цілком достатньо для практичного закінчення теплових перехідних процесів у досліджуваному макетному взірці.

Також було досліджено залежність зміни профілю температурного поля макету від часу нагріву для потужності нагрівача 8 Вт, яка подана на рис. 5.20. Вимірювання також розпочато через 20 хвилин після ввімкнення нагрівача, а

інтервал між вимірюваннями також прийнято 10 хвилин.

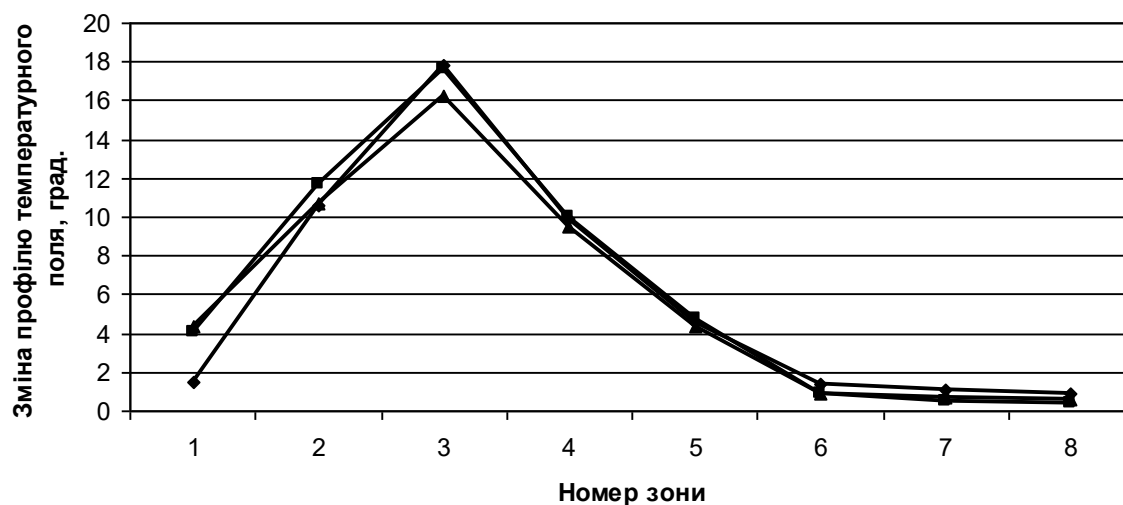


Рис. 5.19. Залежність зміни профілю температурного поля макетного взірця від часу нагріву для потужності нагрівача 2 Вт

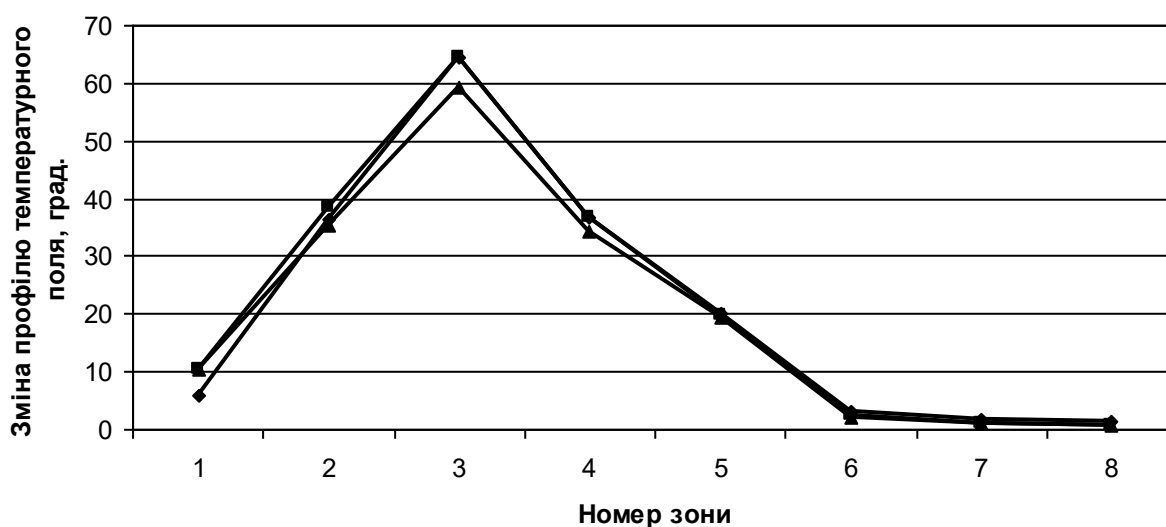


Рис. 5.20. Залежність зміни профілю температурного поля макетного взірця від часу нагріву для потужності нагрівача 8 Вт

Як видно з рис. 5.20, зміни профілю температурного поля також доволі малі. Вони не перевищують  $5,8^{\circ}\text{C}$ , або 9% від максимального значення зміни профілю температурного поля. Це означає, що і при вищій потужності нагрівача 30 хвилин було би цілком достатньо для практичного закінчення теплових перехідних процесів у досліджуваному макетному взірці.

Верхня крива на рис. 5.21 показує максимальні розбіжності профілю

температурного поля для температур у печі приблизно  $90^{\circ}\text{C}$ ,  $120^{\circ}\text{C}$ , і  $150^{\circ}\text{C}$  при потужності нагрівача 2 і 8 Вт. Як видно з рис. 5.21, зміни профілю температурного поля у цьому випадку більше залежать від вимірюваної температури. Але ці зміни не перевищують  $5,2^{\circ}\text{C}$ , або 9% від максимального значення зміни профілю температурного поля. При цьому слід відзначити, що додаткова ТП 4 дає змогу контролювати відхилення профілю температурного поля саме у третій зоні, де ці відхилення максимальні.

Для оцінки випадкової похибки, яка супроводжувала проведені експериментальні дослідження, на рис. 5.22 приведені відхилення вимірюваних температур від початкових профілів температурного поля при трьох вимірюваннях, які проводилися що 10 хвилин під час досліджень, результати яких приведені на рис. 5.19 ... 5.21.

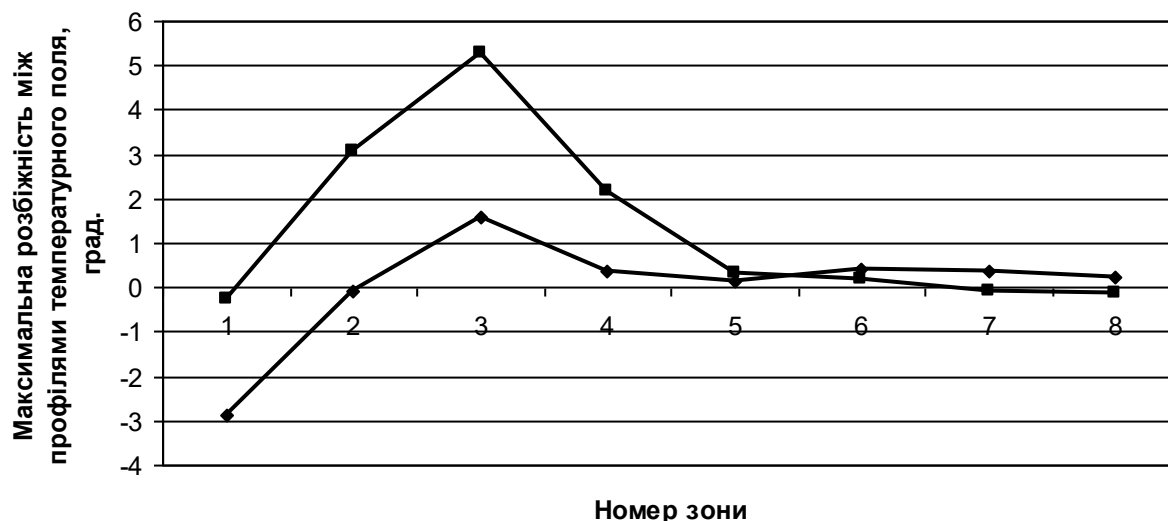


Рис. 5.21. Максимальна розбіжність між профілями температурного поля при різних вимірюваних температурах для потужності нагрівача 2 і 8 Вт

Як видно з рис. 5.22, максимальні випадкові відхилення залежать від номеру зони, тобто від її температури. Для низьких температур (зони 6 ... 8, що прилягають до вільних кінців ТЕП макетного взірця) нестабільність профілю температурного поля не перевищує  $1^{\circ}\text{C}$ , тобто менше 5% від максимальних змін профілю температурного поля. Для зон, наближених до злиуту, нестабільність профілю температурного поля значно вища.

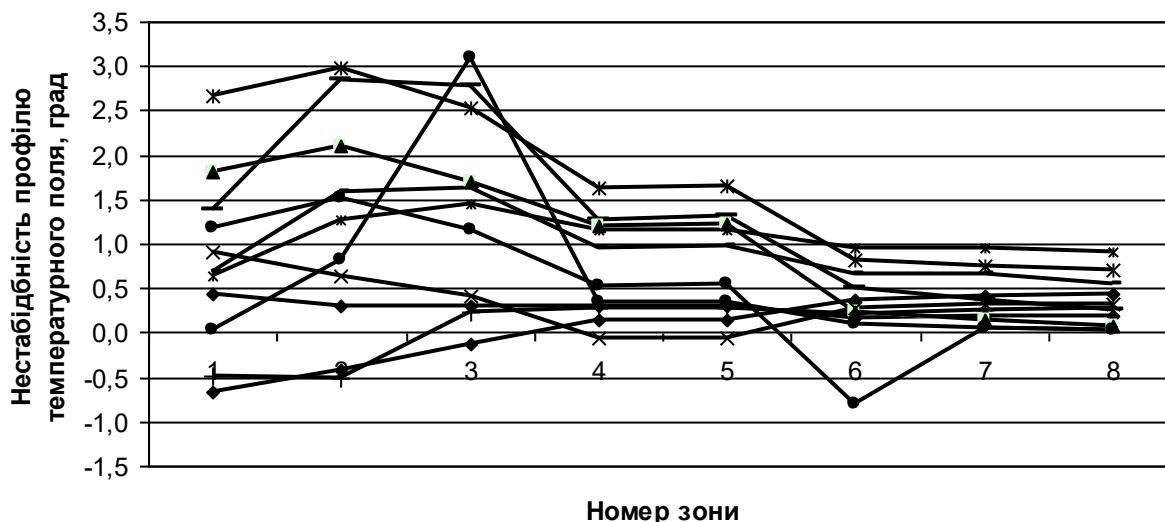


Рис. 5.22. Нестабільність профілю температурного поля макетного взірця у процесі зміни вимірюваної температури

Однак, при потужності нагрівача 2 Вт (максимальна зміна профілю температурного поля  $18^{\circ}\text{C}$ ), максимальна нестабільність результатів вимірювання не перевищує  $2^{\circ}\text{C}$ , тобто не більше 11% від самих змін профілю температурного поля. При потужності нагрівача 8 Вт (максимальна зміна профілю температурного поля перевищує  $60^{\circ}\text{C}$ ), максимальна нестабільність результатів вимірювання не перевищує  $3^{\circ}\text{C}$ , тобто не більше 5% від максимальних змін профілю температурного поля.

Таким чином, можна стверджувати, що:

1. результати вимірювання, отримані при експериментальних дослідженнях, мають прийнятну випадкову похибку;
2. зміни профілю температурного поля, викликані вмиканням нагрівача 3 для діагностування стану термоелектродів ТП, є доволі стійкі та відносно мало залежать від вимірюваної температури;
3. менші випадкові похибки та краща стабільність профілю температурного поля притаманна більшим потужностям нагріву, тобто більшим змінам профілю температурного поля.

Проведені у даному параграфі експериментальні дослідження спеціалізованого ТЕП із СД (з оперативним діагностуванням стану електродів



ТП) показали його ефективність та високі потенційні можливості.

## 5.6 Покращення стану метрологічного забезпечення температурних вимірювань

Як було показано у §1.3, стан метрологічного забезпечення вимірювання температури за допомогою ТП типу ХА в умовах теплової електростанції не можна вважати задовільним. Було відзначено, що деградація їх електродів різко збільшує похибку вимірювання температури. А відомі методи корекції похибок, викликаних такою деградацією (дрейф ФП ТП та зростання набутої термоелектричної неоднорідності), мають відносно низьку метрологічну надійність. Вони вимагають періодичного визначення дійсного поточного значення похибки ТП. Як показано у [124] визначення дійсного поточного значення похибки ТП у лабораторних умовах, через вплив похибки від набутої термоелектричної неоднорідності, не веде до підвищення точності вимірювання температури. Розроблений у [50, 116] метод визначення похибки ТП у процесі експлуатації вимагає, по-перше, використання робочих еталонів, а, по-друге, використання їх у промислових умовах (для чого вони не призначені). Тому ці методи, не зважаючи на доволі високу трудомісткість, мають відносно низьку метрологічну надійність.

Розроблені у другому та третьому розділах оперативні методи визначення поточної похибки ТП та діагностування стану її електродів у процесі експлуатації дають змогу суттєво підвищити точність і метрологічну надійність методів корекції похибки від деградації її електродів.

При використанні технічних рішень розроблених у четвертому розділі, похибка визначення похибки ТП у процесі експлуатації, згідно із § 2.4, не буде перевищувати  $1^{\circ}\text{C}$  при використанні для калібрування ТЕП з КПТП під час випуску з виробництва робочого еталону першого розряду та  $1,3^{\circ}\text{C}$  при використанні робочого еталону другого розряду.

На рис. 5.23 подано графік зміни допуску на технологічний параметр  $T$  при вказаних вище похибках вимірювання температури залежно від

коефіцієнта  $K$ , що вказує на ступінь важливості точності контролю технологічного параметра, та індексу достовірності контролю  $C_D$ , при умові  $\Delta_{DOP} = \sigma^{TP}$ . Як видно з рис. 5.23, допуск на технологічний параметр  $T$  значно зменшується при умові зростання коефіцієнта  $K$ . Тому можна суттєво підвищити температуру нагрівника зберігаючи (навіть підвищуючи) метрологічну надійність системи керування температурною печі.

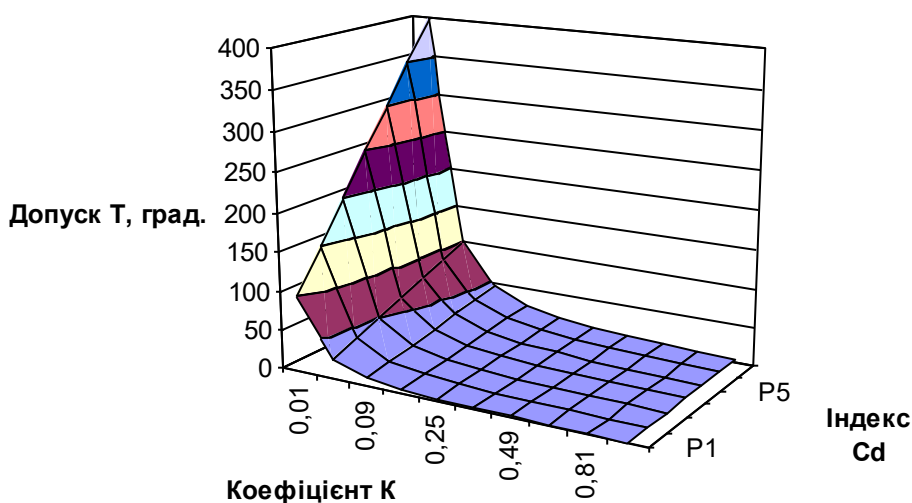


Рис. 5.23. Допуск на технологічний параметр  $T$  залежно від коефіцієнта  $K$  та індексу достовірності контролю  $C_D$  при умові  $\Delta_{DOP} = \sigma^{TP}$  та  $\sigma = 1^\circ\text{C}$

Однак рисунок 5.23 носить скоріше якісний характер. Більш конкретно залежності допуску на технологічний параметр  $T$  при вищевказаних похибках вимірювання температури, окремо від коефіцієнта  $K$  та індексу  $C_D$ , при заданих  $K$  та  $C_D$ , а також умові  $\Delta_{DOP} = \sigma^{TP}$ , подані на рис. 5.24 і 5.25. Як видно з рис. 5.24 і 5.25 допуск на технологічний параметр  $T$ , навіть якщо прийняти, що використовуються всі відомі раніше методи корекції похибок ТП (корекція початкового відхилення ФП ТП від номінальної [94], корекція дрейфу ФП ТП найбільш ефективним методом – шляхом його нейромережевого прогнозу згідно із [98, 100], а також практичне усунення впливу похибки від набутої термоелектричної неоднорідності електродів ТП за рахунок використання ТЕП з КПТП [125, 126]), тобто як було

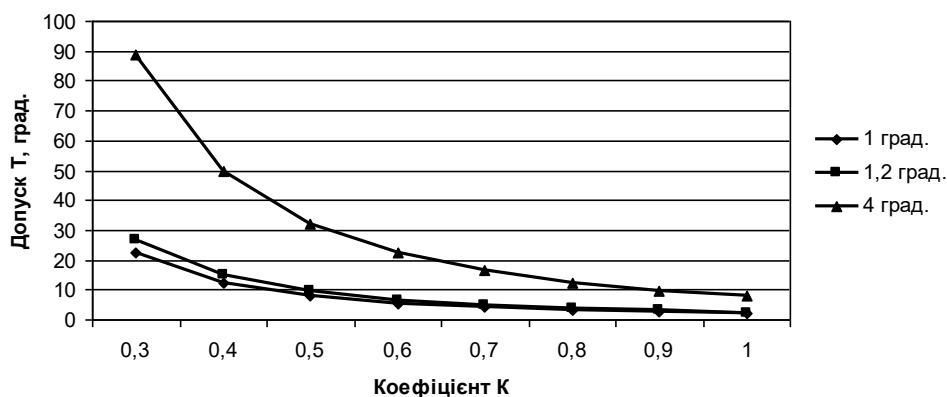


Рис. 5.24. Допуск на технологічний параметр  $T$  залежно від коефіцієнта  $K$  при умові  $C_D = 2$  та  $\Delta_{DOP} = \sigma^{TP}$

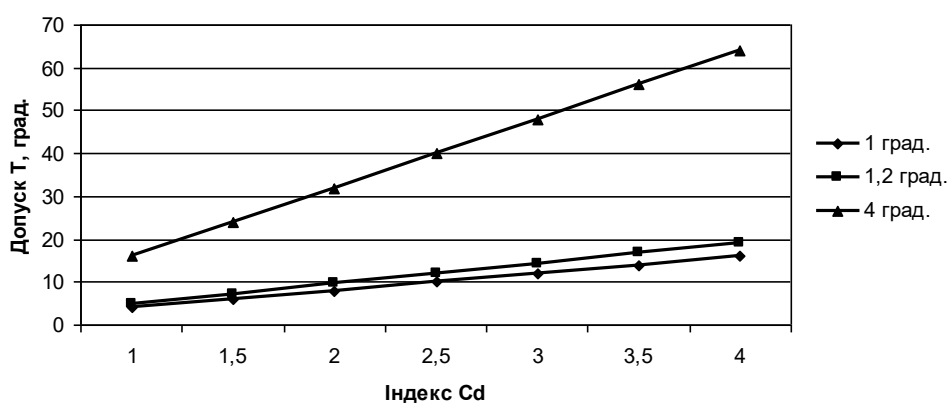


Рис. 5.25. Допуск на технологічний параметр  $T$  залежно від індексу достовірності контролю  $C_D$  при умові  $K = 0,5$  та  $\Delta_{DOP} = \sigma^{TP}$

прийнято у §1.4, залишилася лише похибка від дрейфу ФП ТП  $\Delta_{TP}^{DR} \approx 4^\circ\text{C}$ , запас на різницю температур між допустимою температурою водогрійних трубок та допустимою температурою пари у котлі (допуск на технологічний параметр  $T$ ) залишається доволі великим.

При використанні розроблених оперативних методів визначення похибки ТП та діагностування стану її електродів у процесі експлуатації оцінки похибки ТП, проведені у § 2.4, не перевищують  $1^\circ\text{C}$  або  $1,3^\circ\text{C}$ . Як видно з рисунків 5.24 і 5.25 допуск на технологічний параметр  $T$  може бути значно меншим навіть при більш жорстких умовах (менших значеннях коефіцієнта  $K$ , який характеризує ступінь важливості точності контролю

технологічного параметра  $T$ , та більших значеннях індексу достовірності контролю  $C_D$ ). Таким чином, незважаючи на менший допуск на технологічний параметр  $T$  можна підвищити метрологічну надійність системи керування температурою печі.

Відповідно до отриманих результатів оцінимо економічну ефективність розроблених методів, наприклад, для умов, розглянутих у § 1.4, тобто для  $K = 0,5$  та  $C_D = 2$ . Для таких значень  $K$  та  $C_D$ , а також для оціненої похибки ТП  $\Delta_{TP}^{DR} \approx 4^\circ\text{C}$  (тобто при умові корекції похибок початкового відхилення ФП ТП від номінальної, використанні ТЕП з КПТП для усунення впливу неоднорідності електродів ТП на результат вимірювання температури та використанні нейрмережевого прогнозу похибки дрейфу ФП ТП) у § 1.4 отримано  $T = 32^\circ\text{C}$ . Згідно із рис. 5.24 і 5.25 при використанні розроблених методів визначення поточної похибки ТП і діагностування стану її електродів, отримаємо  $T \approx 10^\circ\text{C}$ . Таким чином, підвищення температури нагрівника буде становити  $\Delta T \approx 32^\circ\text{C} - 10^\circ\text{C} = 22^\circ\text{C}$ . А ціна додаткової виробленої електроенергії  $\Delta C$ , згідно із (1.18), буде становити

$$\Delta C = \Delta C_6^{EL} \cdot \Delta T = 5202000 \cdot 22 \approx 114 \text{ млн.грн.} \quad (5.10)$$

Як видно з результатів оцінки приросту виробленої Бурштинською ДРЕС електроенергії, практично довірливі затрати на підвищення точності та метрологічної надійності вимірювання температури перегрітої пари є економічно виправданими.

На основі результатів проведених досліджень оцінимо досягнення мети даної дисертації. Першою вимогою було підвищення єдності вимірювань підвищених температур, яка, згідно із [205] характеризується прослідковуваністю та відтворюваністю. Розроблені оперативні методи визначення похибки ТП та діагностування стану її електродів забезпечують хорошу прослідковуваність передачі розміру одиниці Кельвіна від робочого еталону до "опорної ділянки" головної ТП, що входить у ТЕП з КПТП (при визначенні похибки головної ТП перед експлуатацією, див. § 2.4) та далі від

"опорної ділянки" до з'яуту головної ТП (точніше її ділянок, що генерують термо-е.р.с. у температурному полі експлуатації), у процесі експлуатації, під час періодичного визначення похибки ТП та діагностування стану її електродів. При цьому особливі умови експлуатації "опорної ділянки" головної ТП (в основному при температурі вільних кінців, "опорна ділянка" лише зрідка, на відносно малий час потрапляє у зону градієнту профілю температурного поля) визначають високу відтворюваність її ФП.

Наступною вимогою було підвищення точності вимірювання підвищених температур. Саме відносно часте метрологічне обслуговування ділянок, що генерують термо-е.р.с. у температурному полі експлуатації, шляхом періодичної передачі розміру Кельвіна за допомогою розробленого у другому розділі оперативного методу визначення похибки ТП, забезпечує високу точність вимірювання підвищених температур. При цьому висока стабільність профілю температурного поля вздовж електродів головної ТП дає змогу використати всі методи корекції похибки від дрейфу ФП ТП, узагальнені у [51] та розвинуті у [97, 100]. У свою чергу, застосування цих методів дає змогу майже на порядок збільшити період визначення поточної похибки ТП за допомогою розробленого оперативного методу, що відповідно значно покращує відтворюваність ФП "опорної ділянки", тобто додатково підвищити точність і метрологічну надійність вимірювання підвищених температур.

Третьою вимогою було підвищення метрологічної надійності результатів вимірювання підвищених температур. У даному випадку високу метрологічну надійність оперативного методу визначення похибки ТП визначають забезпечують часте метрологічне обслуговування ділянок ТП, що генерують термо-е.р.с. у температурному полі експлуатації, висока відтворюваність ФП "опорної ділянки" та чітка прослідковуваність передачі розміру Кельвіна від робочого еталону до "опорної ділянки". Крім того, розроблено оперативний метод діагностування стану електродів головної ТП, що входить у ТЕП з КПТП, який дає змогу оцінити вірогідність подальшої її

безаварійної роботи. Через корекцію похибки головної ТП строк її роботи з високою точністю видовжується, що веде до небезпеки катастрофічної функціональної відмови через руйнування електродів. Розроблений оперативний метод діагностування стану електродів головної ТП попереджує про можливість такої відмови.

Наступною вимогою була висока метрологічна автономність. Розроблені оперативні методи визначення похибки ТП та діагностування стану її електродів забезпечують високу метрологічну автономність через те, що їх реалізація не потребує використання при періодичному метрологічному обслуговуванні головної ТП еталонних засобів. Ці засоби потрібні лише при первинному калібруванні. Надалі їх роль виконує "опорна ділянка", яка безпосередньо входить у головну ТП. Таким чином метрологічна надійність та автономність забезпечуються на протязі всього життєвого циклі головної ТП. А розроблення каналів вимірювання термо-е.р.с. відповідно до вимог, поданих у § 4.4, забезпечує повну реалізацію розроблених у другому та третьому розділах оперативних методів підвищення точності взагалі без використання додаткового обладнання.

Перелічені переваги розроблених оперативних методів визначення похибки ТП та діагностування стану її електродів забезпечують їх високу ефективність. Основні затрати на їх впровадження визначаються необхідним спеціалізованим обладнанням (багатозонна трубчата піч) і модернізацією вимірювально-керуючих модулів. Розроблені багатозонні трубчаті печі мають доволі просту конструкцію та не вимагають дорогих матеріалів та складних технологічних процесів виготовлення. Тому затрати на їх виготовлення невеликі. За апаратними затратами модернізовані вимірювально-керуючі модулі сумірні з існуючими, їх більша складність визначається необхідною суттєво більшою кількістю ВК. Щодо їх програмного забезпечення, то необхідна повна його переробка, затрати на яку домінують серед інших затрат. Але слід відзначити, що це разові затрати, тому у перерахунку на один ВК вони значно менші. Модернізація програмного забезпечення верхнього

(системного) ієрархічного рівня згідно із структурою рис. 4.20 вимагає лише включення у його склад модуля навчання нейронних мереж.

Слід відзначити, що традиційно вимога підвищення точності будь яких вимірювань суперечить метрологічній надійності. У свою чергу висока метрологічна надійність суперечить метрологічній автономності. А всі ці вимоги суперечать умові мінімуму економічних затрат на метрологічне обслуговування (тобто його ефективності). Тому традиційно підвищення перелічених вимог супроводжувалося зростанням затрат на метрологічне обслуговування. Тому отримання економічної ефективності від вдосконалення метрологічного забезпечення традиційно спиралося на економічну ефективність інших технологічних параметрів – підвищення якості, економія сировини, зменшення затрат на теплоносії тощо. А розроблені оперативні методи визначення похибки ТП та діагностування стану її електродів забезпечують одночасно як підвищення єдності, точності, метрологічної надійності та автономності, так і зменшення затрат на саме метрологічне обслуговування (при умові забезпечення необхідної єдності, точності, метрологічної надійності та автономності). При цьому такий стан продовжується на протязі всього життєвого циклу головної ТП. Це вказує на високий науково-технічний рівень розроблених технічних рішень та їх повну відповідність дорожнім картам ЄВРАМЕТ [55, 56].

Слід також відзначити, що для традиційних засобів вимірювання фізичних величин характерне зростання похибки вимірювання у процесі експлуатації. Теоретичні основи вимірювальної техніки [169] пояснюють це явище постійним наростанням ентропії. Тільки цілеспрямована діяльність людини протистоїть наростанню ентропії. З точки зору вимірювальної техніки протистояння наростанню ентропії (тобто наростанню похибки засобів вимірювання) полягає у періодичному калібруванні засобів вимірювання (вимірювальних каналів). При цьому засобам вимірювання передається значення еталона даної фізичної величини, а одним з основних параметрів кожного еталона є часова стабільність. А розроблені оперативні методи

визначення похибки ТП та діагностування стану її електродів забезпечують значні можливості протистояння ентропії у засобах вимірювання підвищених температур без значних затрат, яких вимагали б конструктивно-технологічні методи протидії деградації їх стану.

У даному параграфі показано суттєве покращення стану метрологічного забезпечення температурних вимірювань, порівняно з проведеним у § 1.4 аналізом поточного стану, яке можна отримати за рахунок використання розроблених оперативних методів визначення поточної похибки ТП та діагностування стану її електродів.



## 5.7 Висновки до п'ятого розділу

1. Для експериментального дослідження похибок розроблених оперативних методів визначення поточної похибки ТП та діагностування стану її електродів модернізовано відповідний спеціалізований стенд і розроблено термоелектричний перетворювач з можливістю гнучкого задання його поточної похибки.
2. Експериментально досліджено розроблений нейромережевий метод керування профілем температурного поля розробленої багатозонної трубчатої печі та досліджено вплив профілю температурного поля об'єкта на профіль температурного поля головної ТП, що входить у ТЕП з КПТП, показано високу ефективність розробленої багатозонної трубчатої печі.
3. Експериментально досліджено оперативний метод визначення похибки головної ТП, що входить у ТЕП з КПТП, показано його високу ефективність та значні потенційні можливості.
4. Експериментально досліджено спеціалізований ТЕП з оперативним діагностуванням стану електродів, показано високу ефективність оперативного методу діагностування стану електродів ТП та значні потенційні можливості методу.
5. Показано можливість суттєвого покращення стану метрологічного забезпечення вимірювань підвищених температур, зокрема, їх єдності, точності, метрологічної надійності та автономності, а також ефективності (порівняно з результатами проведеного у першому розділі аналізу поточного стану), отримане за рахунок використання розроблених оперативних методів визначення поточної похибки ТП та діагностування стану її електродів.

## ВИСНОВКИ

1. Аналіз термоелектричних перетворювачів показав, що деградація під час експлуатації електродів їх чутливих елементів – термопар – веде до великих похибок від дрейфу їх функцій перетворення та від набутої термоелектричної неоднорідності. Показано, що для ефективної корекції цих похибок необхідно розробити бездемонтажний метод визначення поточної похибки термопар у процесі їх експлуатації. Показано, що визначення похибки за допомогою ефекту Пельтьє практично не придатне для створення такого методу. Аналіз метрологічного забезпечення вимірювання температури перегрітої пари на тепловій електростанції показав можливість значного економічного ефекту від підвищення точності вимірювання.
2. Розроблено концепцію забезпечення точності вимірювання температури термоелектричними перетворювачами при одночасному підвищенні суперечливих показників метрологічної надійності та автономності, а також ефективності при умові створення оперативного методу періодичного визначення поточної похибки термопар. Аналіз умов експлуатації термопар дає змогу виділити її ділянку, яка не деградує під час експлуатації, тобто є змога використати цю ділянку як опорну. Це дало змогу намітити шлях створення потрібного методу.
3. Дослідження поведінки неоднорідних термопар у різних профілях температурного поля показало, що властивості похибок від дрейфу їх функцій перетворення та від набутої термоелектричної неоднорідності дають змогу визначити поточну похибку термопар за рахунок цілеспрямованої зміни профілю температурного поля вздовж їх електродів, тобто створити оперативний метод визначення поточної похибки термопар, потреба у якому була раніше обґрунтована. Аналітичні дослідження методу показали, що він не має методичної похибки.
4. Показано, що створений оперативний метод визначення похибки головної

термопар, яка входить у термоелектричний перетворювач з керованим профілем температурного поля, проводиться на місці її експлуатації (без демонтажу) та у процесі її експлуатації та вимагає лише первинного калібрування цієї термопар за допомогою еталонного засобу, але при періодичному визначенні похибки на місці експлуатації розробленим методом еталонні засоби не потрібні. Оцінка похибки визначення поточного значення похибки головної термопар, при умові тимчасової зміни температури її робочого кінця не більше  $0,4^{\circ}\text{C}$ , показала, що метод забезпечує похибку вимірювання температури не більше  $1^{\circ}\text{C}$  або  $1,3^{\circ}\text{C}$  (залежно від того, чи при первинній метрологічній перевірці використано еталонну термопару першого чи другого розряду). Показано, що на похибку оперативного методу визначення поточної похибки термопар найбільше впливає випадкова похибка вимірювального каналу, а похибками від деградації електродів термопар та від керування профілем температурного поля можна нехтувати.

5. Обґрунтовано вибір індивідуального еквівалентного часу експлуатації як узагальненого критерію комплексної оцінки стану електродів термопар та всіх віртуальних ділянок, на які розбито її електроди. Розроблено теоретичні основи оперативного методу діагностування стану електродів термопар без використання робочого еталону шляхом визначення поточних значень похибок їх окремих ділянок при цілеспрямованій поступовій зміні профілю температурного поля вздовж її електродів. Метод дає змогу визначити місце даної термопар у загальній математичній моделі її похибок, побудованій на базі результатів експериментальних досліджень однотипних термопар у аналогічних умовах експлуатації. Еквівалентний час експлуатації дає змогу більш надійно оцінити похибки, що можуть виникнути у даних умовах при подальшій експлуатації термопар та забезпечити кращі умови обґрунтованого вирішення питання про доцільність або необхідність її заміни.
6. Дослідження впливу похибок від деградації електродів термопар,

керування профілем температурного поля та випадкової похибки вимірювального каналу показало, що на невиключену похибку визначення еквівалентного часу експлуатації ділянок термопар розробленим оперативним методом діагностування стану ділянок її електродів найбільше впливає похибка від керування профілем температурного поля, а це вимагає розроблення відповідного методу керування.

7. Розроблено конструктивну схему спеціалізованого термоелектричного перетворювача із самодіагностуванням, що використовує лише один нестандартний вузол, і структурну схему відповідної системи, які дають змогу реалізувати оперативний метод діагностування стану електродів його термопар без використання робочого еталону.
8. Розроблено спеціалізовану трубчасту багатозонну піч керування профілем температурного поля вздовж електродів стандартного термоелектричного перетворювача, яка дає змогу реалізувати розроблені оперативні методи визначення поточної похибки та діагностування стану електродів його термопар. Проведений розрахунок необхідної потужності нагрівачів зон цієї печі дає змогу оцінити її конструктивні параметри та тривалість реалізації запропонованих оперативних методів.
9. Для спеціалізованої трубчастої багатозонної печі (див. п. 8) розроблено не схильний до самозбудження нейромережвий метод цілеспрямованого керування профілем її температурного поля (див. вимогу п. 6), для реалізації розробленого методу діагностування стану електродів стандартного термоелектричного перетворювача (див. п. 5). Метод можна використати і для реалізації методу визначення поточної похибки стандартного термоелектричного перетворювача (див. п. 4).
10. Вдосконалено метод найменших квадратів, що може коректно описати залежність похибки термопар від часу та температури її експлуатації, який дав змогу, за рахунок інтерполяції та екстраполяції, збільшити обсяг значень похибок термопар типу хромель-алюмель та сформувати навчальну і тестову вибірки для нейромережової математичної моделі

похибки термопари через деградацію її електродів. Тестування моделі показало, що її похибка щодо результатів експериментальних досліджень не перевищує  $0,4^{\circ}\text{C}$ .

11. Розроблені структурні схеми двоконтурних систем вимірювання та керування температурою термоагрегатів дали змогу врахувати особливості реалізації розроблених оперативних методів корекції похибок термоелектричного перетворювача з неоднорідними термопарами при побудові систем вимірювання підвищених температур високої точності.
12. Модернізація відповідного спеціалізованого стенду і розроблення термоелектричного перетворювача з можливістю оперативного гнучкого задання його поточної похибки дала можливість експериментального дослідження похибок розроблених оперативних методів визначення поточної похибки термопари та діагностування стану її електродів.
13. Експериментально досліджено розроблений нейромережевий метод керування профілем температурного поля розробленої багатозонної трубчастої печі, оперативний метод визначення похибки термопари, а також спеціалізований термоелектричний перетворювач з оперативним діагностуванням стану електродів, показано високу ефективність запропонованих технічних рішень.
14. Аналіз показав можливість отримання суттєвого економічного ефекту за рахунок покращення стану метрологічного забезпечення вимірювань підвищеної температури перегрітої пари на тепловій електростанції (порівняно з результатами проведеного у першому розділі аналізу поточного стану), отримане за рахунок одночасного забезпечення високої точності, метрологічної надійності та автономності, а також ефективності розроблених оперативних методів визначення поточної похибки термопари та діагностування стану її електродів.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Луцик, Я. Т., Гук, О. П., Лах, О. І., & Стадник, Б. І. (2006). *Вимірювання температури: теорія та практика*. Львів: Бескид Біт.
2. Геращенко, А. О., Гордов, Н., Стадник, Б., Лах, В., Луцик, Я., Ярышев, Н., Еремина, А. Стадник, Б. (1989). *Температурные измерения. Справочник*. К.: Наукова думка.
3. Гук, О П, Стадник, Б І, Лах, О І, & Процев'ят, М М. (2006). Термоелектричні перетворювачі температури для енергонапружених об'єктів. *Технологические системы*, 1, 15-17.
4. Гук, О П, Михайлюк, О М, & Яцишин, С П. (2006). Особливості вимірювання температур термоелектричними перетворювачами в об'єктах атомної енергетики. *Пожезна безпека*, 8, 108-111.
5. Линевег, Ф. (1980). *Измерение температур в технике: Справочник*. Москва: Металлургия.
6. Webster, J. G. (1998). *The measurement, instrumentation and sensors handbook*. CRC press.
7. Анатычук, Л. И. (1979). *Термоэлементы и термоэлектрические устройства: Справочник*. К.: Наукова думка.
8. Гордов, А. Н. (1971). *Основы пирометрии*. М.: Металлургия.
9. Childs, P. R. N., Greenwood, J. R., & Long, C. A. (2000). Review of temperature measurement. *Review of scientific instruments*, 71(8), 2959.
10. Чугунный, Е Г, & Жуков, Л Ф. (1978). *Автоматический контроль температуры жидкого чугуна в литейном производстве*. Киев: Наукова Думка.
11. *Національний стандарт України. Пірометри. Загальні технічні вимоги: ДСТУ 3170-95* [Чинний від 1997-07.01.]. Держстандарт України, Київ.
12. Куинн, Т. (1985). *Температура*. Мир.
13. Сосновский, А. Г., & Столярова, Н. И. (1970). *Измерение температур*. Москва, Изд-во стандартов.

14. Степаняк, М В. (1997). *Кристаллооптичний термометр* (кандидатська дисертація, Державний ун-т «Львівська політехніка», 1997). Львів.
15. Пришивалко, А. П. (1963). *Отражение света от поглощающих сред*. Изд-во АН БССР.
16. Шифрин, К. С. (1951). *Рассеяние света в мутной среде*. Гостехиздат.
17. Fiberoptical temperature measurement. (n.d.). Retrieved from [http://www.thermo-electra.com/userfiles/thermo-electra.com/instruments/Optocon/Fiberoptic thermometer.jpg .pdf](http://www.thermo-electra.com/userfiles/thermo-electra.com/instruments/Optocon/Fiberoptic%20thermometer.jpg.pdf)
18. Dils, R. R. (1983). High-temperature optical fiber thermometer. *Journal of applied Physics*, 54(3), 1198-1201.
19. Гоц, Н. Е. (2007). Сравнительная характеристика методов пирометрии. *Приборы*, (7), 20-33.
20. Herve, P., Cedelle, J., & Negreanu, I. (2012). Infrared technique for simultaneous determination of temperature and emissivity. *Infrared Physics & Technology*, 55(1), 1-10.
21. Webb, C. (1997). Infrared: faster; smaller; cheaper. *Journal of automation, control and instrumentation technology*, 29(4), 44-5.
22. Назаренко, Л А. (1992). *Радіаційні методи і засоби високотемпературних вимірювань* (Докторська дисертація, Харківський НДІ метрології). Харків.
23. Nazarenko, L. A., Shevchenko, A. I., & Prokopyov, A. V. (2014). The Radiation Temperature Scale and the Determination of the Boltzmann Constant. *Measurement Techniques*, 57(7), 787-790.
24. Goloborod'ko, V. T., Gur'ev, N. V., Kashtan'er, V. L., Kupko, A. D., & Nazarenko, L. A. (1995). Radiometric method of constructing a thermodynamic temperature scale. *Measurement Techniques*, 38(6), 655-660.
25. Термоперетворювачі опору платинові. (n.d.). Retrieved from <http://www.thermo.lviv.ua/ukr/catalog/init.thermo.converter/platinum/>.
26. Термопреобразователи сопротивления – каталог. (n.d.). Retrieved from <http://www.etm.lutsk.ukrpack.net/>.
27. *Термопреобразователи сопротивления. Общие технические требования и*

- методы испытаний : ГОСТ 6651-94*[Міждержавний стандарт Чинний від 1999-01-01]. (1998). ИПК Издательство стандартов, Минск.
28. Поліщук, Є С (Ред.). (1978). *Електричні вимірювання електричних та неелектричних величин*. К.: Вища школа.
29. Бычковский, Р. В. (1978). *Контактные датчики температуры*. Металлургия.
30. 4-Channel RTD Input Data Acquisition Module with USB or Ethernet Interface. (n.d.). Retrieved from <http://www.omega.com/pptst/PT-104A.html>
31. What are RTD Sensors? (n.d.). Retrieved from [http://www.omega.com/toc\\_asp/frameset.html?book=Temperature&file=RTD\\_GEN\\_SPECS\\_REF](http://www.omega.com/toc_asp/frameset.html?book=Temperature&file=RTD_GEN_SPECS_REF)
32. НВО «Термоприлад». Retrieved from <http://thermo.lviv.ua/index.php/uk/produksiia?id=437.html>
33. Атаманчук, Б. М. (1997). *Перевірка статичної характеристики терморезистивних перетворювачів шляхом нагріву електричним струмом* (Кандидатська дисертація, Державний ун-т «Львівська політехніка»). Львів.
34. Самсонов, Г. В., Киц, А. И., & Кюздени, О. А. (1972). *Датчики для измерения температуры в промышленности*. Киев: Наукова думка.
35. Саватеев, А. В. (1987). *Шумовая термометрия*. Л.: Энергоатомиздат.
36. Яцишин, С П, Стадник, Б І, Колодій, З О. та інші (1992). Термочутливий елемент термошумового термометра. *Контрольно-вимірвальна техніка*, 49, 56-58.
37. Озгович, А І. (1999). *Покращення характеристик передачі термошумових сигналів в шумових термометрах*(Кандидатська дисертація, Національний університет «Львівська політехніка»). Львів.
38. Микитин, І, & Стадник, Б. (2008). Засоби та методика дослідження шумових сигналів. *Вимірвальна техніка та метрологія*, (68), 14-20.
39. Микитин, І, Стадник, Б, & Дорожовець, М. (2000). Математична модель шумового термометра на основі кореляційного



- підсилювача. *Вимірювальна техніка та метрологія*, 57, 63-66.
40. Яцишин, С, Микитин, І, Домінюк, Т, & Стадник, Б. (2006). Перехідні теплові процеси в чутливих елементах шумових термоперетворювачів у режимі реального часу. *Вимірювальна техніка та метрологія*, 66, 108-111.
  41. Микитин, І. (2009). *Вимірювання температури шумовими методами. Теорія і практика* (Докторська дисертація, Національний університет «Львівська політехніка»). Львів.
  42. Новицкий, П. В. (1968). *Основы информационной теории измерительных устройств*. Ленинград: Энергия.
  43. Луцик, Я., Буняк, Л., & Стадник, Б. (1998). *Застосування ультразвукових сенсорів*. Львів: СП «БаК».
  44. Луцик, Я Т, & Стадник, Б И. (1992). *Ультразвуковая термометрия*. Москва: Энергоатомиздат.
  45. Lynnworth, L. C. & Carnevale, E. H. Ultrasonic thermometry using pulse techniques. *У Temperature. Its Measurement and Control in Science and Industry* (Vol. 4, pp. 715–732), American Institute of Physics, New York, 1972.
  46. Луцик, Я Т. (1996). *Ультразвукова термометрія – концепція, синтез, реалізація* (Докторська дисертація, Державний ун-т «Львівська політехніка»). Львів.
  47. Ali, R. A., Garrett, S. L., Smith, J. A., & Kotter, D. K. (2013). Thermoacoustic thermometry for nuclear reactor monitoring. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 16(3), 18-25.
  48. *Перетворювачі термоелектричні. Номінальні статичні характеристики перетворення : ДСТУ 2837-94*[Чинний від 1986-04-01]. (1994). Київ.
  49. *International standard Thermocouples : IEC 584-2*. [International standard]. (1982). Geneva.
  50. Körtvélyessy, L. (1981). *Thermoelement-Praxis*. Vulkan-Verlag.

51. Саченко, А. А. (1988). *Разработка методов повышения точности и создание систем прецизионного измерения температуры для промышленных технологий* (Докторская диссертация). Ленинград.
52. Кочан, Р. В. (2005). *Вдосконалення компонентів прецизійних розподілених інформаційно-вимірвальних систем* (Кандидатська дисертація, ФМІ імені Карпенка). Львів.
53. Seebeck, T. J. (1826). Ueber die magnetische Polarisation der Metalle und Erze durch Temperaturdifferenz. *Annalen der Physik*, 82(3), 253-286.
54. Hunt, L. B. (1964). The early history of the thermocouple. *Platinum Metals Review*, 8(1), 23-28.
55. Bojkovski, J., Fischer, J., Machin, G., Pavese, F., Peruzzi, A., Renaot, E., & Tegeler, E. (2009). A roadmap for thermal metrology. *International Journal of Thermophysics*, 30(1), 1-8.
56. Machin, G., Bojkovski, J., del Campo, D., Dogan, et al. (2014). A European roadmap for thermometry. *International Journal of Thermophysics*, 35(3-4), 385-394.
57. Європейська асоціація національних метрологічних інститутів ЕВРАМЕТ. Retrieved from <https://www.euramet.org/>
58. Рогельберг, И. Л. (1983). *Сплавы для термонар*. Москва: Металлургия.
59. Рыбаков, И. Ф., & Шепелев, И. М. (1980). *Термоэлектродные провода и кабели*. Москва: Энергия.
60. Куритный, И. П., Бурханов, Г. С., & Стадник, Б. И. (1986). *Материалы высокотемпературной термометрии*. Москва: Металлургия.
61. Куритный, И. П., & Гомольская, Н. И. (1989). *Новые материалы в термометрии. ТС-6. Приборы, средства автоматизации и системы управления*. Москва: ЦНИИТЭИприборостроения.
62. Burley, N. (1978). *The Nicrosil versus nisil thermocouple*. Washington: U.S. Dept. of Commerce.
63. Стадник, Б. І., Луцик, Я. Т., Скоропад, П. І., & Яцишин, С. П. (2005). Фізико-хімічні основи термометричних матеріалів і статистично-

- термодинамічний алгоритм проектування термоперетворювачів засобів механотермометрії. *Вісник Черкаського державного університету*, 3, 249-250.
64. Яцишин, С. (2008). *Розвиток теоретичних основ та створення методів і алгоритмів мінімізації похибок термоперетворювачів на базі статистичної термодинаміки* (Докторська дисертація, Національний університет «Львівська політехніка»). Львів.
65. Яцишин, С., Стадник, Б., Курітник, І. та інші (1991). Залежність термометричних властивостей металічних аморфних сплавів від їх складу та технологічних факторів виробництва. *Вісник ЛПІ. Технічні засоби автоматизації вимірів та керування науковими дослідженнями*. 257, 88-92.
66. Скоропад, П., Яцишин, С., & Гамула, П. (2002). Термоструктурна стабільність термоелектродів з металевих аморфних сплавів. *Вимірювальна техніка і метрологія*, 59, 53-59.
67. Стадник, Б., Скоропад, П., & Яцишин, С. (2002). Критерії оцінки температурної стабільності термоелектродів з металевого шкла. *Термоелектрика*, 3, 77-81.
68. Яцишин, С., Скоропад, П., & Луцик, Я. (2006). Термоструктурна і часова стабільність термометричних параметрів металевих аморфних сплавів. *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Elektrotechnika.*, 29(233), 165-172.
69. Скоропад, П. (2006). *Термоперетворювачі з металевих шкел – концепція, нормалізація термоструктурних характеристик, реалізація* (Докторська дисертація, Національний університет «Львівська політехніка»). Львів.
70. Ромака, В. (2008). *Фізичні засади розроблення термоелектричних елементів на основі інтерметалічних напівпровідників* (Докторська дисертація). Національний університет «Львівська політехніка».
71. Romaka, V. V., Romaka, L., Horyn, A., Rogl, P., Stadnyk, Y., Melnychenko, N., ... & Kravovskyy, V. (2016). Peculiarities of thermoelectric half-Heusler

- phase formation in Gd-Ni-Sb and Lu-Ni-Sb ternary systems. *Journal of Solid State Chemistry*, 239, 145-152.
72. Romaka, V. A., Krayovsky, V. Y., Romaka, V. V., Romaka, L. P., Stadnyk, Y. V., & Horyn, A. M. (2016). Research on electrical conductivity mechanisms of thermoelectric material based on N-ZrNiSn doped with Ga. *Journal of Thermoelectricity*, 4, 44-58.
73. Romaka, V. A., Stadnyk, B. I., Romaka, V. V., Krayovsky, R. V., Kuzhel, B. S., & Horyn, A. M. (2009). Peculiarities of thermoelectric material n-zrnisn. i. prediction of thermoelectric characteristics on doping with rare-earth metals. *Journal of Thermoelectricity*, (3), 34-40.
74. . Анатычук, Л И, & Вихор, Л Н. (2012). Функционально-градиентные термоэлектрические материалы (Т. 4, Термоэлектричество). Черновцы.
75. Анатычук, Л И, Вихор, Л Н, & Черкез, Р Г. (2000). Оптимальное управление неоднородностью полупроводникового материала для термоэлементов, 3, 47-58.
76. Василенко, А, Макковеев, А, Гусев, С. і інші (1976). Технологические методы повышения качества термоэлектрических датчиков. *Приборы и системы управления*, 9, 47.
77. Стаднык Б.И., Яцышин С.П., Лах В.И. (1979). *Пути стабилизации эксплуатационных характеристик высокотемпературных термоэлектрических термометров*. Москва: ЦНИИТЭИприборостроения, 1979.
78. Стаднык, Б., Яцишин, С., Саноцкий Я. и др. *Способ стабилизации термо-ЭДС термопары*. А.с. СССР 1268969. G01K7/02.
79. Куритнык, И. (1987). *Научно-технические основы стабилизации термометрических свойств материалов и создание высокотемпературных термопреобразователей с повышенными метрологическими параметрами* (Докторська дисертація, ИПМ АН УССР, 1987). Киев.
80. Столярчук, П. (1990). *Развитие теории и методов улучшения*

метрологических характеристик измерительных термоэлектрических преобразователей (на примере применения их в объектах новой техники) (Докторська дисертація, ЛПИ, 1990). Львов.

81. Фрактовникова, А. (2000). О возможности повышения стабильности первичных преобразователей на основе термопарного кабеля. *Приборы*, 4, 22-24.
82. Гук, О. (2002). Захисні покриття термоелектродів як ефективний спосіб покращення характеристик термоелектричних перетворювачів. *Вимірювальна техніка та метрологія*, 61, 82-87.
83. Стадник, Б, & Яцишин, С. (2003). Статистично-деформаційна модель стабілізації метрологічних характеристик термоперетворювачів. *Вимірювальна техніка та метрологія*, 63, 99-105.
84. Гук, О. (2004). *Кабельні первинні перетворювачі з покращеними метрологічними і експлуатаційними характеристиками* (Кандидатська дисертація, Національний університет «Львівська політехніка»). Львів.
85. Guk, O. P., Stadnyk, V. I., & Yatsyshyn, S. P. (2004). Long life cable thermoelectric temperature converters. Reliability problems. *Journal of Thermoelectricity*, (2), 70-74.
86. Стадник, И, Луцык, Я, Яцишин, С, & Паракуда, В. (2005). Термодинамические аспекты нестабильности термометрических характеристик преобразователей температуры. *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Elektrotechnika*, 28(223), 177-180.
87. White, W. P. (1906). The constancy of thermoelements. *Physical Review (Series I)*, 23(6), 449.
88. Holmsten, M., Ivarsson, J., Falk, R., Lidbeck, M., & Josefson, L. E. (2008). Inhomogeneity measurements of long thermocouples using a short movable heating zone. *International Journal of Thermophysics*, 29(3), 915-925.
89. Ternan, J. G. (1984). Thermoelectric drift of thermocouples due to inhomogeneous changes in composition. *Journal of applied physics*, 55(1), 199-209.

90. Гришков, А. (1969). Влияние неоднородности термоэлектродов на показания термопар. In *Исследования сплавов для термопар* (pp. 107-115). Москва: Металлургия.
91. Pavlov, V. P., Lizhevskaya, L. I., & Sermyagina, L. P. (1985). A graphical method of calculating thermocouple errors due to electrode inhomogeneity. *Measurement Techniques*, 28(7), 646-648.
92. Тартаковский, Д. (1969). Расчет погрешности термопары от термоэлектрической неоднородности ее электродов. *Труды метролог. ин-тов СССР*, 105(165), 107-114.
93. Тювин, Ю., & Рогельберг, И. (1969). О влиянии градиента температуры на стабильность термоэлектродвижущей силы термопар хромель-алюмель. В *Исследование сплавов для термопар* (Вып. 29, Сборник трудов института Гипроцветметобработка, pp. 54-61). Москва: Металлургия.
94. Саченко, А. (1978). *Повышение точности измерения электрическими методами высоких температур в промышленных условиях* (Кандидатська дисертація). Львов.
95. Саченко, А. А., & Твердый, Е. Я. (1983). *Совершенствование методов измерения температуры*. Киев: Техника.
96. Brignell, J. E. (1987). Digital compensation of sensors. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 20(9), 1097.
97. Березький, О. (1996). *Системи вимірювання температури з елементами штучного інтелекту* (Кандидатська дисертація). Державний ун-т «Львівська політехніка».
98. Саченко, А., Кочан, В., Турченко, В., Головки, В., Савіцький, Ю. & Лаопулос, Т. *Спосіб формування навчальної вибірки прогнозуючої дрейф пристрою збору даних нейронної мережі*. Патент України 50830. G06F15/18.
99. Sachenko, A., Kochan, V., Kochan, R., Turchenko, V., Tsahouridis, K., & Laopoulos, T. (2001). Error compensation in an intelligent sensing instrumentation system. In *Instrumentation and Measurement Technology*

- Conference, 2001. IMTC 2001. Proceedings of the 18th IEEE* (Vol. 2, pp. 869-874). IEEE.
100. Турченко, В. (2001). *Нейромережеві методи і засоби підвищення ефективності дистрибутивних мереж збору та обробки сенсорних даних* (Кандидатська дисертація). Національний університет «Львівська політехніка». Львів.
  101. Sachenko, A., Kochan, V., & Turchenko, V. (2000). Sensor drift prediction using neural networks. In *Proceedings of the International Workshop on Virtual and Intelligent Measurement Systems. Annapolis, USA* (pp. 88-92).
  102. Коржавин, А., Коржавин, В., Богатов, В., & Белевцев А. *Устройство для измерения температуры в виде термоэлектрического преобразователя. Патент России 2299408. G01K 15/00.*
  103. Hundves, A., & Henz, G. B. *Self calibrating temperature sensing proube and proube-indicator combination-Unated State Patent 3.499. 340. 73-1. G01-15/00.*
  104. Мильченко, Ю. (1984). *Исследование методов и разработка средств поверки термоэлектрических преобразователей из неблагородных металлов* (Кандидатська дисертація). Москва.
  105. Саченко, А. А., Мильченко В.Ю., Кочан В.В. (1986). *Измерение температуры датчиками со встроенными калибраторами*. Москва: Энергоатомиздат.
  106. Кочан, В. (1989). *Электрические измерители температуры повышенной точности со встроенными калибраторами* (Кандидатська дисертація). Киев.
  107. Бернхард, Ф, Богун, Д, Августин, С, Маммен, Х, & Донин, А. (2003). *Применение самокалибрующихся термоэлементов с реперным материалом при температурах 500 – 650 С в парогенераторах. Вимірювальна техніка та метрологія, 63, 55-60.*
  108. Стадник, Б, Дорожовець, М, Бернгард, Ф, & Кулик, О. (2003). *Корекція похибки вимірювання температури із вбудованим реперним калібратором*

- і вторинним температурним сенсором. *Вимірювальна техніка та метрологія*, 63, 70-74.
109. Гук, О., Навоцька, Ю, Прохоренко, В, & Прохоренко, С. (2008). Самокалібрація кабельних термоперетворювачів з використанням евтектичного мікрорепера. *Вимірювальна техніка та метрологія*, 68, 162-165.
110. Wise, J. A., & Soulen Jr, R. J. (1986). *Thermometer calibration: a model for state calibration laboratories*. NASA STI/Recon Technical Report.
111. Мильченко, В., Саченко, А. & Кочан, В. *Способ поверки устройства калибровки термопреобразователей. А.с. СССР 1290101. G01K7/02*.
112. Sachenko, A., Kochan, V., & Turchenko, V. (2003). Instrumentation for gathering data [DAQ systems]. *IEEE instrumentation & measurement magazine*, 6(3), 34-40.
113. Брагин, Б., Рогельберг, И., & Покровская, Ю. (1969). О влиянии градиента температуры на стабильность термоэлектродвижущей силы термопар хромель-алюмель. В *Исследование сплавов для термопар* (Вып. 29, Сборник трудов института Гипроцветметобработка, pp. 72-92). Москва: Металлургия.
114. Левин, И., & Рогельберг, И. (1971). Термоэлектрическая неоднородность проволок и методы ее измерения. В *Исследование сплавов для термопар* (Вып. 32, Сборник трудов института Гипроцветметобработка, pp. 93-105). Москва: Металлургия.
115. Бейлин, В. (1976). Влияние термоэлектрической неоднородности на градуировочную характеристику термопар. В *Исследование сплавов для термопар* (Сборник трудов института Гипроцветметобработка, pp. 87-95). Москва: Металлургия.
116. Каржавин, В. (2010). *Влияние термоэлектрической неоднородности на точность измерения температуры термопарами* (Кандидатська дисертація). Обнинск.
117. Павлов, В. П. (1979). *Термоэлектрическая неоднородность электродов*



- термопар*. Москва: Изд-во стандартов.
118. Гришков, А., Сирота, А. (1979). О бесконтактных методах исследования термоэлектрических неоднородностей проволок. В *Исследование сплавов для термопар* (Сборник трудов института Гипроцветметобработка, pp. 92-107). Москва: Металлургия.
  119. Kholmyanskii, V. A., Tyuvin, Y. D., & Agushevich, A. Z. (1980). Thermoelectric uniformity of Chromel, Alumel, and Copel wires. *Measurement Techniques*, 23(11), 1033-1036.
  120. Бубела, Т. (2003). *Достандартизаційні дослідження методу контролю якості термоелектродного дроту*. (Кандидатська дисертація). Львів.
  121. Southworth, D. J. (1999). *Temperature calibration with isotech block baths*. *Handbook of Isothermal Corporation Limited*. Isotech.
  122. Васильків, Н. (2010). *Підвищення точності вимірювання температури термопарами в процесі експлуатації*. (Кандидатська дисертація). Львів.
  123. Sloneker, K. C. (2009). Thermocouple inhomogeneity. *Ceramic industry*, 159(4), 13-18.
  124. Киренков, И. (1976). Некоторые законы термоэлектрической неоднородности. В *Исследование в области температурных измерений: Сборник трудов* (сс. 11-15). Москва: ВНИИМ.
  125. NI-9214 Measurement System. Retrieved from <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/ru/nid/209889>
  126. Data Acquisition Units. Retrieved from <http://www.fluke-test.com.au/netdaq.htm>
  127. High accuracy tester-calibrator PJ 6301. Retrieved from <http://www.thermo-electra.com/userfiles/thermo-electra.com/instruments/aoip/pj6301gb.pdf>
  128. Brailov, É. S., Skripnik, Y. A., & Yurchik, G. V. (1986). Errors in temperature measurement with built-in thermoelectric thermometers. *Measurement Techniques*, 29(5), 403-405.
  129. Лозбін, В., Столярчук В. (2003). Перевірка термопар за допомогою ефекту Пельтье. *Вимірвальна техніка та метрологія*, 62, 48 -50.

130. Столярчук, В. (2012). Ідентифікація статичних та динамічних характеристик термоперетворювачів. (Кандидатська дисертація). Львів.
131. Васильків, Н., Кочан, О. & Кочан В. *Спосіб корекції похибки неоднорідності термопар. Патент України 92192. G01K7/02.*
132. Васильків, Н., Кочан, О. (2010). Дослідження впливу змін профілю температурного поля на похибку вимірювання температури неоднорідними термопарами. *Вісник Тернопільського державного технічного університету*, 15(2), 146-153.
133. Кочан, О. (2011). Термоелектричний перетворювач з керованим профілем температурного поля. (Кандидатська дисертація). Львів.
134. Кочан, О., & Кочан, Р. *Термоелектричний перетворювач. Пат. України 97464. G01K 15/00.*
135. Кочан О. (2008). Термоелектричний перетворювач з керованим профілем температурного поля. *Вісник Тернопільського Державного Технічного Університету*, 2, 102-108.
136. Кочан, О. (2008). Термоелектричний перетворювач з корекцією похибки неоднорідності. *Вимірювальна техніка та метрологія*, 68, 144-153.
137. Гордов, А. Н., Малков, Я. В., Эргардт, Н. Н., & Ярышев, Н. А. (1976). *Точность контактных методов измерения температуры*. Москва: Изд-во стандартов.
138. Кончаловский, В. Ю. (1985). *Цифровые измерительные устройства*. Москва: Энергоатомиздат.
139. Масляк, Б. (1994). Підвищення завадостійкості засобів вимірювання температури в промислових умовах. (Кандидатська дисертація). Київ.
140. Kochan, R. V., Berezky, O. M., Karachka, A. F., Maruschak, I., & Wojko, O. V. (2002). Development of the integrating analog-to-digital converter for distributive data acquisition systems with improved noise immunity. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 51(1), 96-101.
141. Рогельберг, И., Пигидина, Н., Покровская, Г. и др. (1969). Изменения

- термоэлектрической силы проволок из хромеля и алюмеля при нагреве на воздухе при 800°C продолжительностью до 10000 ч. В *Исследование сплавов для термопар* (Сборник трудов института Гипроцветметобработка, сс 33-41). Москва: Металлургия.
142. Рогельберг, И., Нужнов, А., Покровская, Г., и др. (1967). Стабильность термоэлектродвижущей силы термопар хромель-алюмель при нагреве на воздухе при температурах до 1200 С. В *Исследование сплавов для термопар*. (Сборник трудов института Гипроцветметобработка, сс 54-65). Москва: Металлургия.
143. Яцук, В. О., & Малачівський, П. С. (2008). *Методи підвищення точності вимірювань: підручник*. Львів: Бескид Біт.
144. Дорожовець, М, Стадник, Б, Мотало, В, Василюк, В, Ковальчик, А, & Борек, Р. (2005). Основы метрології. Підручник для студентів. Основы метрології і вимірювальна техніка (Том 1). Львів: НУ «Львівська політехніка».
145. Дорожовець, М, Стадник, Б, Мотало, В, Василюк, В, Ковальчик, А, & Борек, Р. (2005). Електричні вимірювання. Підручник для студентів. Основы метрології і вимірювальна техніка (Том 2). Львів: НУ «Львівська політехніка».
146. Analog Devices. Retrieved from <http://www.analog.com/en/index.html>
147. OP177. Retrieved from <http://www.analog.com/ru/products/amplifiers/operational-amplifiers/high-voltage-amplifiers-greaterthanequalto-12v/op177.html>
148. Zemel'man, M. A. (1964). Precision analog to digital converter with coarse components. *Measurement Techniques*, 7(9), 795-804.
149. Kester, W. A. (2005). *Data conversion handbook*. Newnes.
150. AD7714. Retrieved from <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD7714.pdf>
151. ADuC834: Details, datasheet, quote on part number. Retrieved from <http://www.chipdig.com/datasheets/parts/datasheet/041/ADUC834.php>

152. Саченко, А., Мильченко, В., Кочан, В., Чирка, М. & Бабий, С. *Способ определения дрейфа градуировочных характеристик термоэлектрических преобразователей. А.с. СССР 1364914. G01K 15/00.*
153. Чирка, М., Саченко, А., Кочан, В., Осинчук, В. & Якушенко Е. *Устройство градуировки термоэлектрических преобразователей. А.с. СССР 1213361. G01K 15/00.*
154. Эргардт, Н. (1957). Новый метод градуировки термопар. *Измерительная техника, № 6, 78.*
155. Ярышев, Н. (1959). Приближенная теория инерции технических термопар и термометров сопротивления. *Труды ЛИТМО, 37, 64-89.*
156. Кофман, Л., & Комаров, В. (1976). Автоматическая коррекция динамических характеристик термопреобразователей. *Метрология. 8, 25 – 31.*
157. Sachenko, A. A., Mil'chenko, V. Y., Kochan, V. V., Chirka, M. I., & Karachka, A. F. (1985). Experimental studies of the instability of the calibration characteristics of chromel-alumel thermoelectric calibration converters. *Measurement Techniques, 28(10), 854-857.*
158. Белоусов И. (1991). Повышение точности многоканальных измерительных устройств с термоэлектрическими преобразователями. (Кандидатська дисертація). Львов.
159. Карачка А. (1995). Автоматизовані засоби для прецизійних технічних вимірювань температури. (Кандидатська дисертація). Київ.
160. Павлов, Б. (1986). Компенсация влияния изменения температуры свободных концов термоэлектрических преобразователей. *Измерение, контроль, автоматизация, 1, 29 – 37.*
161. Грибок, Н., Зорий, В., Пуцило, В., & Яцук, В. (1988). Структурно-алгоритмическая коррекция погрешностей от влияния температуры свободных концов термоэлектрических термометров. *Контрольно-измерительная техника, 44, 70-74.*
162. Кочан, В., Карачка, А., Масляк, Б., Троценко, Ю. Чирка, М.

- Многоточечный цифровой термометр. А.с. СССР 1582029.*
163. Белоусов, И., Кочан, В., Саченко, А., Королев, Н., Куритный, И., Лешков, Я., Кобернюк, В. *Многоточечный цифровой термометр. А.с. СССР 1397743.*
164. Орнатский, П. (1986). *Автоматические измерения и приборы.* К.: Выща школа.
165. Швецкий, Б. И. (1991). *Электронные цифровые приборы.* Киев: Техніка.
166. Бычковский, Р. В. (1978). *Приборы для измерения температуры контактным способом.* Львов: Вища школа.
167. Бутковский, А. Г. (1975). *Методы управления системами с распределенными параметрами.* Москва: Наука.
168. Преображенский, В. П. (1978). *Теплотехнические измерения и приборы.* Москва: Энергия.
169. Орнатский, П. П. (1983). *Теоретические основы информационно-измерительной техники.* Киев: Выща школа.
170. Грибок Н. (1983). Алгоритмические методы повышения точности измерительных устройств с число-импульсным кодированием. (Кандидатська дисертація). Киев.
171. Грибок, Н., Зорий, В., Яцук В. и др. *Цифровой измеритель температуры. А.с. СССР 1120180. G01K7/02.*
172. Зорий, В. Устройство для измерения температуры. А.с. СССР 903714.
173. Яцук, В. (1987). Цифровые средства измерения информативных параметров электрических сигналов промышленных преобразователей температуры (Кандидатська дисертація). Ленинград.
174. Геращенко, О. А., Гордов, А. Н., Лах, В. И., Стадник, Б. И., & Ярышев, Н. А. (1984). *Температурные измерения: справочник.* Киев: Наукова думка.
175. Kochan, R., Sachenko, A., Daronte, P., Sobolev, V., & Kochan, V. (2002). Design of embedded metrology subsystem for intelligent sensing.

- In *Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2002. IMTC/2002. Proceedings of the 19th IEEE* (Vol. 2, pp. 1171-1176). IEEE.
176. Design of thermoelectric staged modules with segmented legs based on Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>-PbTe-TAGS / V. Ya. Mykhailovsky, L. M. Vykhov, M. V. Maksimuk, R. M. Mochernyuk // *Journal of thermoelectricity*. - 2015. - № 2. - С. 45-56.
177. Бойко О., Столярчук П., Яцук В., Матвійів В. Покращання метрологічних характеристик серійних переносних калібраторів опору, напруги, струму // *Вимірювальна техніка та метрологія*. – 2000. – № 56. – С. 78 – 81.
178. Кочан, Р. (2013). *Методи та засоби метрологічної самоперевірки прецизійних аналого-цифрових перетворювачів у процесі експлуатації*. (Докторська дисертація). Львів.
179. Тимчишин, В. (1999). *Підвищення ефективності проектування спеціалізованих комп'ютерних систем на базі типових мікропроцесорних платформ*. (Кандидатська дисертація). Львів.
180. Кочан, Р. В. (2012). *Прецизійні аналого-цифрові перетворювачі з бездемонтажною метрологічною самоперевіркою*. Львів: Видавництво Львівської політехніки.
181. Земельман, М. А. (1972). *Автоматическая коррекция погрешностей измерительных устройств*. Издательство Стандартов.
182. Яцук В.О. *Розвиток теорії та методів підвищення якості засобів вимірювальної техніки з використанням кодокерованих мір* // Автореф. дисерт. докт. техн. наук – Львів, 2004. – 38
183. Яцук В. Інформаційно-енергетичний підхід до оцінювання коефіцієнта якості засобів вимірювальної техніки. *Вимірювальна техніка та метрологія*. Випуск 68, 2008. с. 224-228.
184. Особливості побудови багатоканальних систем на основі багатоканальних вимірювальних перетворювачів. / Ковальчук М.І., Озгович А.І., Питель І.Д., Стадник Б.І. *Вимірювальна техніка та метрологія* № 59, — Львів, 2002.

185. Чирка, М. (1997). Підвищення точності вимірювання температури термоелектричними перетворювачами в нерівномірних теплових полях. (Кандидатська дисертація). Львів.
186. Чирка, М. І., Васильків, Н. М., & Кочан, Р. В. (1999). Метод підвищення точності прогнозування нестабільності характеристик перетворення термоелектричних перетворювачів. *Вісник ТАНГ. Економіко-математичне моделювання*, 6, 37-42.
187. Yang, Q., & Kochan, R. (2013). Investigation of Thermocouple's Drift Speed Influence on Error of their Heterogeneity Correction. *Sensors & Transducers*, 160(12), 514-520.
188. Кочан, О., Васильків, Н., Кочан, Р., & Яскілка, В. (2007). Оцінка максимальної похибки неоднорідних термопар. *Вісник Тернопільського державного технічного університету*, (1), 122-129.
189. Gridling, G., & Weiss, B. (2007). *Introduction to microcontrollers*. Vienna University of Technology.
190. Фрунзе, А. В. (2008). *Микроконтроллеры? Это же просто! Том 4*. Додэка-XXI.
191. NI PXI E4353. Retrieved from <http://www.ni.com/pdf/manuals/375508c.pdf>
192. NETDAQ 2640. Retrieved from [https://www.axitest.com/images/store/files/203321\\_FLUKENETDAQ2640A.pdf](https://www.axitest.com/images/store/files/203321_FLUKENETDAQ2640A.pdf)
193. NETDAQ 2645. Retrieved from <http://www.manualsdir.com/manuals/104116/fluke-netdaq-2645a-netdaq-2640a.html>
194. FLUKE 726. Retrieved from <https://www.instrumart.com/assets/Fluke-726-Multifunction-Calibrator-Manual.pdf>
195. FLUKE 1560. Retrieved from [https://www.instrumart.com/assets/1560\\_manual.pdf](https://www.instrumart.com/assets/1560_manual.pdf)

196. FLUKE 1586a. Retrieved from [http://www.globaltestsupply.com/pdfs/cache/www.globaltestsupply.com/fluke/1586a\\_1ds/datasheet/fluke\\_1586a\\_1ds\\_datasheet.pdf](http://www.globaltestsupply.com/pdfs/cache/www.globaltestsupply.com/fluke/1586a_1ds/datasheet/fluke_1586a_1ds_datasheet.pdf)
197. Микийчук М. (2012). Метрологічне забезпечення якості продукції на стадії виготовлення автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук. (Докторська дисертація). Львів.
198. Микийчук, М. (2009). Актуальні питання метрологічної надійності промислових ЗВТ. *Методи та прилади контролю якості. Науково-технічний журнал Івано-Франківського національного технічного університету нафти та газу*, 23, 126-129.
199. Микийчук, М. М., & Столярчук, П. Г. (2011). Підвищення метрологічної автономності локальних систем вимірювань. *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних сил*, 1, 222-228.
200. Микийчук, М., Столярчук, П. (2011). Підвищення метрологічної автономності промислових вимірювань. *Метрологія та прилади*, 3, 43-47.
201. Mykyuchuk, M., Kochan, R., Kochan, O., Jun, S., Stadnyk, B., & Stolyarchuk, P. (2016). Increasing metrological autonomy of in-plant measuring systems. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 10(32), 193-197.
202. Воловик, П. (2005). *Фізика для університетів*. Київ; Ірпінь: Перун.
203. Metrology for Improved Power Plant Efficiency. Retrieved from [https://www.euramet.org/research-innovation/search-research-projects/details/?eurametCtcp\\_project\\_show%5Bproject%5D=1097&eurametCtcp\\_project%5Bback%5D=466&cHash=f97645c877c27e9fd8d111ae4ee3421f](https://www.euramet.org/research-innovation/search-research-projects/details/?eurametCtcp_project_show%5Bproject%5D=1097&eurametCtcp_project%5Bback%5D=466&cHash=f97645c877c27e9fd8d111ae4ee3421f)
204. Бурштинська ДТЕК. Retrieved from [https://energo.dtek.com/business/generation/zapadenergo/taryfy\\_bt/](https://energo.dtek.com/business/generation/zapadenergo/taryfy_bt/)
205. Поліщук, Є. С. (2003). *Метрологія та вимірювальна техніка*. Львів: Бескід Біт.



206. Гоц, Н. Є. (2013). Розвиток методу передавання температурної шкали інфрачервоним термометрам випромінення. *Метрологія та прилади*, (1), 33.
207. Larsen, R. W. (2011). *LabVIEW for Engineers*. Pearson Higher Ed.
208. Kuts, Y. V., Shengur, S. V., & Shcherbak, L. N. (2011, August). Circular measurement data modeling and statistical processing in LabView. In 2011 MICROWAVES, RADAR AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM (pp. 317-320).
209. Guryev, M., Kupko, A., & Nazarenko, L. (2003, November). Double-diode configuration of self-calibrating photodiodes. In *Advanced Characterization Techniques for Optics, Semiconductors, and Nanotechnologies* (Vol. 5188, pp. 351-358). International Society for Optics and Photonics.
210. Кочан, О., Кочан, Р. & Кочан В. Пристрій для вимірювання температури в електropечax опору. Пат. України 104099. G01K7/01.
211. Кочан В., Яскілка, В. & Кочан, О. (2013). Подавлення завад загального виду у вимірювальних каналах. *Вісник Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя*, 2, 190–196.
212. Су Ц. & Кочан, О. (2014). Подавление помех общего вида в измерительных каналах. *Приборы и техника эксперимента*, 1, 87–90.
213. Jun, S., & Kochan, O. (2015). Common mode noise rejection in measuring channels. *Instruments and Experimental Techniques*, 58(1), 86-89.
214. Silberberg, M. (2007). *Principles of general chemistry*. McGraw-Hill.
215. Webster, E. S. (2014). Low-temperature drift in MIMS base-metal thermocouples. *International Journal of Thermophysics*, 35(3-4), 574-595.
216. Матвиив, В. (1984). Методы и средства повышения помехоустойчивости время-импульсного преобразования. (Кандидатська дисертація). Пенза.
217. Кочан О., Гусіна Є., Стадник А. & Рудник П. (2017). Розроблення теоретичних основ оцінки стану електродів термопар у процесі

- експлуатації. У Актуальні проблеми автоматики та приладобудування: матеріали міжнародної науково-технічної конференції (сс. 167-168.).
218. Кочан О. (2017). Теоретичні основи оцінки стану електродів термопар у процесі експлуатації. *Сенсорна електроніка і мікросистемні технології*, 14(3), 79-90.
219. Кочан, О. & Кочан, Р. *Спосіб корекції похибки головної термопару. Пат. Україна 102981. G01K7/02.*
220. Shu, C., & Kochan, O. (2013). Method of thermocouples self verification on operation place. *Sensors & Transducers*, 160(12), 55-61.
221. Кочан, О. (2014). Метод визначення похибки термоелектричних перетворювачів на місці експлуатації. *Вимірювальна техніка та метрологія*, 75, 32–39.
222. Кочан, О. (2016). Корекція похибок дрейфу та набутої неоднорідності у термоелектричному перетворювачі з керованим профілем температурного поля. *Вимірювальна техніка та метрологія*, 77, 99-108.
223. Кочан, О. *Спосіб самодіагностики термопар на місці експлуатації та пристрій для його реалізації. Пат. Україна 104952. G01K13/00.*
224. Кочан, О. (2013). Метод самодіагностики термоелектричних перетворювачів на місці їх експлуатації. В *Збірник праць Міжнародної науково-технічної конференції «Системи 2013. Термографія і термометрія, метрологічне забезпечення вимірювань та випробувань»* (сс. 199). Львів.
225. Кочан, О. (2015). Метод самодіагностики термоелектричних перетворювачів на місці їх експлуатації. В *Матеріали Першого наукового семінару: Кіберфізичні системи: досягнення та виклики.* (сс. 105–113). Львів.
226. Shu, C., Kochan, O., Kochan, V., & Vasylykiv, N. (2015). The method of self-testing of thermocouples in situ. In *Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS), 2015 IEEE 8th International Conference* (Vol. 2, pp. 773-778). IEEE.

227. Jun, S., Kochan, O., & Kochan, R. (2016). Thermocouples with built-in self-testing. *International Journal of Thermophysics*, 37(4), 37.
228. Кочан, О. В. (2014). Бездемонтажний метод тестування стану електродів термоелектричних перетворювачів. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, 4, 96-101.
229. Lienhard, J. H. (2013). *A heat transfer textbook*. Courier Corporation.
230. ГОСТ Р 8.611-2005 Государственная система обеспечения единства измерений. Преобразователи термоэлектрические платиnorodий-платиновые эталонные 1, 2 и 3-го разрядов. Методика поверки. Retrieved from [https://znaytovar.ru/gost/1/GOST\\_R\\_86112005.html](https://znaytovar.ru/gost/1/GOST_R_86112005.html)
231. ДСТУ 7231:2011 Метрологія. Перетворювачі та компаратори термоелектричні еталонні. Методика повірки. (2011). Київ: Держспоживстандарт України.
232. Недужий, И. & Алабовский, А. (1981). *Техническая термодинамика и теплопередача*. К.: Вища школа. Головное изд-во.
233. Кочан, Р., Кочан, О., Кочан, В. & Барило Г. *Комутатор сигналів низького рівня*. Пат. Україна 86967. 7Н01Н51/00.
234. Кочан, Р. & Кочан, В. *Комутатор сигналів низького рівня*. Пат. Україна 82313. 7Н01Н51/00.
235. Опрацювання результатів вимірювань [Текст] : [навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. базового напрямку 6.0913 «Метрологія та вимірювальна техніка»] / М. Дорожовець ; Нац. ун-т «Львів. політехніка». — Львів : Львівська політехніка, 2007. — 623 с. — Бібліогр.: с. 619-621. — ISBN 978-966-553-640-6.
236. Грубер, Й. (1996). *Эконометрия, том 1. Введение в эконометрию*. Киев: Астарта.
237. Robinson, S. (2004). *Simulation: the practice of model development and use*. Chichester: Wiley.
238. Кочан, О., Сапожник, Г., Паучок, В., & Майків, І. (2012). Удосконалення метрологічного програмного тесту вимірювального

- каналу температури. *Вісник Тернопільського національного технічного університету*, 68(№4), 175-185.
239. Jun, S., Kochan, O., & Levkiv, M. (2017). Metrological software test for studying the method of thermocouple error determination during operation. In *Measurement, 2017 11th International Conference* (pp. 171-174). IEEE.
240. Chen, J., Su, J., Kochan, O., & Levkiv, M. (2018). Metrological Software Test for Simulating the Method of Determining the Thermocouple Error in Situ During Operation. *Measurement Science Review*, 18(2), 52-58.
241. Кочан О., Гусіна Є., Стадник А. & Рудник П. Метрологічний програмний тест дослідження методу визначення похибки термоелектричних перетворювачів у процесі експлуатації. Актуальні проблеми автоматизації та приладобудування: матеріали міжнародної науково-технічної конференції (сс. 169-170.).
242. Кочан, О., Васильків, Н., Кочан, В., & Рощупкін, О. (2013). Дослідження невиключеної похибки неоднорідності термоелектричного перетворювача з керованим профілем температурного поля. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, 3, 26-32.
243. Кочан, О., Васильків, Н., Кочан, В. & Рощупкін, О. (2012). Дослідження невиключеної похибки неоднорідності термоелектричного перетворювача з керованим профілем температурного поля. У Збірнике праць Міжнародної науково-технічної конференції "Температура" (сс. 150-152). Львів.
244. Су, Ц., & Кочан, О. (2014). Механизм возникновения приобретенной термоэлектрической неоднородности термопар и его влияние на результат измерения температуры. *Измерительная техника*, (10), 38-41.
245. Jun, S., & Kochan, O. (2015). The mechanism of the occurrence of acquired thermoelectric inhomogeneity of thermocouples and its effect on the result of temperature measurement. *Measurement Techniques*, 57(10), 1160-1166.
246. Су, Ц., Кочан, О., Васильків, Н., & Кочан, Р. (2015). Метод корекції

- погрешности измерений температуры из-за приобретенной неоднородности электродов термопар. *Измерительная техника*, 8, 49-53.
247. Jun, S., Kochan, O. V., Vasylykiv, N. M., & Kochan, R. V. (2015). A method of correcting the error of temperature measurements due to acquired inhomogeneity of the electrodes of thermocouples. *Measurement techniques*, 58(8), 904-910.
248. Su, J., Kochan, O. & Kochan, R. (2015). Evaluation of error of method of thermocouple with controlled profile of temperature field. In: Proceedings of the 10th International Conference Measurement 2015 (pp. 301-304). Smolenice, Slovakia.
249. Su, J., Kochan, O., Wang, C. & Kochan, R. (2015). Theoretical and Experimental Research of Error of Method of Thermocouple with Controlled Profile of Temperature Field. *Measurement science review*, 15(6), 304-312. (Scopus, Web of Science).
250. Крижанівський, С. Є. (1938). *Диференціальні рівняння*. Харків: Державне науково-технічне видавництво України ім. Гонти.
251. Кухлинг, Х. (1982). *Справочник по физике*. Мир.
252. Кочан, О., Биковий, П., Чирка, М., Кочан, В. (2012). Дослідження впливу швидкості дрейфу термопар на похибку корекції їх неоднорідності. *Науковий вісник Чернівецького університету. Комп'ютерні системи та компоненти*, 3(1), 54-61.
253. Васильків, Н., Кочан, В., Кочан, О., Чирка, М. (2012). Дослідження впливу нерівномірності дрейфу термопар на похибку корекції їх неоднорідності. *Вісник Хмельницького національного університету*, 4, 142–149.
254. Jun, S., & Kochan, O. (2014). Investigations of thermocouple drift irregularity impact on error of their inhomogeneity correction. *Measurement Science Review*, 14(1), 29-34.

255. Jun, S., Kochan, O. V., & Jotsov, V. S. (2015). Methods of Reducing the Effect of the Acquired Thermoelectric Inhomogeneity of Thermocouples on Temperature Measurement Error. *Measurement Techniques*, 58(3), 327-331.
256. Су, Ц., Кочан, О., & Йоцов, В. (2015). Методи зниження впливу придбаної термоелектричної неоднородності термопар на погрешність вимірювання температури. *Измерительная техника*, 3, 52-55.
257. Кочан, О., Кочан, Р. & Кочан, В. *Піч з керуванням профілем температурного поля Пат. Україна 105700. G01K 7/02.*
258. Кочан, О. (2013). Піч з керуванням профілем температурного поля для компенсації похибки неоднорідності термопар. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, 27–32.
259. Chen, Z., Kochan, O., Jun, S., & Demkiv, T. (2013). Decreasing of Thermocouple Inhomogeneity Impact on Temperature Measurement Error. *Sensors & Transducers*, 160(12), 509-513.
260. Ma, N., Kochan, O., Su, J., Kochan, V. (2014). Decreasing of thermocouple inhomogeneity impact on temperature measurement error. In *Proceedings of the 13th IMEKO TC10 Workshop on Technical Diagnostics Advanced measurement tools in technical diagnostics for systems' reliability and safety* (pp. 105–110). Warsaw.
261. Jun, S., Kochan, O., Kochan, V., & Wang, C. (2016). Development and investigation of the method for compensating thermoelectric inhomogeneity error. *International Journal of Thermophysics*, 37(1), 10.
262. Omatu, S., Khalid, M. B., & Yusof, R. (1996). *Neuro-control and its applications*. Springer Science & Business Media.
263. Кочан, О. (2013). Оцінка максимальної потужності нагрівачів термоелектричних перетворювачів з керуванням профілем температурного поля. *Вимірювальна техніка та метрологія*, 74, 29-33.
264. Кочан, О. & Кочан, Р. (2008). Мікроконтролерний метод керування профілем температурного поля. *Вісник Національного університету "Львівська Політехніка". Комп'ютерні системи та мережі*, 630, 67-76.

265. Vasylykiv, N., Kochan, O., Kochan, R., & Chyrka, M. (2009, September). The control system of the profile of temperature field. In *Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications, 2009. IDAACS 2009. IEEE International Workshop on* (pp. 201-206). IEEE.
266. Кочан, О.В. (2013). Оцінка тривалості самоперевірки термоелектричного перетворювача з керованим профілем температурного поля. Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія приладобудування, 46, 70-80.
267. Derde, M. P., & Massart, D. L. (1986). Supervised pattern recognition: the ideal method?. *Analytica Chimica Acta, 191*, 1-16.
268. Taylor, C., Michie, D., & Spiegelhalter, D. (1994). *Machine Learning, Neural and Statistical Classifiers*. New York: Ellis Horwood.
269. Наконечний, М. (2013). Ідентифікація об'єктів керування та синтез контролерів з використанням штучних нейронних мереж. (Докторська дисертація). Львів.
270. Соболев, А. (2004). Повышение точности регулирования температурного поля путем совершенствования алгоритма управления многозонным термическим объектом: (Кандидатська дисертація). Рыбинск.
271. Кочан, О., Кочан, Р. & Кочан В. *Спосіб керування профілем температурного поля багатозонного об'єкта та пристрій для його реалізації. Пат. Україна 105541. G01K13/00.*
272. Kochan, O., Sapoznyuk, H., & Kochan, R. (2013). Temperature field control method based on neural network. In *Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS), 2013 IEEE 7th International Conference* (Vol. 1, pp. 21-24).
273. Мачужак, В., Кочан В., Кочан О. (2013). Метод керування профілем температурного поля. В *Збірник праць III Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів „Сучасні комп'ютерні інформаційні технології”* (сс. 103-104). Тернопіль.

274. Кочан, О. В. (2012). Нейромережевий метод керування для термоелектричного перетворювача з керованим профілем температурного поля. *Адаптивні системи автоматичного управління*, 2(21), 35-45.
275. Lei, M., Kochan, O., Kochan, R., Sapojnyk, H. (2014). Neural Network Method for Temperature Field Control. In *Proceedings of the International Conference TCSET'2014*, (pp. 232). Lviv-Slavske.
276. Kröse, B., Krose, B., van der Smagt, P., & Smagt, P. (1993). *An introduction to neural networks*. Amsterdam: University of Amsterdam.
277. Kim, Y. G., Song, C. H., Gam, K. S., & Yang, I. (2009). Change in inhomogeneity with temperature between 180° C and 950° C in base-metal thermocouples. *Measurement Science and Technology*, 20(7), 075102.
278. Chatterjee, S., & Hadi, A. S. (2015). *Regression analysis by example*. John Wiley & Sons.
279. Єрмоєнко, В. О., Алілуйко, А. М., Мартинюк, О. М., & Попіна, С. Ю. (2012). *Економетрія (Економетрика)*. Тернопіль: Підручники і посібники.
280. Кочан, О. (2013). Модель похибки термометричних перетворювачів на базі методу умовних найменших квадратів. В *Збірник праць Міжнародної науково-технічної конференції «Системи 2013. Термографія і термометрія, метрологічне забезпечення вимірювань та випробувань»* (сс. 149). Львів.
281. Yeromenko, V., & Kochan, O. (2013). The conditional least squares method for thermocouples error modeling. In *Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS), 2013 IEEE 7th International Conference* (Vol. 1, pp. 157-162).
282. Єрмоєнко, В. & Кочан О. (2013). Проблеми використання методу найменших квадратів при дослідженні дрейфу термопар. *Метрологія та прилади*, 2, 98–105.
283. Єременко В. С., Куц Ю. В., Мокійчук В. М., Самойліченко О. В. Статистичний аналіз даних вимірювань: навчальний посібник / МОН



- України, Національний авіаційний університет. – Київ: НАУ, 2015. – 321 с.
284. Єрмоєнко, В. О., & Кочан, О. В. (2013). Застосування регресійного аналізу для побудови моделі дрейфу функції перетворення термопар. *Математичне та комп'ютерне моделювання. Сер.: Технічні науки*, 8, 50-61.
285. Єрмоєнко, В., & Кочан, О. (2014). Метод умовних найменших квадратів дослідження поліноміальних регресійних моделей без вільного члена. *Вісник Тернопільського національного технічного університету*, 2, 244-259.
286. Єрмоєнко, В. & Кочан О. (2014). Дослідження класичних поліноміальних регресійних моделей без вільного члена. частина I. побудова емпірично ефективних оцінок параметрів регресійних моделей. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, 4, 13–23.
287. Kochan, O. (2015). The Study of Classical Polynomial Regression Models Without a Constant Term. Building Empirically Effective Estimates of the Parameters of Regression Models. *Sensors & Transducers*, 187(4), 82.
288. Кочан, О. В. (2013). Метод умовних найменших квадратів для побудови моделі похибки термопар. *Системи обробки інформації*, 6, 90-95.
289. Єрмоєнко, В., Кочан, О. (2013). Метод умовних найменших квадратів для побудови моделі похибки термопар. В *Збірник праць III Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів „Сучасні комп'ютерні інформаційні технології”* (сс. 29-30). Тернопіль.
290. Єрмоєнко, В.О. & Кочан, О.В. (2014). Побудова емпірично ефективних оцінок параметрів класичної поліноміальної регресії моделі без вільного члена. У: матеріали П'ятнадцятої міжнародної наукової конференції ім. акад. Михайла Кравчука. Т. 3. Теорія ймовірностей та математична статистика (сс. 57-58). Київ.

291. Єршоменко, В.О. & Кочан, О.В. (2014). Емпірично ефективні оцінки параметрів класичної поліноміальної регресійної моделі без вільного члена. У: Матеріали IV Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів Сучасні комп'ютерні інформаційні технології АСІТ'2014 (сс. 22-24). Тернопіль.
292. Єршоменко, В., Кочан, О. (2013). Побудова моделі дрейфу функції перетворення термопар за допомогою регресійного аналізу. В *Збірник праць III Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів „Сучасні комп'ютерні інформаційні технології”* (сс. 31-32). Тернопіль.
293. Єршоменко, В., Кочан, О. (2013). Метод умовних найменших квадратів для побудови моделі похибки термопар. В *Abstracts of conf. reports Dynamical system modeling and stability investigation: XVI International Conference: Modeling and Stability* (pp. 192). Kiev.
294. Antoniou A., Lu, W. (2007). *Practical optimization: algorithms and engineering applications*. Springer Verlag.
295. Jotsov, V., Kochan, O. & Su, J. (2018). Decreasing Influence of the Error Due to Acquired Inhomogeneity of Sensors by the Means of Artificial Intelligence. In: Sgurev V., Jotsov V., Kacprzyk J. (eds) *Practical Issues of Intelligent Innovations. Studies in Systems, Decision and Control*, (Vol. 140, pp. 89-130). Springer. (Scopus).
296. Кочан, О.В. & Микийчук, М.М. (2016). Застосування нейронних мереж для зменшення похибок вимірювання температури термоелектричними перетворювачами. У: Матеріали XVI міжнародної науково-технічної конференції «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах ВОТТП-2016» (сс. 16-18). Одеса (Затока).
297. Hu, Z., Su, J., Jotsov, V., Kochan, O., Mykyichuk, M., Kochan, R & Sasiuk, T. Data Science Applications to Improve Accuracy of Thermocouples. In: *Proceedings 2016 IEEE 8th International Conference on Intelligent Systems* (pp. 180-188). Sofia, Bulgaria.
298. Резистор C5-5 <https://eandc.ru/catalog/detail.php?ID=18270>

299. Термометр лабораторний ТЛ-18. Retrieved from <http://www.chem21.info/article/500134/>.
300. Су, Ц., Кочан, Р.В. & Кочан, О.В. (2014). Нелінійність аналого-цифрового перетворювача на базі сигма-дельта модулятора другого порядку. Технічна електродинаміка, 4, 99–101.
301. Кочан, Р., Кочан, О., Клим, Г. & Гоц, Н. (2014). Комбінований метод корекції нелінійності АЦП. Вісник Національного університету «Львівська політехніка» Автоматика, вимірювання та керування, 802, 50-54.
302. Hu, Z., Kochan, R., Kochan, O., Su, J. & Klym, H. (2015). Method of Integral Nonlinearity Testing and Correction of Multi-Range ADC by Direct Measurement of Output Voltages of Multi-Resistors Divider. АКТА ІМЕКО, 4(2), 80-84. (Scopus).
303. Sun, H., Kochan, R., Kochan, O. & Su, J. (2016). Integral nonlinearity of second-order single-bit sigma-delta modulator. Технічна електродинаміка, 6, 63-68. (Scopus).
304. Wang, J., Kochan, O., Przystupa, K., & Su, J. (2019). Information-measuring System to Study the Thermocouple with Controlled Temperature Field. Measurement Science Review, 19(4), 161-169.
305. Kochan, R., Kochan, O., Sapojnyk, G. & Chyrka, M. (2011). Investigation of Histogram Method Implementation for High Resolution ADC Testing. In: Proceedings of the International Conference IDAACS 2011 (pp. 43–49). Praha, Czech Republic. (Scopus).
306. Kochan, R., Kochan, O., Chyrka, M., Su, J. & Bykovyy, P. (2013). Approaches of Voltage Divider Development for Metrology Verification of ADC. In: Proceedings of the 2013 IEEE 7 International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems IDAACS'2013 (pp. 70-76). Berlin, Germany. (Scopus).

307. Chen, Z., Kochan, R., Kochan, O. & Yaremchuk, I. (2014). Investigation of Integral Nonlinearity of Third Order Sigma-Delta Modulator. In: Proceedings of the International Conference TCSET'2014 (pp. 129-130). Lviv-Slavske.
308. Lin, Q., Kochan, R., Kochan, O. & Klym, H. (2014). Approach of Testing Signals Generation for ADC Metrology Verification. In: Proceedings of the International Conference TCSET'2014, (pp. 247-248). Lviv-Slavske.
309. Кочан, Р.В., Кочан, О.В., Клим, Г.І. & Гоц, Н.Є. (2014). Нелінійність АЦП на базі сигма-дельта модулятора третього порядку. У: Збірнику матеріалів міжнародної наукової координаційної наради “Інформаційні проблеми комп’ютерних систем, юриспруденції, енергетики, економіки, моделювання та управління” ICSM-2014 (сс. 97-101). Тернопіль.
310. Су, Ц., Кочан, Р.В. & Кочан, О.В. (2014). Нелінійність аналого-цифрового перетворювача на базі сигма-дельта модулятора другого порядку. У: збірнику XIII Міжнародної науково-технічної конференції “Проблеми сучасної електротехніки–2014” (сс. 101). Київ.
311. Hu, Z., Kochan, R., Kochan, O., Su, J. & Klym, H. (2014). Method of Integral Nonlinearity Testing and Correction of Multi-Range ADC by Direct Measurement of Output Voltages of Multi-Resistors Divider. In: Proceedings of the 13th IMEKO TC10 Workshop on Technical Diagnostics Advanced measurement tools in technical diagnostics for systems' reliability and safety (pp. 76 80). Warsaw. (Scopus).
312. Hu, Z., Kochan, R., Kochan, O., Klym, H. & Su J. (2015). Integral nonlinearity correction of multi-range adc by iterative applying of multi-resistors divider. In: Proceedings of the 10th International Conference Measurement 2015 (pp. 29-32). Smolenice, Slovakia.
313. Li, J., Kochan, R., Kochan, O. & Klym, H. (2015). Integral Nonlinearity Correction of ADC Using Multi-Resistors Voltage Divider. In: Proceedings of the 2015 IEEE 8 International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems IDAACS'2015 (pp. 767 772). Warsaw, Poland. (Scopus, Web of Science).

314. Kochan, R, Ganczarczyk, T., Kochan, O. & Klym, H. (2016). Integral Nonlinearity of Third Order Single Bit Sigma-Delta Modulator. In: Proceedings of 16th International Conference on Control, Automation and Systems ICCAS 2016 (pp. 1591 – 1593). Gyeongju, South Korea. (Scopus).
315. High Precision Reference. Retrieved from <http://www.analog.com/en/other-products/militaryaerospace/ad780/products/product.html>
316. Подільник гібридно-плівковий НР-22 - Теория строительства. Книги и журналы. Retrieved from <http://www.elnova.ru/elnova-book/stroj-el347/113/>
317. Кочан, О. & Кочан, Р. Система вимірювання та регулювання температури. Пат. України 115927.
318. Kochan, O., Su, J., Kochan, R. (2017). Designing an accurate system for temperature measurements. In *Book of abstracts of the International conference Energy, Environment and Material systems (EEMS)* (pp. 103-104). Polanica Zdroj.
319. Kochan, O., Su, J., & Kochan, R. (2017). Designing an accurate system for temperature measurements. In *E3S Web of Conferences*, 19(03023), 1-6.
320. Трубчаста електропіч СУОЛ. Retrieved from <http://bortek.ua/ua/promyshlennyye-ehlektropechi/trubchatye-pechi/suol-0-4-4-1200>
321. Васильків, Н. М., Кочан, О. В., & Яскілка, В. Я. (2009). Стенд дослідження термоелектричних перетворювачів з керованим профілем температурного поля. Вісник Тернопільського державного технічного університету, (1), 122-130.
322. Кочан, О. & Кочан, Р. Термоелектричний перетворювач із можливістю імітації заданої похибки. Пат. України 115846.
323. Кочан, О. & Кочан, Р. Термоелектричний перетворювач із можливістю імітації заданої похибки. Пат. України 115931.
324. Kochan, O., Kochan, R., Kochan, V., & Su, J. (2017). Thermocouple with adjustable error. In *Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing*

*Systems: Technology and Applications (IDAACS), 2017 9th IEEE International Conference (Vol. 2, pp. 684-689).*

325. Мікросхема інтегральна 301HP5. Retrieved from <http://ielekt.ru/datasheet/301nr5.pdf>
326. AT89S52. Retrieved from [https://www.keil.com/dd/docs/datashts/atmel/at89s52\\_ds.pdf](https://www.keil.com/dd/docs/datashts/atmel/at89s52_ds.pdf)
327. Автомобільне реле NVF4-2C-Z30a 12VDC SPDT 40A. Retrieved from <https://archiwum.allegro.pl/oferta/przekaznik-12v-30-40a-samochodowy-przelaczny-spdt-i3263312248.html>
328. Liu, Z., Song, W., Kochan, O., Mykyichuk, M., & Jun, S. (2017). Theoretical Study of the Conditions of Maximum Manifestation of the Error Due to Inhomogeneity of Thermocouple Legs. *International Journal of Thermophysics*, 38(6), 88.

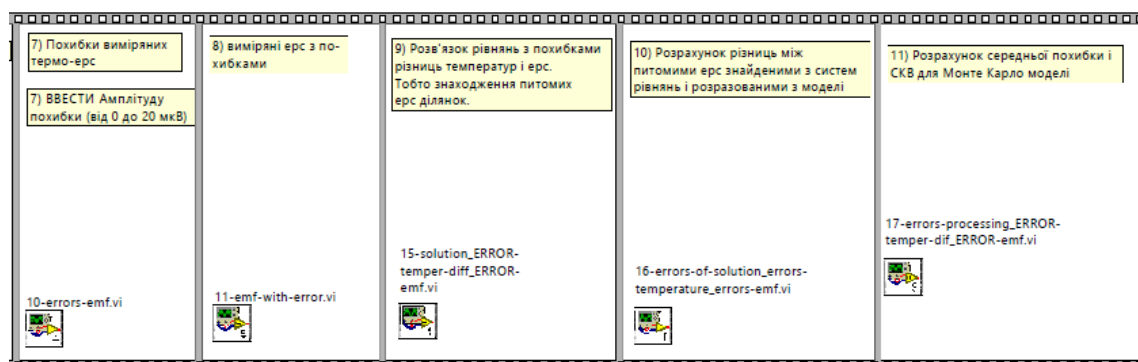
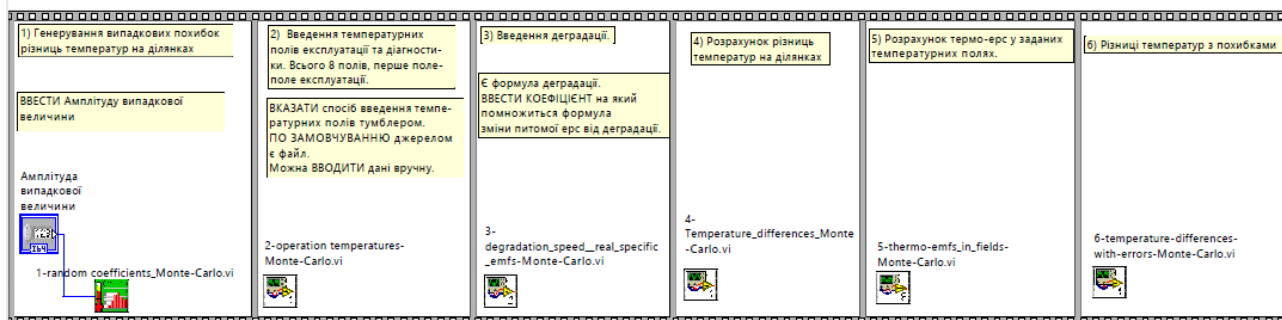
## Додаток А - Підпрограма опрацювання даних у LabView

0-full program-2.vi

D:\model system self testing\System of equations\model3-Monte\_Carlo\monte-carlo2\0-f

Last modified on 28.11.2019 at 9:20

Printed on 06.12.2019 at 21:34



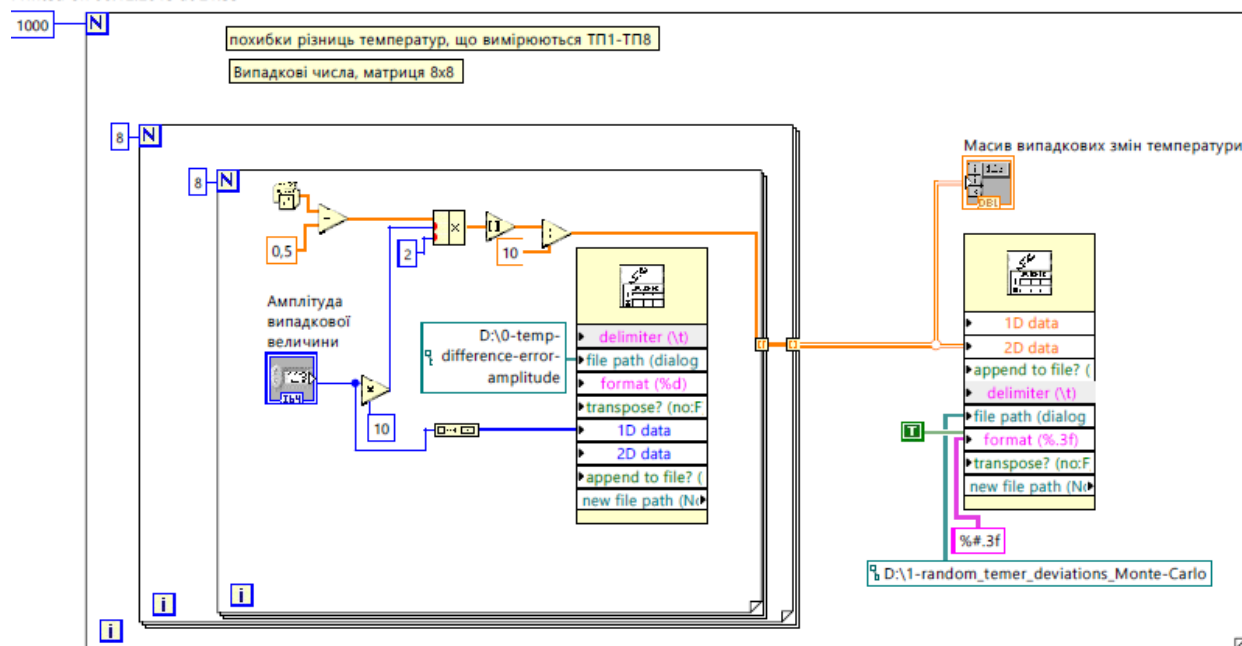
## Додаток Б - Підпрограма опрацювання даних у LabView

1-random coefficients\_Monte-Carlo.vi

D:\model system self testing\System of equations\model3-Monte\_Carlo\monte-carlo2\1-random coefficients\_Monte-Carlo.vi

Last modified on 28.11.2019 at 9:14

Printed on 06.12.2019 at 21:39





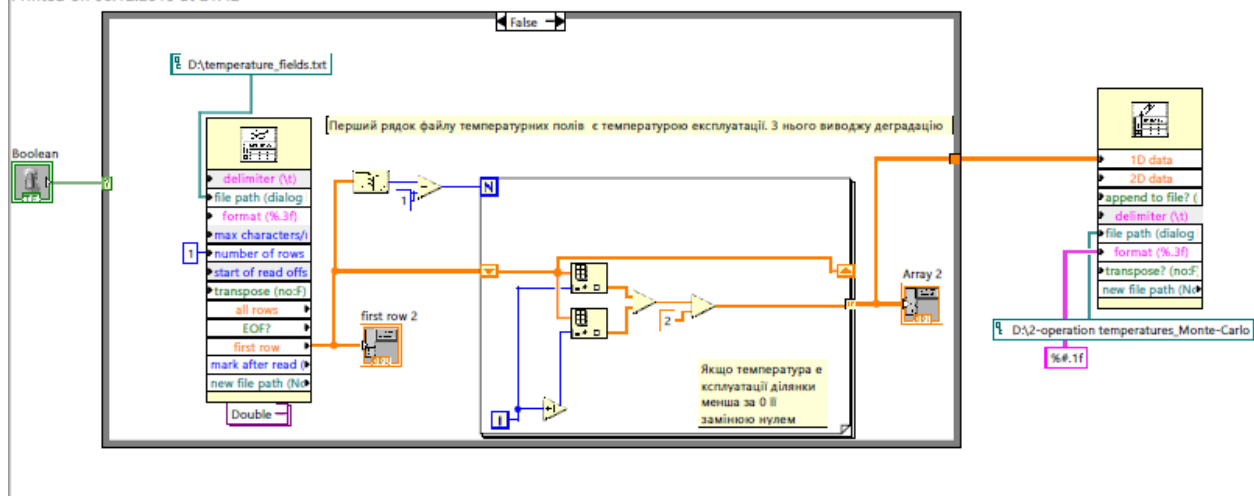
## Додаток В - Підпрограма опрацювання даних у LabView

2-operation temperatures-Monte-Carlo.vi

D:\model system self testing\System of equations\model3-Monte\_Carlo\monte-carlo2\2-operation temperatures-Monte-Carlo.vi

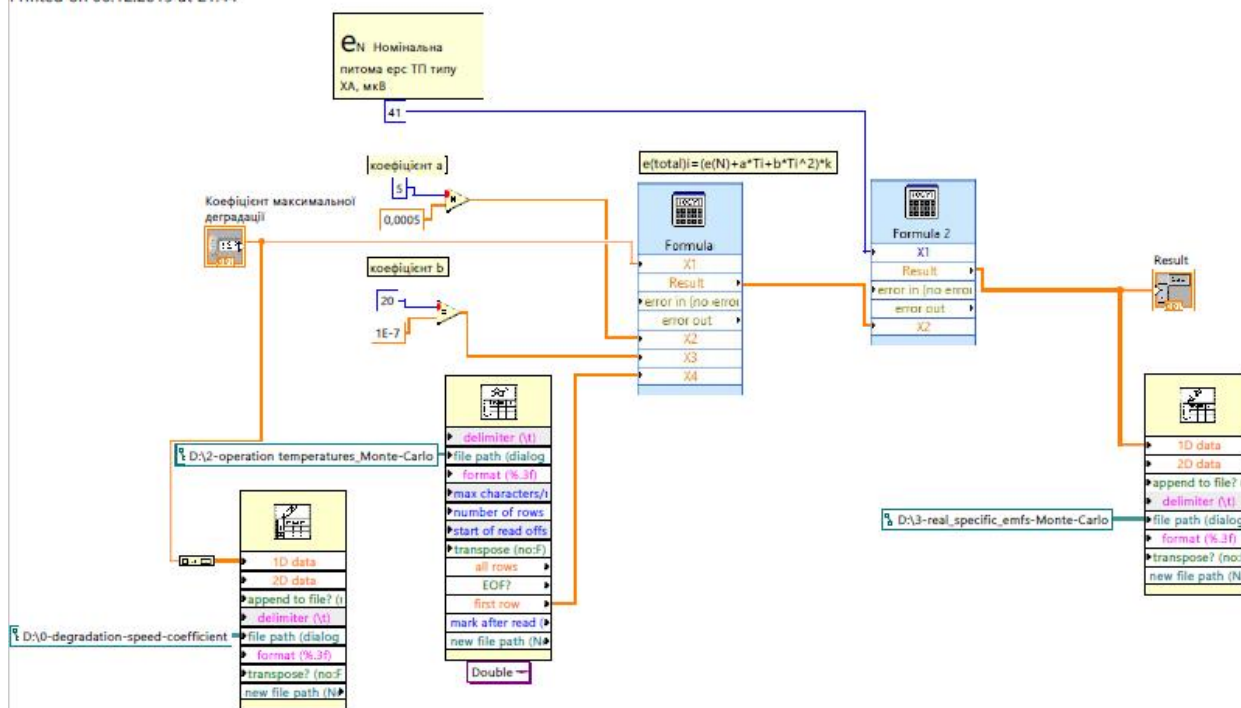
Last modified on 03.11.2019 at 21:43

Printed on 06.12.2019 at 21:42



## Додаток Д - Підпрограма опрацювання даних у LabView

D:\model system self testing\System of equations\model3-Monte\_Carlo\monte-carlo2\3-degradation\_speed\_real\_specific\_emfs-Monte-Carlo.vi  
 Last modified on 11.11.2019 at 19:39  
 Printed on 06.12.2019 at 21:44



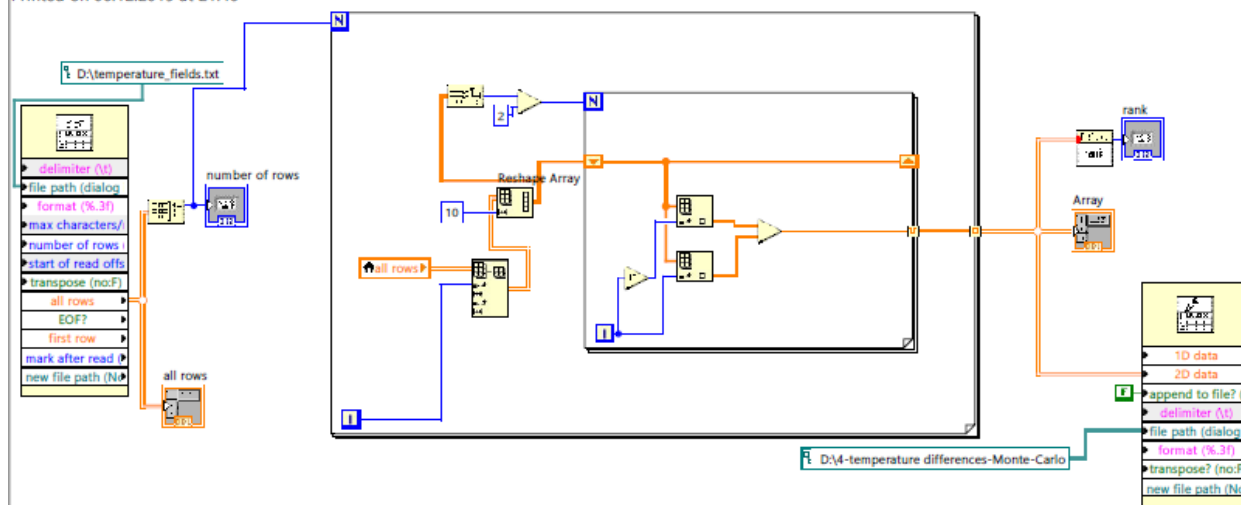
## Додаток Е - Підпрограма опрацювання даних у LabView

4-Temperature\_differences\_Monte-Carlo.vi

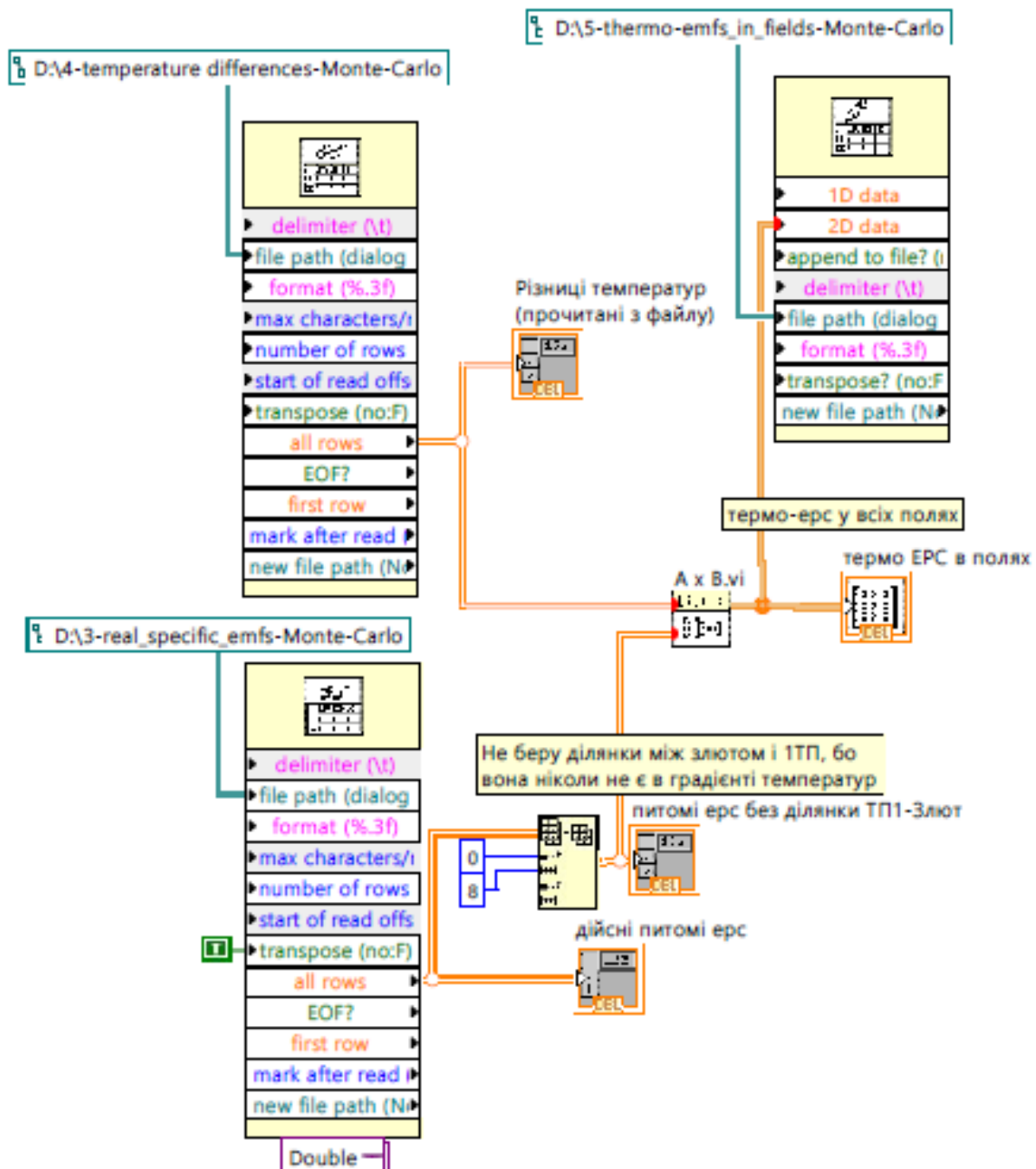
D:\model system self testing\System of equations\model3-Monte\_Carlo\monte-carlo2\4-Temperature\_differences\_Monte-Carlo.vi

Last modified on 03.11.2019 at 22:26

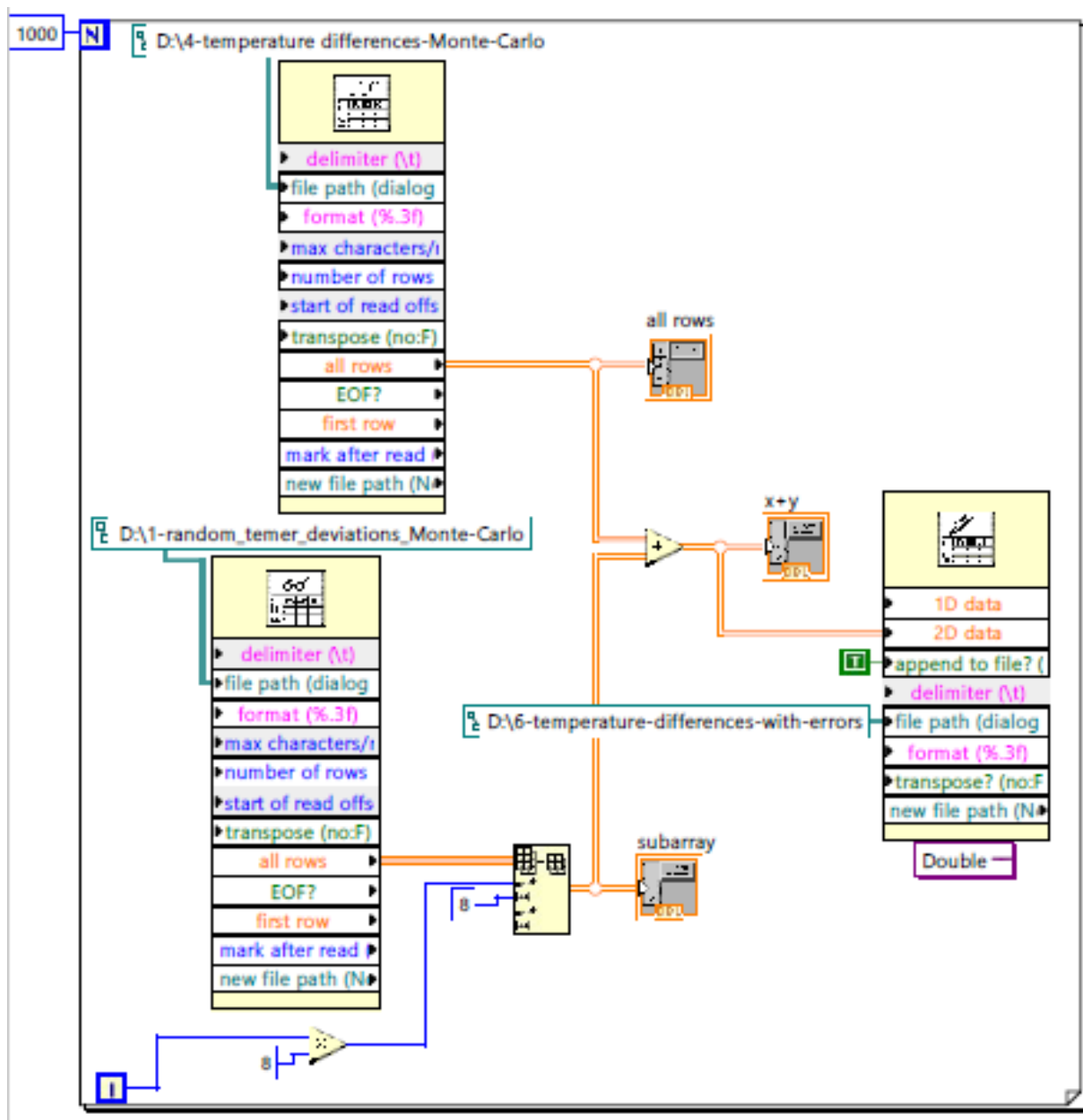
Printed on 06.12.2019 at 21:46



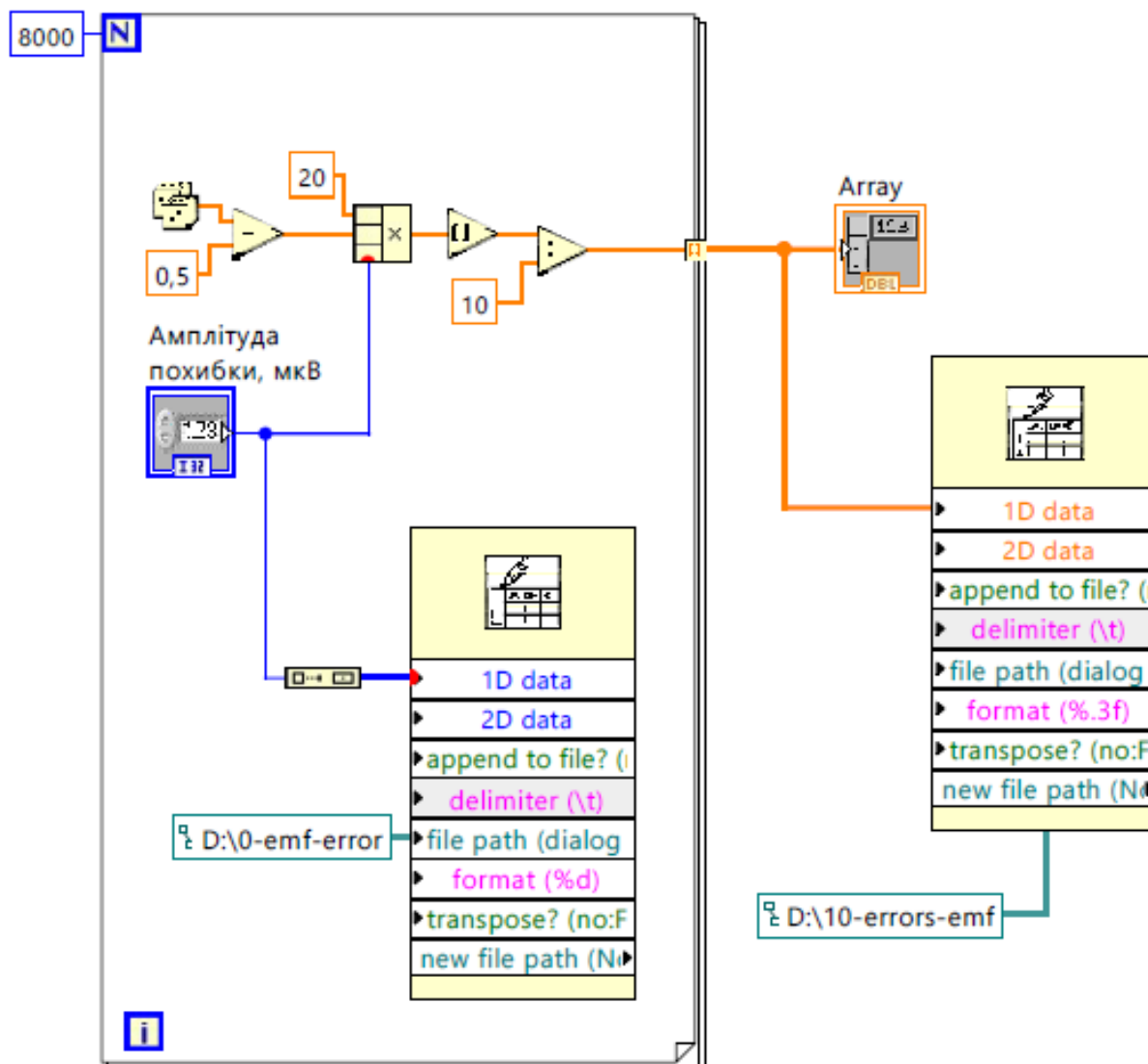
## Додаток Ж - Підпрограма опрацювання даних у LabView



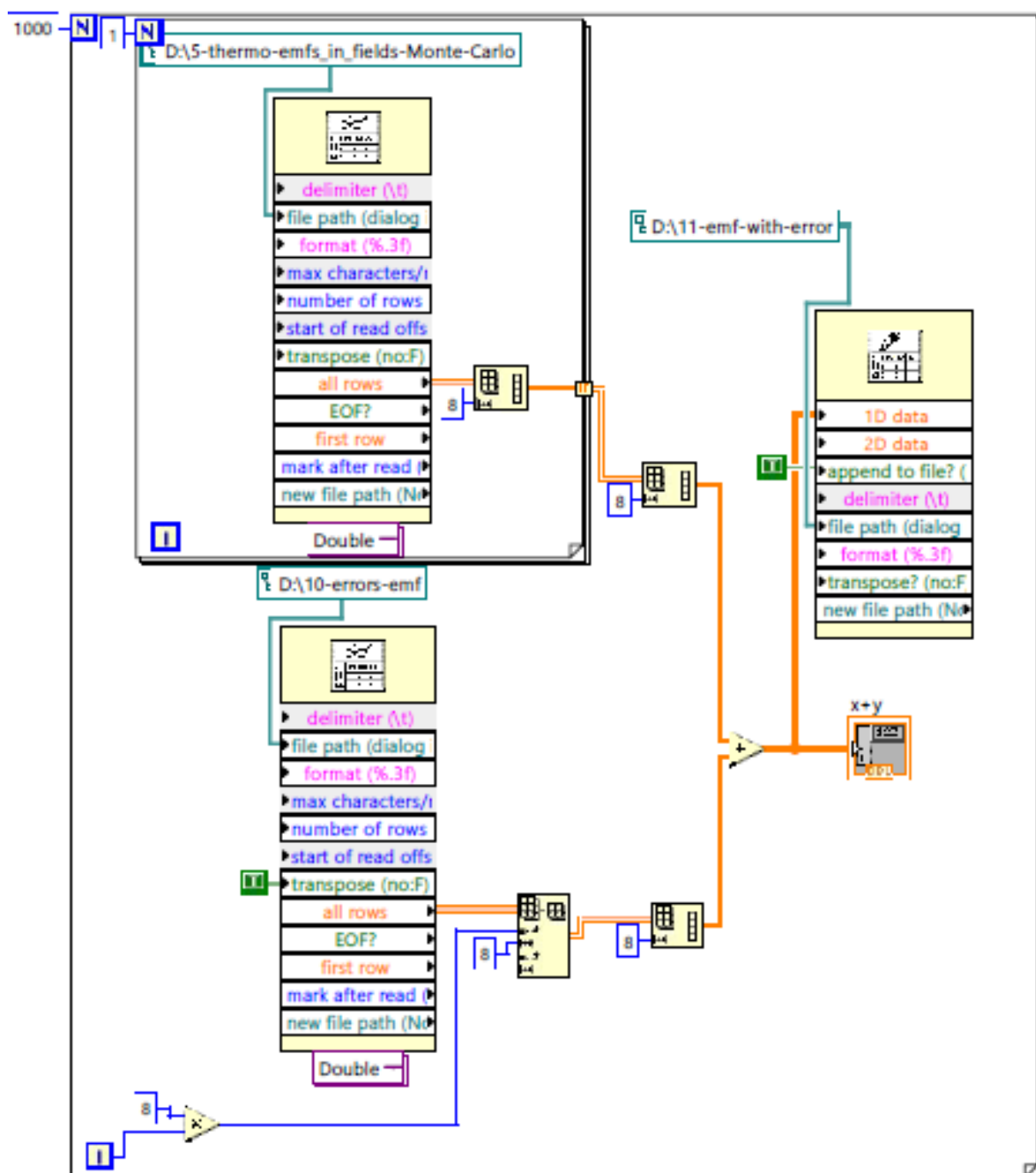
## Додаток И - Підпрограма опрацювання даних у LabView



## Додаток К - Підпрограма опрацювання даних у LabView



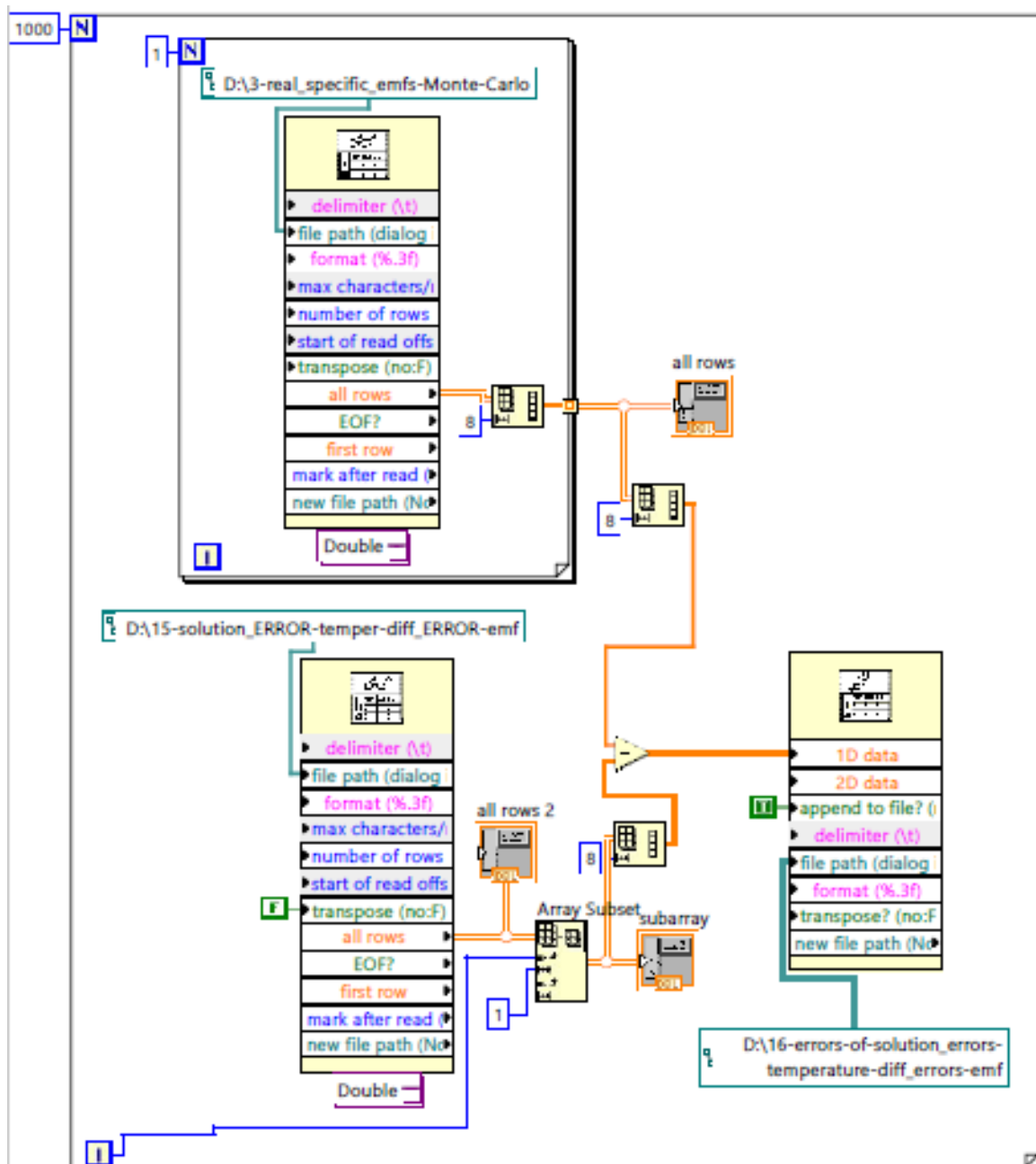
## Додаток Л - Підпрограма опрацювання даних у LabView



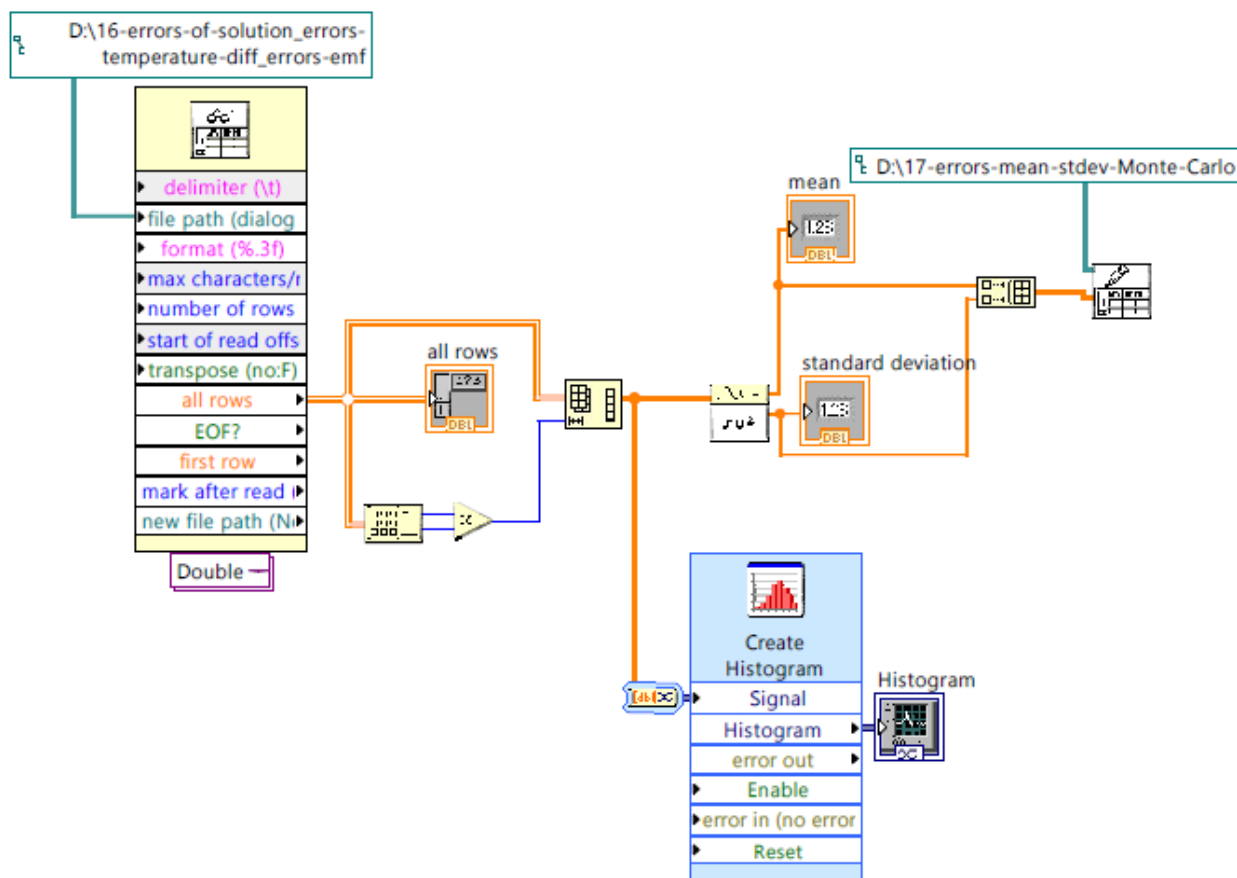




## Додаток Н - Підпрограма опрацювання даних у LabView



## Додаток П - Підпрограма опрацювання даних у LabView



## Додаток Р - Дослідження моделей похибки ТП на базі методу найменших квадратів

Дослідження моделей похибки ТП на базі методу найменших квадратів

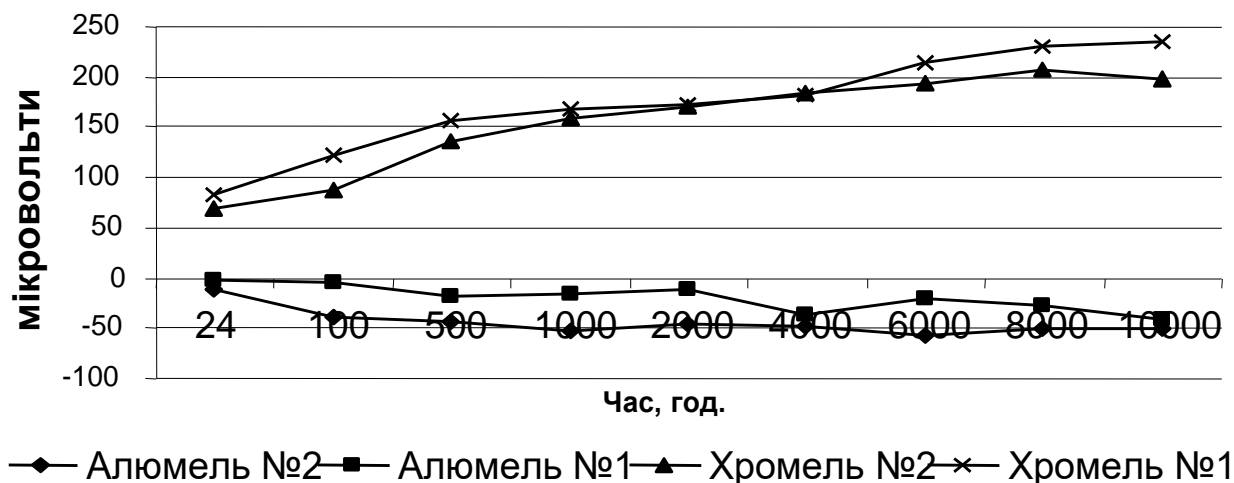


Рис. Р.1. Залежності похибки від дрейфу ФП електродів ТП типу ХА

Таблиця Р.1. Регресійні моделі часового дрейфу ФП електродів ТП

№		Хромель №1	Хромель №2	Алюмель №1	Алюмель №1	Алюмель №2	Алюмель №2
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Вид моделі	$\bar{y} = a_1 \sqrt[4]{\tau} + a_2 \sqrt[3]{\tau}$	$\bar{y} = a_1 \sqrt[4]{\tau} + a_2 \sqrt[3]{\tau}$	$\bar{y} = a_1 \sqrt[4]{\tau} + a_2 \sqrt[3]{\tau}$	$\bar{y} = a_1 \sqrt[4]{\tau} + a_2 \sqrt{\tau}$	$\bar{y} = a_1 \sqrt[4]{\tau} + a_2 \sqrt[3]{\tau}$	$\bar{y} = a_1 \sqrt[4]{\tau} + a_2 \sqrt{\tau}$
2	Коефіцієнти моделі	$a_1 = 47,96$ $a_2 = -11,53$	$a_1 = 58,22$ $a_2 = -17,43$	$a_1 = 13,71$ $a_2 = -10$	$a_1 = 1,48$ $a_2 = -0,95$	$a_1 = -20,87$ $a_2 = 3,1$	$a_1 = -16,86$ $a_2 = 0,27$
3	Сума похибок	-7,73 мкВ	4,61 мкВ	-0,82 мкВ	1,03 мкВ	-0,06 мкВ	-1,68 мкВ
4	Вид моделі	$\bar{y} = a_0 + a_1 \sqrt[4]{\tau} + a_2 \sqrt[3]{\tau}$	$\bar{y} = a_0 + a_1 \sqrt[4]{\tau} + a_2 \sqrt[3]{\tau}$	$\bar{y} = a_0 + a_1 \sqrt[4]{\tau} + a_2 \sqrt[3]{\tau}$	$\bar{y} = a_0 + a_1 \sqrt[4]{\tau} + a_2 \sqrt{\tau}$	$\bar{y} = a_0 + a_1 \sqrt[4]{\tau} + a_2 \sqrt[3]{\tau}$	$\bar{y} = a_0 + a_1 \sqrt[4]{\tau} + a_2 \sqrt{\tau}$
5	Коефіцієнти моделі	$a_0 = -61,13$ $a_1 = 91,4$ $a_2 = -29,16$	$a_0 = 36,47$ $a_1 = 32,30$ $a_2 = -6,91$	$a_0 = -6,52$ $a_1 = 18,34$ $a_2 = -11,88$	$a_0 = 4,39$ $a_1 = -0,05$ $a_2 = -0,84$	$a_0 = -0,48$ $a_1 = -20,53$ $a_2 = 2,96$	$a_0 = -7,19$ $a_1 = -14,37$ $a_2 = 0,08$
6	Сума похибок	Менше $3 \cdot 10^{-13}$ мкВ	0	Менше $3 \cdot 10^{-14}$ мкВ	Менше $3 \cdot 10^{-14}$ мкВ	Менше $6 \cdot 10^{-14}$ мкВ	Менше $10^{-13}$ мкВ

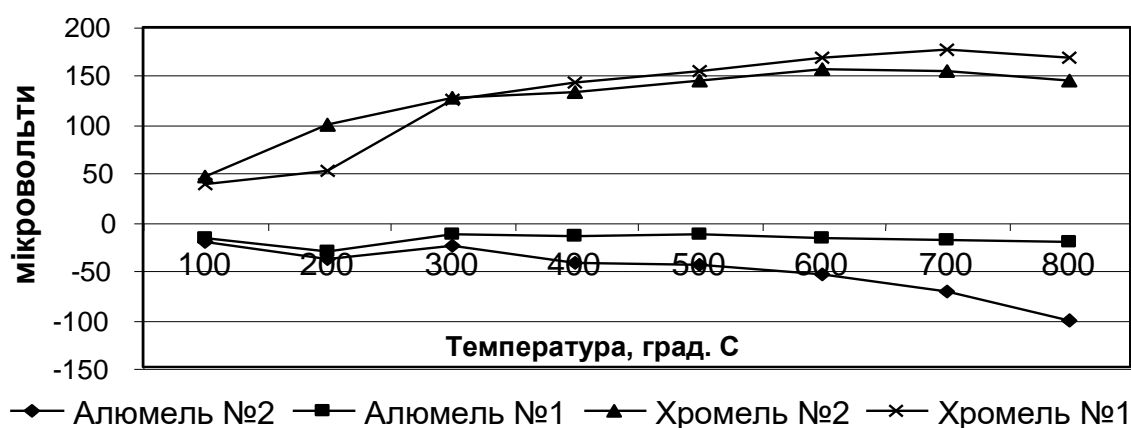


Рис. Р.2. Залежності похибки від набутої термоелектричної неоднорідності електродів ТП типу ХА від зміни температури діапазону

Таблиця Р.2. Регресійні моделі похибки ТП по діапазону

		Хромель №1	Хромель №2	Алюмель №1	Алюмель №2
1	2	3	4	5	6
1	Вид моделі	$\bar{y} = a_1 t + a_2 t^2$	$\bar{y} = a_1 t + a_2 t^2$	$\bar{y} = a_1 t + a_2 t^2$	$\bar{y} = a_1 t + a_2 t^2$
2	Коефіц. Моделі	$a_1 = 0,4603$ $a_2 = -0,0003$	$a_1 = 0,526476$ $a_2 = -0,00044$	$a_1 = -0,07483$ $a_2 = 7 \cdot 10^{-05}$	$a_1 = -0,08755$ $a_2 = -3 \cdot 10^{-05}$
3	Сума похибок	11,79339 мкВ	-5,41435 мкВ	13,93251 мкВ	15,89955 мкВ
4	Вид моделі	$\bar{y} = a_0 + a_1 t + a_2 t^2$	$\bar{y} = a_0 + a_1 t + a_2 t^2$	$\bar{y} = a_0 + a_1 t + a_2 t^2$	$\bar{y} = a_0 + a_1 t + a_2 t^2$
5	Коефіц. моделі	$a_0 = -22,955$ $a_1 = 0,56771$ $a_2 = -0,00041$	$a_0 = 10,53864$ $a_1 = 0,477166$ $a_2 = -0,00039$	$a_0 = -27,1186$ $a_1 = 0,052058$ $a_2 = -5 \cdot 10^{-05}$	$a_0 = -30,947$ $a_1 = 0,05725$ $a_2 = -0,0002$
6	Сума похибок	Менше $10^{-12}$ мкВ	0	Менше $10^{-13}$ мкВ	Менше $10^{-13}$ мкВ
7	Вид моделі	$\bar{y} = a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3$	$\bar{y} = a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3$	$\bar{y} = a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3$	$\bar{y} = a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3$
1	2	3	4	5	6
8	Коефіц. моделі	$a_1 = 0,36423$ $a_2 = 7 \cdot 10^{-05}$ $a_3 = -0,00041$	$a_1 = 0,609592$ $a_2 = -0,00077$ $a_3 = 3 \cdot 10^{-07}$	$a_1 = -0,19275$ $a_2 = 0,000537$ $a_3 = -4 \cdot 10^{-07}$	$a_1 = -0,2474$ $a_2 = 0,0006$ $a_3 = -5 \cdot 10^{-07}$

1	2	3	4	5	6
9	Сума похибок	-3,17164 мкВ	2,044359 мкВ	-3,34995 мкВ	1,555334 мкВ
10	Вид моделі	$\hat{y} = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3$	$\hat{y} = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3$	$\hat{y} = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3$	$\hat{y} = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3$
11	Коефіц. моделі	$a_0 = -19,2564$ $a_1 = 0,5292$ $a_2 = -0,00031$ $a_3 = -7 \cdot 10^{-08}$	$a_0 = -12,4122$ $a_1 = 0,715948$ $a_2 = -0,00101$ $a_3 = 4 \cdot 10^{-07}$	$a_0 = -20,339$ $a_1 = -0,01848$ $a_2 = 0,00013$ $a_3 = 1 \cdot 10^{-07}$	$a_0 = -9,4431$ $a_1 = -0,1665$ $a_2 = 0,000414$ $a_3 = 4 \cdot 10^{-07}$
12	Сума похибок	Менше $10^{-12}$ мкВ	Менше $10^{-12}$ мкВ	Менше $10^{-12}$ мкВ	Менше $10^{-12}$ мкВ

### Додаток С - Дослідження методу найменших квадратів

В табл. Р.2 також видно закономірність – при відсутності вільного члена (рядки 2 та 8 табл. Р.2) сума залишків (збурень) моделі не рівна нулю (рядки 3 та 9 табл. Р.2). Як і для табл. Р.1, це не дозволяє використати МНК для дослідження моделі та адекватності опису похибки електродів ТП. Моделі з вільним членом (рядки 5 та 11 табл. Р.2) приведені для порівняння – в них (див. рядки 6 і 12 табл. Р.2).

Як було показано у § 4.3, класичний МНК принципово не годиться для збільшення обсягу результатів дослідження похибки ТП та побудови їх математичної моделі похибок через те, що, при примусовому встановленні вільного члена регресійного рівняння рівним нулю, сума залишків (збурень) не рівна нулю. Це можна довести аналітично [253, 257].

Розглянемо поліноміальну регресію без вільного члена, яку можна записати як

$$Y = \sum_{j=1}^k \alpha_j t^j + U \quad , \quad (C.1)$$

де  $\alpha_j$  – невідомі (теоретичні) детерміновані параметри;  $U$  – невідома випадкова величина (збурення).

Нехай похибка набирає значення  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , де  $n$  – обсяг вибірки. В такому разі отримаємо систему  $n$  рівнянь

$$Y_i = \sum_{j=1}^k \alpha_j t_i^j + U_i, \quad i = \overline{1, n} \quad . \quad (C.2)$$

Для повної специфікації моделі (C.2), тобто для оцінки невідомих коефіцієнтів  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k$ , покладемо, що виконуються наступні передумови стосовно випадкової складової правої частини (C.2) [251 - 260]:

**Передумова 1.** Математичне сподівання всіх збурень дорівнює нулю

$$M(U_i) = 0, \quad i = \overline{1, n} \quad . \quad (C.3)$$

**Передумова 2.** Збурення мають однакову дисперсію

$$D(U_i) = \sigma^2, \quad i = \overline{1, n}, \quad (C.4)$$

де  $\sigma^2$  – невідоме число, яке підлягає оцінюванню.

**Передумова 3.** Збурення  $U_i$  та  $U_j$  при  $i \neq j$  не корелюють між собою

$$\text{cov}(U_i, U_j) = 0 \quad \forall i, j = \overline{1, n}, \quad i \neq j. \quad (C.5)$$

За конкретною вибіркою

$$(t_1, y_1), (t_2, y_2), \dots, (t_n, y_n) \quad (C.6)$$

отримаємо оцінку моделі (C.2)

$$y_i = \sum_{j=1}^k a_j t_i^j + u_i, \quad i = \overline{1, n}, \quad (C.7)$$

де  $a_1, a_2, \dots, a_k$  – оцінки невідомих параметрів  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k$  відповідно;  $u_i$  – емпіричний залишок регресії або відхилення.

Позначимо:

$$\hat{y}_i = \sum_{j=1}^k a_j t_i^j, \quad i = \overline{1, n}, \quad (C.8)$$

де  $\hat{y}_i$  – розрахункове або оціночне значення  $Y_i$  для  $t = t_i$ , оскільки, з врахуванням (Б.4)  $M(Y_i) = \sum_{j=1}^k \alpha_j t_i^j$ , а  $a_j$  – оцінка параметра  $\alpha_j$  для  $j = \overline{1, k}$ .

Тоді

$$u_i = y_i - \hat{y}_i, \quad i = \overline{1, n}, \quad (C.9)$$

де  $u_i$  – емпіричні залишки.

Ці емпіричні залишки визначаються видом моделі та залежать від методу знаходження оцінок параметрів. Однак у кожному випадку повинна виконуватися рівність

$$\sum_{i=1}^n u_i = 0, \quad (C.10)$$

що випливає з (C.3).

Виявляється, що відсутність у моделі (C.2) вільного члена зумовлює некоректність використання МНК для оцінювання невідомих параметрів.

Справді, згідно із МНК у відповідності з рівностями (С.8) та (С.9)

мінімізується функція  $k$  змінних  $Q(a_1, a_2, \dots, a_k) = \sum_{i=1}^n u_i^2$ , а оцінки  $a_1, a_2, \dots, a_k$

знаходяться як розв'язок системи  $k$  нормальних рівнянь

$$\left\{ \sum_{i=1}^n u_i t_i^j = 0, \quad j = \overline{1, k} \quad . \right. \quad (\text{С.11})$$

Очевидно, що отримані МНК-оцінки в загальному випадку не задовольнятимуть рівність (С.10), а тому ставиться під сумнів виконання передумови 1, яка використовується при доведенні незміщеності оцінок. Зауважимо, що наявність у поліноміальній моделі вільного члена  $a_0 \neq 0$  зумовлює приєднання до системи (С.11) рівняння (С.10), тобто у цьому випадку МНК-оцінки вже стають незміщеними.

Наступний наслідок невиконання рівності (С.10) приводить до неможливості так званої декомпозиції дисперсій. Якщо виконується рівність (С.10), тоді правильною є рівність

$$\sigma_{\text{заг}}^2 = \sigma_{\text{рег}}^2 + \sigma_{\text{ном}}^2 \quad , \quad (\text{С.12})$$

де  $\sigma_{\text{заг}}^2$  – загальна дисперсія,  $\sigma_{\text{рег}}^2$  – дисперсія, що пояснює регресію,  $\sigma_{\text{ном}}^2$  – дисперсія емпіричних залишків.

Їх значення можна порахувати за формулами

$$\sigma_{\text{заг}}^2 = \sigma_y^2 = n^{-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2; \quad \sigma_{\text{рег}}^2 = n^{-1} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2; \quad \sigma_{\text{ном}}^2 = n^{-1} \sum_{i=1}^n u_i^2 = n^{-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 .$$

Якщо ж МНК-оцінки знайдені на підставі системи нормальних рівнянь (С.8), тоді рівність (С.12) вже не виконується. Справді, згідно з (С.9)

$$\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 + 2 \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y}) u_i + \sum_{i=1}^n u_i^2 \quad ,$$

а відповідно до (С.8) та (С.11)

$$\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y}) u_i = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k a_j t_i^j u_i - \bar{y} \sum_{i=1}^n u_i = \sum_{j=1}^k a_j \sum_{i=1}^n u_i t_i^j - \bar{y} \sum_{i=1}^n u_i = -\bar{y} \sum_{i=1}^n u_i \quad .$$

У підсумку отримаємо рівність



$$\sigma_{\text{заг}}^2 = \sigma_{\text{регр}}^2 - 2 \bar{y} \bar{u} + \sigma_{\text{ном}}^2, \quad (\text{C.13})$$

яка не дозволяє коректно визначити коефіцієнт детермінації  $R^2$ . Тоді для оцінки якості моделі слід використовувати  $t$  статистику [252].

## Додаток Т - Дослідження вдосконаленого методу найменших квадратів

Для того, щоби підтвердити можливість використання МНКВ при побудові математичної моделі похибки ТП, розглянемо властивості МНКВ-оцінок.

**Властивість 1.** МНКВ-оцінки є лінійними комбінаціями спостережених значень  $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$

$$a_j = \sum_{i=1}^n \mu_i^{(j)} Y_i, \quad j = \overline{1, k}, \quad (T.1)$$

де вагові коефіцієнти визначаються формулами

$$\mu_i^{(j)} = \Delta^{-1} (B_{j1} + B_{j2} t_i + \dots + B_{j, k+1} t_i^k), \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, k}, \quad (T.2)$$

і задовольняють співвідношення

$$\sum_{i=1}^n \mu_i^{(j)} t_i^l = \delta_{jl}, \quad j, l = \overline{1, k}, \dots, \quad (T.3)$$

$$\sum_{j=1}^k T_j \mu_i^{(j)} = 1, \quad i = \overline{1, n}, \quad (T.4)$$

де  $\delta_{jl}$  – символ Кронекера.

Рівності (Т.1) і (Т.2) безпосередньо отримано з векторної рівності (4.34) з урахуванням (4.30) та (4.25), а співвідношення (Т.3) випливають з (4.22) і властивостей алгебраїчних доповнень  $B_{jl}$  та визначників. З першого рівняння системи (4.23) і співвідношень (4.22) та (Т.1) отримаємо рівність відносно випадкових величин  $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$

$$\sum_{i=1}^n (T_1 \mu_i^{(1)} + T_2 \mu_i^{(2)} + \dots + T_k \mu_i^{(k)} - 1) Y_i = 0, \quad (T.4)$$

з якої з необхідністю випливають рівності (Т.4).

Ця властивість використовується для доведення незміщеності МНКВ-оцінок  $a_1, a_2, \dots, a_k$  невідомих параметрів  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k$ .

**Властивість 2.** Якщо виконується передумова 1, тоді МНКВ – оцінки

$a_1, a_2, \dots, a_k$  є незміщеними оцінками відповідних параметрів  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k$ , тобто

$$M(a) = \alpha \quad . \quad (Т.5)$$

Для доведення використаємо рівності (4.33) і (4.34)

$$a = BT_Y = B\tau Y = B\tau(\tau_1\alpha + U) = B\tau\tau_1\alpha + B\tau U = I_k\alpha + B\tau U = \alpha + B\tau U \quad . \quad (Т.6)$$

Тоді, з урахуванням детермінованості матриць  $B$  і  $\tau$ , властивостей математичного сподівання і передумови 1 отримаємо

$$M(a) = M(a) + B\tau M(U) = \alpha \quad .$$

Знайдемо дисперсійно-коваріаційну матрицю МНКВ-оцінок, використавши передумови 1 ... 3, співвідношення (Т.5), (Т.6) і властивості транспонування добутку матриць

$$\begin{aligned} \sum_a = M[(a - \alpha)(a - \alpha)'] &= M[(\alpha + B\tau U - \alpha)(\alpha + B\tau U - \alpha)'] = \\ &= M(B\tau U U' \tau' B') = B\tau M(UU)' \tau' B' = \sigma^2 B\tau\tau' B' \end{aligned} \quad .$$

Із означення матриці  $\tau$

$$\tau\tau' = \begin{pmatrix} n & T_1 & T_2 & \dots & T_k \\ T_1 & T_2 & T_3 & \dots & T_{k+1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ T_k & T_{k+1} & T_{k+2} & \dots & T_k \end{pmatrix} ,$$

а з урахуванням (4.30)

$$B\tau\tau' = \Delta^{-1} \begin{pmatrix} B_{11}n + \sum_{i=1}^k B_{1,i+1}T_i & \Delta & 0 & \dots & 0 \\ B_{21}n + \sum_{i=1}^k B_{2,i+1}T_i & 0 & \Delta & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ B_{k1}n + \sum_{i=1}^k B_{k,i+1}T_i & 0 & 0 & \dots & \Delta \end{pmatrix} = \Delta^{-1} \begin{pmatrix} B_{11}n & \Delta & 0 & \dots & 0 \\ B_{21}n & 0 & \Delta & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ B_{k1}n & 0 & 0 & \dots & \Delta \end{pmatrix} , \quad (Т.7)$$

оскільки, зокрема, згідно із змістом  $B_{ij}$  як алгебраїчних доповнень, теоремою Лапласа про розклад визначника по рядках і властивістю визначника

$$\sum_{i=1}^k B_{1,i+1} T_i = \begin{bmatrix} 0 & T_1 & T_2 & \cdots & T_k \\ T_2 & T_3 & T_4 & \cdots & T_{k+1} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ T_k & T_{k+1} & T_{k+2} & \cdots & T_{2k} \\ 0 & T_1 & T_2 & \cdots & T_k \end{bmatrix} = 0 .$$

Остаточню

$$K = B\tau\tau'B' = \begin{pmatrix} n\left(\frac{B_{11}}{\Delta}\right)^2 + \frac{B_{12}}{\Delta} & n\frac{B_{11}B_{21}}{\Delta^2} + \frac{B_{22}}{\Delta} & \cdots & n\frac{B_{11}B_{k,1}}{\Delta^2} + \frac{B_{k,2}}{\Delta} \\ & n\left(\frac{B_{21}}{\Delta}\right)^2 + \frac{B_{23}}{\Delta} & \cdots & n\frac{B_{21}B_{k,1}}{\Delta^2} + \frac{B_{k,3}}{\Delta} \\ & & \cdots & \cdots \\ & & & n\left(\frac{B_{k,1}}{\Delta}\right)^2 + \frac{B_{k,k+1}}{\Delta} \end{pmatrix}. \quad (\text{T.8})$$

При цьому елементи під основною діагоналлю рівні відповідним елементам над нею, оскільки матриця  $K$  – симетрична. Отже

$$\sum_a = \sigma^2 K , \quad (\text{T.9})$$

а тому

$$\begin{aligned} \sigma_{a_1}^2 = D(a_1) &= \sigma^2 \left[ n\left(\frac{B_{11}}{\Delta}\right)^2 + \frac{B_{12}}{\Delta} \right], \\ \sigma_{a_2}^2 = D(a_2) &= \sigma^2 \left[ n\left(\frac{B_{21}}{\Delta}\right)^2 + \frac{B_{23}}{\Delta} \right], \dots, \\ \sigma_{a_k}^2 = D(a_k) &= \sigma^2 \left[ n\left(\frac{B_{k,1}}{\Delta}\right)^2 + \frac{B_{k,k+1}}{\Delta} \right] \end{aligned} \quad (\text{T.10})$$

$\text{cov}(a_i, a_j)$  дорівнює елементу матриці  $K$ , що знаходиться в  $i$  – тому рядку та  $j$  – тому стовпцю, помноженому на  $\sigma^2$ , тобто

$$\text{cov}(a_i, a_j) = \sigma^2 \left( \frac{nB_{i1}B_{j1}}{\Delta^2} + \frac{B_{j,i+1}}{\Delta} \right), \quad i, j = \overline{1, k}, \quad i \neq j . \quad (\text{T.11})$$

У співвідношеннях (Т.9)-(Т.11) невідомим є параметр  $\sigma^2$  (дисперсія збурень), який необхідно оцінити. Позначимо  $u = (u_1, u_2, \dots, u_n)'$ . Тоді згідно з

(Т.26), (Т.47) і (Т.53) для нефіксованої вибірки

$$u = Y - \tau_1 a = \tau_1 \alpha + U - \tau_1 (\alpha + B\tau U) = U - \tau_1 B\tau U, \quad u' = U' - U'\tau' B'\tau'_1, \\ u'u = U'U - U'(\tau_1 B\tau + \tau'B'\tau'_1)U + U'\tau'B'\tau'_1 B\tau U. \quad (\text{T.12})$$

Відповідно до першої та другої передумов

$$M(U'U) = M\left(\sum_{i=1}^n U_i^2\right) = \sum_{i=1}^n M(U_i^2) = \sum_{i=1}^n M(U_i - 0)^2 = \sum_{i=1}^n D(U_i) = n\sigma^2. \quad (\text{T.13})$$

Матриця  $C = (c_{ij}) = \tau_1 B\tau + \tau'B'\tau'_1$  симетрична і детермінована, тому

$$U'CU = \sum_{i,j=1}^n c_{ij} U_i U_j, \quad M(U'CU) = \sum_{i,j=1}^n c_{ij} M(U_i U_j).$$

Останню суму розкладемо на дві складові – суми елементів на головній діагоналі матриці  $C$  і поза нею

$$M(U'CU) = \sum_{i=1}^n c_{ii} M(U_i^2) + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^n c_{ij} M(U_i U_j).$$

Другий доданок дорівнює нулю згідно з передумовою 3. Сума діагональних елементів матриці  $C$  утворює слід матриці  $tr(C)$ . Але діагональні елементи матриць  $\tau_1 B\tau$  і  $\tau'B'\tau'_1$  відповідно рівні. Тому, використавши властивості сліду матриці та рівність (4.33), отримаємо

$$\sum_{i=1}^n c_{ii} = tr(\tau_1 B\tau + \tau'B'\tau'_1) = tr(\tau_1 B\tau) + tr(\tau'B'\tau'_1) = 2tr(\tau_1 B\tau) = 2tr(B\tau\tau_1) = 2tr(I_k) = 2k.$$

Тобто

$$M[U'(\tau_1 B\tau + \tau'B'\tau'_1)U] = 2k\sigma^2. \quad (\text{T.14})$$

Аналогічно

$$M(U'\tau'B'\tau'_1\tau_1 B\tau U) = tr(\tau'B'\tau'_1\tau_1 B\tau)\sigma^2. \quad (\text{T.15})$$

Використавши властивість сліду матриці, отримаємо

$$tr(\tau'B'\tau'_1\tau_1 B\tau) = tr(B'\tau'_1\tau_1 B\tau\tau') = tr(\tau\tau'B'\tau'_1\tau_1 B). \quad (\text{T.16})$$

Згідно з означенням матриці  $\tau_1$ , отримаємо  $\tau_1' \tau_1 = \begin{pmatrix} T_2 & T_3 & \cdots & T_{k+1} \\ T_2 & T_4 & \cdots & T_{k+2} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ T_{k+1} & T_{k+2} & \cdots & T_{2k} \end{pmatrix}$ ,

тому з урахуванням (4.40) буде  $T = \begin{pmatrix} T_1 & \cdots & T_k & 0 \\ & & & T_1 \\ & \tau_1' \tau_1 & & \cdots \\ & & & T_k \end{pmatrix}$ ,

а згідно з (4.26) і (4.31) маємо  $T^{-1} = \begin{pmatrix} & B \\ \Delta^{-1} B_{k+1,1} & \cdots & \Delta^{-1} B_{k+1,k+1} \end{pmatrix}$ .

Тоді рівність  $TT^{-1} = I_{k+1}$  набере такого виду

$$\begin{pmatrix} T_1 & \cdots & T_k & 0 \\ & & & T_1 \\ & \tau_1' \tau_1 & & \cdots \\ & & & T_k \end{pmatrix} \begin{pmatrix} & B \\ \Delta^{-1} B_{k+1,1} & \cdots & \Delta^{-1} B_{k+1,k+1} \end{pmatrix} = I_{k+1},$$

звідки

$$\tau_1' \tau B = \Delta^{-1} \begin{pmatrix} -T_1 B_{k+1,1} & 1 - T_1 B_{k+1,2} & -T_1 B_{k+1,3} & \cdots & -T_1 B_{k+1,k+1} \\ -T_2 B_{k+1,1} & -T_2 B_{k+1,2} & 1 - T_2 B_{k+1,3} & \cdots & -T_2 B_{k+1,k+1} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ -T_k B_{k+1,1} & -T_k B_{k+1,2} & -T_k B_{k+1,3} & \cdots & 1 - T_k B_{k+1,k+1} \end{pmatrix}.$$

Згідно з (5.42)  $\tau \tau' B' = \begin{pmatrix} \Delta^{-1} B_{11} n & \cdots & \Delta^{-1} B_{k1} n \\ & I_k & \end{pmatrix}$ . Тому безпосередньо

отримаємо

$$\begin{aligned} \text{tr}(\tau \tau' B' \tau_1' \tau_1 B) &= -\frac{n}{\Delta} B_{k+1,1} (T_1 B_{11} + T_2 B_{21} + \cdots + T_k B_{k,1}) \Delta^{-1} + 1 - \Delta^{-1} T_1 B_{k+1,2} + \\ &+ 1 - \Delta^{-1} T_2 B_{k+1,3} + \cdots + 1 - \Delta^{-1} T_k B_{k+1,k+1} = -\Delta^{-1} B_{k+1,1} n + k - 1 \end{aligned}$$

де враховано розклад визначника матриці  $T'$  по першому стовпцю і останньому рядку.

У підсумку із (Т.12) з використанням (Т.13) - (Т.15) і детермінованості матриць  $\tau$ ,  $\tau_1$  і  $B$  остаточно отримаємо

$$M\left(\sum_i^n u_i^2\right) = \left[\left(1 - \frac{B_{k+1,1}}{\Delta}\right)n - k - 1\right]\sigma^2, \quad (\text{T.17})$$

де  $\Delta$  визначено у (4.27).

Рівність (Т.17) означає, що незміщена оцінка  $\hat{\sigma}^2$  або вибіркова залишкова дисперсія параметра  $\sigma^2$  визначається за формулою

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n u_i^2}{\left(1 - B_{k+1,1}\Delta^{-1}\right) \cdot n - k - 1}. \quad (\text{T.18})$$

Таким чином, доведена властивість незміщеності МНКВ-оцінок  $a_1, a_2, \dots, a_k$  невідомих параметрів  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k$  дає змогу стверджувати, що математичне сподівання моделі (С.1) має вид

$$M(Y) = M\left(\sum_{j=1}^k \alpha_j t^j + U\right) = \sum_{j=1}^k a_j t^j = \hat{y}, \quad (\text{T.19})$$

тобто поліноміальна МНКВ-модель коректно (з точки зору математики) описує залежність похибки ТП від часу та/або температури її експлуатації.

**Властивість 3.** Якщо виконуються передумови 1 ... 3, тоді оцінена дисперсійно-коваріаційна матриця для МНКВ-оцінок  $a_1, a_2, \dots, a_k$  має вид

$$\hat{\Sigma}_a = \hat{\sigma}^2 K, \quad (\text{T.20})$$

де  $\hat{\sigma}^2$  та  $k$  визначені рівностями (Т.18) та (Т.6) відповідно [255, 256].

Тому діагональні елементи дисперсійно-коваріаційної матриці  $\hat{\Sigma}_a$  є дисперсіями для МНКВ-оцінок  $a_1, a_2, \dots, a_k$ .

Таким чином, МНКВ повністю придатний для розширення обсягу результатів досліджень похибок ТП.

**Додаток У - Таблиці результатів інтерполяції експериментальних досліджень похибки термопар типу ХА**

		Т										Т
		експ										експ
		20										900
250 год.	0	100	0	300	400	500	600	700	800	900	900	
	0	0,6	1,5	2	2	52,6	7	68,4	65	3	900	
	100	0	0,6	3,6	5	39	5	70,6	4	8	800	
	200	0	0	1,5	6,8	24,2	2	62,9	71	3	700	
	300	0	0	0	3,2	11	3	51,1	4	69	600	
	400	0	0	0	0	5,4	1	36,9	1	7	500	
	500	0	0	0	0	0	7,8	22,5	2	7	400	
	600	0	0	0	0	0	0	11	4	51	300	
	700	0	0	0	0	0	0	0	7	6	200	
	800	0	0	0	0	0	0	0	0	1	100	
	900	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
											Тдіа	
змінаТдіап											п	
											Т	
500 год.	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	експ	
0	0	11,3	28,1	40,8	52,7	85,7	109,7	111,6	105,4	97,3	900	
100	0	0	11,6	21,8	30,5	63,8	95,3	114,6	115,7	101,8	800	
200	0	0	0	12,4	11,3	39,8	74	102,5	115,6	110,3	700	
300	0	0	0	0	7,1	18,2	49,8	83,5	107	112,8	600	
400	0	0	0	0	0	11,2	26,7	60,6	91,8	109,1	500	
500	0	0	0	0	0	0	14,6	37	71,7	99,4	400	
600	0	0	0	0	0	0	0	15,7	48,5	83,6	300	
700	0	0	0	0	0	0	0	0	24	61,8	200	
800	0	0	0	0	0	0	0	0	0	33,9	100	
900	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
змінаТдіап											Тдіап	



750												Т
год.	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	900	експ
0	0	20,6	52,1	68,1	93,5	116,7	126	129,5	121,1	119,9	119,9	900
100	0	0	22,2	47,6	85	99,2	110,4	132,1	132,9	128,9	128,9	800
200	0	0	0	25,8	61,5	74,4	86,4	118,9	133,9	131,4	131,4	700
300	0	0	0	0	25,1	46,8	58,5	97,4	124,8	127,1	127,1	600
400	0	0	0	0	0	21,7	31,7	71	107,1	116	116	500
500	0	0	0	0	0	0	22,4	43,6	82,7	97,9	97,9	400
600	0	0	0	0	0	0	0	26,1	54,2	72,6	72,6	300
700	0	0	0	0	0	0	0	0	28,3	40,1	40,1	200
800	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20,4	20,4	100
900	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
змінаТдіап												Тдіап
1000												Т
год.	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	900	експ
0	0	19,8	41,4	58,8	73,9	106,6	116,1	122,2	112,2	116,2	116,2	900
100	0	0	23,7	55,2	63,1	83,1	103,9	123,1	122,9	123,1	123,1	800
200	0	0	0	24,6	49,8	70,9	82,3	112,1	125,8	124,7	124,7	700
300	0	0	0	0	22,1	45,3	56,5	92,6	118,9	120,7	120,7	600
400	0	0	0	0	0	21,5	31,1	68,2	102	110,5	110,5	500
500	0	0	0	0	0	0	19,8	42,3	77	93,8	93,8	400
600	0	0	0	0	0	0	0	18,4	47,6	70,1	70,1	300
700	0	0	0	0	0	0	0	0	19,4	39	39	200
800	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18,9	18,9	100
900	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
змінаТдіап												Тдіап

1250											Т
год.	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	експ
0	0	30,7	54	77,1	95,2	110,4	122,5	127,8	135,1	135,9	900
100	0	0	26,2	68,7	86,4	101,1	113,5	131,4	128,7	139,3	800
200	0	0	0	30	66,3	79,8	92,7	123,1	137,1	139,2	700
300	0	0	0	0	31,9	52,8	65,5	103,9	133,8	134,8	600
400	0	0	0	0	0	26,4	37,3	78,1	114,7	124,3	500
500	0	0	0	0	0	0	22,8	49,6	82,2	107,1	400
600	0	0	0	0	0	0	0	22,3	42,9	81,3	300
700	0	0	0	0	0	0	0	0	21,7	46,2	200
800	0	0	0	0	0	0	0	0	0	22,3	100
900	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
змінаТдіап											Тдіап

1500											Т
год.	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	експ
0	0	35,9	63,1	90,2	111,4	129,1	143,3	149,5	158,1	159,00	900
100	0	0	30,7	80,3	101	118,2	132,8	153,7	150,5	163,04	800
200	0	0	0	35,1	77,5	93,3	108,4	144	160,4	162,86	700
300	0	0	0	0	37,3	61,7	76,6	121,6	156,5	157,77	600
400	0	0	0	0	0	30,8	43,7	91,4	134,2	145,49	500
500	0	0	0	0	0	0	26,6	58	96,1	125,31	400
600	0	0	0	0	0	0	0	26,1	50,1	95,12	300
700	0	0	0	0	0	0	0	0	25,4	54,05	200
800	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26,15	100
900	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
змінаТдіап											Тдіап

**Додаток Ф - Тестова вибірка для нейронної мережі моделі  
похибки ТП типу ХА**

100	600	1000	27,8	800	700	1250	85,8	100	300	500	6,6
100	700	1000	28	300	200	500	6	100	400	500	14,5
100	800	1000	21,5	300	300	500	21,8	100	500	500	22,2
100	900	1000	7,4	300	400	500	40,8	100	600	500	27,9
200	200	250	1,5	300	500	500	58,9	100	700	500	29,8
200	300	250	8,4	300	600	500	72,1	100	800	500	26,2
200	400	250	17,1	300	700	500	76,3	100	900	500	15,2
200	500	250	25,7	300	800	500	67,6	100	300	1000	5,3
200	600	250	32,2	300	900	500	41,8	100	400	1000	16,1
200	700	250	34,8	300	200	750	7,4	100	500	1000	23,2
200	800	250	31,4	300	300	750	25,8	400	600	750	101,1
200	900	250	19,1	300	400	750	47,6	400	700	750	104,4
200	200	500	2,5	300	500	750	68,1	400	800	750	89,7
200	300	500	13,9	300	600	750	52,4	400	900	750	57,5
200	400	500	28,1	300	700	750	85,4	400	200	1000	13,7
200	500	500	41,8	300	800	750	72,8	400	300	1000	34,9
200	600	500	51,9	300	900	750	39,3	400	400	1000	58,7
200	700	500	55,3	300	200	1000	7,6	400	500	1000	79,7
200	800	500	48,8	300	300	1000	25,1	400	600	1000	92,8
200	900	500	29,3	300	400	1000	45,4	400	700	1000	92,6
200	200	750	3,2	300	500	1000	63,7	400	800	1000	73,9
200	300	750	16,5	300	600	1000	75,2	400	900	1000	31,4
200	400	750	32,8	300	700	1000	75,1	400	200	1250	11,6
200	500	750	48,2	300	800	1000	58,8	400	300	1250	27,3
200	600	750	59,1	300	900	1000	21,3	400	400	1250	44,2
200	700	750	61,7	300	200	1250	6,8	400	500	1250	57,6
200	800	750	52,1	300	300	1250	19,8	400	600	1250	63,5
200	900	750	30,5	300	400	1250	34,1	400	700	1250	57,5
200	200	1000	3,4	300	500	1250	45,8	400	800	1250	35,3
200	300	1000	16,1	300	600	1250	51,4	400	900	1250	-7,4
200	400	1000	31,2	300	700	1250	45,4	500	200	250	11
200	500	1000	45	300	800	1250	25,8	500	300	250	24,2
200	600	1000	53,8	300	900	1250	-12,3	500	400	250	39
200	700	1000	53,8	400	200	250	6,8	500	500	250	52,6
200	800	1000	41,4	400	300	250	18,5	500	600	250	62,4
200	900	1000	22,8	400	400	250	32,2	500	700	250	65,6
200	200	1250	3,3	400	500	250	45,2	500	800	250	59,6
200	300	1250	12,8	400	600	250	54,7	500	900	250	41,5
200	400	1250	23,4	400	700	250	56,1	500	200	500	18,2
200	500	1250	32,1	400	800	250	52,7	500	300	500	39,8
200	600	1250	36	400	900	250	35,8	500	400	500	63,8
200	700	1250	31,8	400	200	500	11,3	500	500	500	85,7
200	800	1250	16,6	400	300	500	30,5	500	600	500	101
200	900	1250	6,1	400	400	500	52,7	500	700	500	105,2
300	200	250	3,6	400	500	500	73,5	500	800	500	93,9
300	300	250	13,2	400	600	500	88,4	500	900	500	62,5

300	400	250	24,9	400	700	500	92,9	500	200	750	21,7
300	500	250	36,2	400	800	500	82,6	500	300	750	46,8
300	600	250	44,6	400	900	500	59	500	400	750	74,4
300	700	250	47,8	400	200	750	13,6	500	500	750	99,2
300	800	250	43,4	400	300	750	34,9	500	600	750	116,7
300	900	250	28,7	400	400	750	61,5	500	700	750	118,7
500	200	1250	17,6	400	500	750	85	500	800	750	103
500	300	1250	35,2	700	600	250	70,6	500	900	750	63
500	400	1250	53,2	700	700	250	68,4	500	200	1000	21,5
500	500	1250	67,4	700	800	250	65,7	500	300	1000	45,3
500	600	1250	73,6	700	900	250	49,4	500	400	1000	70,9
500	700	1250	67,6	700	200	500	37	500	500	1000	43,1
500	800	1250	45,4	700	300	500	60,6	500	600	1000	106,6
500	900	1250	2,5	700	400	500	83,5	500	700	1000	106,2
600	200	250	16,1	700	500	500	102,5	500	800	1000	86,8
600	300	250	30,3	700	600	500	114,6	500	900	1000	43
600	400	250	45,2	700	700	500	111,6	800	200	750	54,2
600	500	250	58,5	700	800	500	105,3	800	300	750	82,7
600	600	250	67,7	700	900	500	77,7	800	400	750	107,1
600	700	250	70,3	700	200	750	43,6	800	500	750	124,8
600	800	250	63,9	700	300	750	71	800	600	750	133,9
600	900	250	46,1	700	400	750	97,4	800	700	750	132,9
600	200	500	26,7	700	500	750	118,9	800	800	750	121,1
600	300	500	49,8	700	600	750	132,1	800	900	750	98,9
600	400	500	74	700	700	750	129,5	800	200	1000	47,6
600	500	500	95,3	700	800	750	118,7	800	300	1000	77
600	600	500	109,7	700	900	750	84,9	800	400	1000	102
600	700	500	113,1	700	200	1000	42,3	800	500	1000	118,9
600	800	500	101,5	700	300	1000	68,2	800	600	1000	125,8
600	900	500	70,9	700	400	1000	92,6	800	700	1000	122,9
600	200	750	31,7	700	500	1000	112,1	800	800	1000	112,2
600	300	750	58,5	700	600	1000	123,1	800	900	1000	97,6
600	400	750	86,4	700	700	1000	122,2	800	200	1250	28,6
600	500	750	110,4	700	800	1000	106	800	300	1250	54,8
600	600	750	126	700	900	1000	70,9	800	400	1250	76,5
600	700	750	128,3	700	200	1250	33,1	800	500	1250	89,2
600	800	750	112,7	700	300	1250	52,1	800	600	1250	91,4
600	900	750	74,3	700	400	1250	69,3	800	700	1250	85,8
600	200	1000	31,1	700	500	1250	82,1	800	800	1250	78,6
600	300	1000	56,5	700	600	1250	87,6	800	900	1250	79,3
600	400	1000	82,3	700	700	1250	89,6	900	200	250	37,6
600	500	1000	103,9	700	800	1250	67,1	900	300	250	51
600	600	1000	116,7	700	900	1250	35,8	900	400	250	60,7
600	700	1000	116,1	800	200	250	30,4	900	500	250	66,7
600	800	1000	97,5	800	300	250	44,2	900	600	250	69
600	900	1000	56,3	800	400	250	56,1	900	700	250	67,3
600	200	1250	24,9	800	500	250	65,4	900	800	250	61,8
600	300	1250	43,7	800	600	250	71	900	900	250	52,3
600	400	1250	61,8	800	700	250	71,4	900	200	500	61,8
600	500	1250	75,7	800	800	250	65	900	300	500	83,6
600	600	1250	81,7	800	900	250	50,1	900	400	500	99,4
600	700	1250	76,3	800	200	500	48,5	900	500	500	109,1

600	800	1250	55,9	800	300	500	71,7	900	600	500	112,8
600	900	1250	16,9	900	600	1250	92,8	900	200	750	72,6
700	200	250	22,5	900	700	1250	92,9	900	300	750	97,9
700	300	250	36,9	900	800	1250	90,6	900	400	750	116
700	400	250	51,1	900	900	1250	87,1	900	500	750	127,1
700	500	250	62,9	800	400	500	91,8	900	600	750	131,4
900	600	1000	124,7	800	500	500	107	900	700	750	128,9
900	700	1000	123,1	800	600	500	115,6	900	800	750	119,9
900	800	1000	116,2	800	700	500	115,7	900	900	750	104,5
900	900	1000	104,5	800	800	500	105,4	900	200	1000	70,1
900	200	1250	54,2	800	900	500	83	900	300	1000	93,8
900	300	1250	71,4	900	700	500	110,3	900	400	1000	110,5
900	400	1250	82,9	900	800	500	101,8	900	500	1000	120,7
900	500	1250	89,9	900	900	500	57,1				

**Додаток X - Навчальна вибірка для нейронної мережі моделі  
похибки ТП типу ХА**

200	500	1000	45	300	600	1250	51,4	500	700	250	65,6
200	600	1000	53,8	300	700	1250	45,4	500	800	250	59,6
200	700	1000	53,8	300	800	1250	25,8	500	900	250	41,5
200	800	1000	41,4	300	900	1250	-12,3	500	200	500	18,2
200	900	1000	22,8	400	200	250	6,8	500	300	500	39,8
200	200	1250	3,3	400	300	250	18,5	500	400	500	63,8
200	300	1250	12,8	400	400	250	32,2	500	500	500	85,7
200	400	1250	23,4	400	500	250	45,2	500	600	500	101
200	500	1250	32,1	400	600	250	54,7	500	700	500	105,2
200	600	1250	36	400	700	250	56,1	500	800	500	93,9
200	700	1250	31,8	400	800	250	52,7	500	900	500	62,5
200	800	1250	16,6	400	900	250	35,8	500	200	750	21,7
200	900	1250	6,1	400	200	500	11,3	500	300	750	46,8
300	200	250	3,6	400	300	500	30,5	500	400	750	74,4
300	300	250	13,2	400	400	500	52,7	500	500	750	99,2
300	400	250	24,9	400	500	500	73,5	500	600	750	116,7
300	500	250	36,2	400	600	500	88,4	500	700	750	118,7
300	600	250	44,6	400	700	500	92,9	500	800	750	103
300	700	250	47,8	400	800	500	82,6	500	900	750	63
300	800	250	43,4	400	900	500	59	500	200	1000	21,5
300	900	250	28,7	400	200	750	13,6	500	300	1000	45,3
300	200	500	6	400	300	750	34,9	500	400	1000	70,9
300	300	500	21,8	400	400	750	61,5	500	500	1000	43,1
300	400	500	40,8	400	500	750	85	500	600	1000	106,6
300	500	500	58,9	400	600	750	101,1	500	700	1000	106,2
300	600	500	72,1	400	700	750	104,4	500	800	1000	86,8
300	700	500	76,3	400	800	750	89,7	500	900	1000	43
300	800	500	67,6	400	900	750	57,5	500	200	1250	17,6
300	900	500	41,8	400	200	1000	13,7	500	300	1250	35,2
300	200	750	7,4	400	300	1000	34,9	500	400	1250	53,2
300	300	750	25,8	400	400	1000	58,7	500	500	1250	67,4
300	400	750	47,6	400	500	1000	79,7	500	600	1250	73,6
300	500	750	68,1	400	600	1000	92,8	500	700	1250	67,6
300	600	750	52,4	400	700	1000	92,6	500	800	1250	45,4
300	700	750	85,4	400	800	1000	73,9	500	900	1250	2,5
300	800	750	72,8	400	900	1000	31,4	600	200	250	16,1
300	900	750	39,3	400	200	1250	11,6	600	300	250	30,3
300	200	1000	7,6	400	300	1250	27,3	600	400	250	45,2
300	300	1000	25,1	400	400	1250	44,2	600	500	250	58,5
300	400	1000	45,4	400	500	1250	57,6	600	600	250	67,7
300	500	1000	63,7	400	600	1250	63,5	600	700	250	70,3
300	600	1000	75,2	400	700	1250	57,5	600	800	250	63,9
300	700	1000	75,1	400	800	1250	35,3	600	900	250	46,1
300	800	1000	58,8	400	900	1250	-7,4	600	200	500	26,7
300	900	1000	21,3	500	200	250	11	600	300	500	49,8
300	200	1250	6,8	500	300	250	24,2	600	400	500	74
300	300	1250	19,8	500	400	250	39	600	500	500	95,3

300	400	1250	34,1	500	500	250	52,6	600	600	500	109,7
300	500	1250	45,8	700	900	750	84,9	800	300	1250	54,8
600	800	500	101,5	700	200	1000	42,3	800	400	1250	76,5
600	900	500	70,9	500	600	250	62,4	800	500	1250	89,2
600	200	750	31,7	700	400	1000	92,6	800	600	1250	91,4
600	300	750	58,5	700	500	1000	112,1	600	700	500	113,1
600	400	750	86,4	700	600	1000	123,1	800	800	1250	78,6
600	500	750	110,4	700	700	1000	122,2	800	900	1250	79,3
600	600	750	126	700	800	1000	106	900	200	250	37,6
600	700	750	128,3	700	900	1000	70,9	900	300	250	51
600	800	750	112,7	700	200	1250	33,1	900	400	250	60,7
600	900	750	74,3	700	300	1250	52,1	900	500	250	66,7
600	200	1000	31,1	700	400	1250	69,3	900	600	250	69
600	300	1000	56,5	700	500	1250	82,1	900	700	250	67,3
600	400	1000	82,3	700	600	1250	87,6	900	800	250	61,8
600	500	1000	103,9	700	700	1250	89,6	900	900	250	52,3
600	600	1000	116,7	700	800	1250	67,1	900	200	500	61,8
600	700	1000	116,1	700	900	1250	35,8	900	300	500	83,6
600	800	1000	97,5	800	200	250	30,4	900	400	500	99,4
600	900	1000	56,3	800	300	250	44,2	900	500	500	109,1
600	200	1250	24,9	800	400	250	56,1	900	600	500	112,8
600	300	1250	43,7	800	500	250	65,4	900	700	500	110,3
600	400	1250	61,8	800	600	250	71	900	800	500	101,8
600	500	1250	75,7	800	700	250	71,4	900	900	500	57,1
600	600	1250	81,7	800	800	250	65	900	200	750	72,6
600	700	1250	76,3	800	900	250	50,1	900	300	750	97,9
600	800	1250	55,9	800	200	500	48,5	900	400	750	116
600	900	1250	16,9	800	300	500	71,7	900	500	750	127,1
700	200	250	22,5	800	400	500	91,8	900	600	750	131,4
700	300	250	36,9	800	500	500	107	900	700	750	128,9
700	400	250	51,1	800	600	500	115,6	900	800	750	119,9
700	500	250	62,9	800	700	500	115,7	900	900	750	104,5
700	600	250	70,6	800	800	500	105,4	900	200	1000	70,1
700	700	250	68,4	800	900	500	83	900	300	1000	93,8
700	800	250	65,7	800	200	750	54,2	900	400	1000	110,5
700	900	250	49,4	800	300	750	82,7	900	500	1000	120,7
700	200	500	37	800	400	750	107,1	900	600	1000	124,7
700	300	500	60,6	800	500	750	124,8	900	700	1000	123,1
700	400	500	83,5	800	600	750	133,9	900	800	1000	116,2
700	500	500	102,5	800	700	750	132,9	900	900	1000	104,5
700	600	500	114,6	800	800	750	121,1	900	200	1250	54,2
700	700	500	111,6	800	900	750	98,9	900	300	1250	71,4
700	800	500	105,3	800	200	1000	47,6	900	400	1250	82,9
700	900	500	77,7	800	300	1000	77	900	500	1250	89,9
700	200	750	43,6	800	400	1000	102	900	600	1250	92,8
700	300	750	71	800	500	1000	118,9	900	700	1250	92,9
700	400	750	97,4	800	600	1000	125,8	900	800	1250	90,6
700	500	750	118,9	800	700	1000	122,9	900	900	1250	87,1
700	600	750	132,1	800	800	1000	112,2				
700	700	750	129,5	800	900	1000	97,6				
700	800	750	118,7	800	200	1250	28,6				

## Додаток Ц - Вагові коефіцієнти та зміщення навченої нейронної мережі

Номер нейрона	Схований шар				Коефіцієнти вихідного шару	Зміщення вихідного шару
	Час експлуатації	Температура експлуатації	Температура діапазону	Зміщення		
1	-0,60324	-1,09280	0,33624	17,90586	-0,38703	-0,19671
2	-0,27440	17,95124	-18,16886	20,02597	-0,11291	
3	0,69433	8,02458	1,68217	-86,63016	-0,08368	
4	2,71945	1,41505	-0,54597	-18,64476	-0,21589	
5	3,57071	-0,43275	0,68381	-26,30709	-0,27768	
6	0,09112	-0,65574	0,76772	1,12046	28,76005	
7	4,02649	3,17136	-0,60968	-33,15799	0,10032	
8	-0,15764	-1,80202	1,57262	3,65104	-0,45433	
9	-2,89394	2,45071	1,72749	-25,19032	-0,08413	
10	6,29323	1,67768	-0,80114	-40,03885	0,35668	
11	-0,14811	2,26220	-1,30646	9,87432	0,39145	
12	-0,23842	-1,20295	1,25965	2,13502	0,37041	
13	0,19672	-0,30155	0,36092	0,49930	2,22588	
14	-0,50165	0,54299	-0,60349	1,91524	0,61186	
15	0,08079	-0,64115	0,75321	1,14856	-30,27767	



### Додаток Ч - Вимірювання та корекція температури вільних кінців термопар

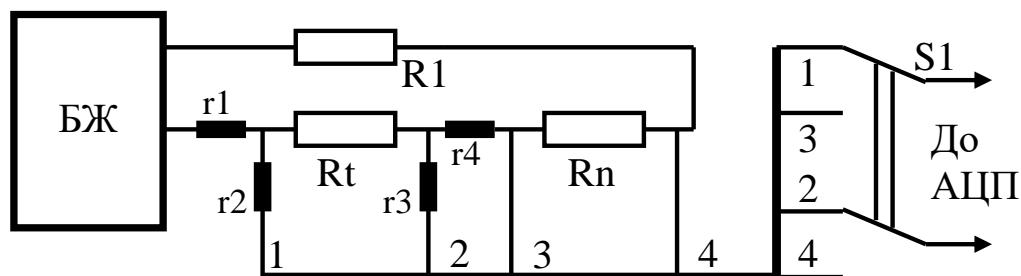
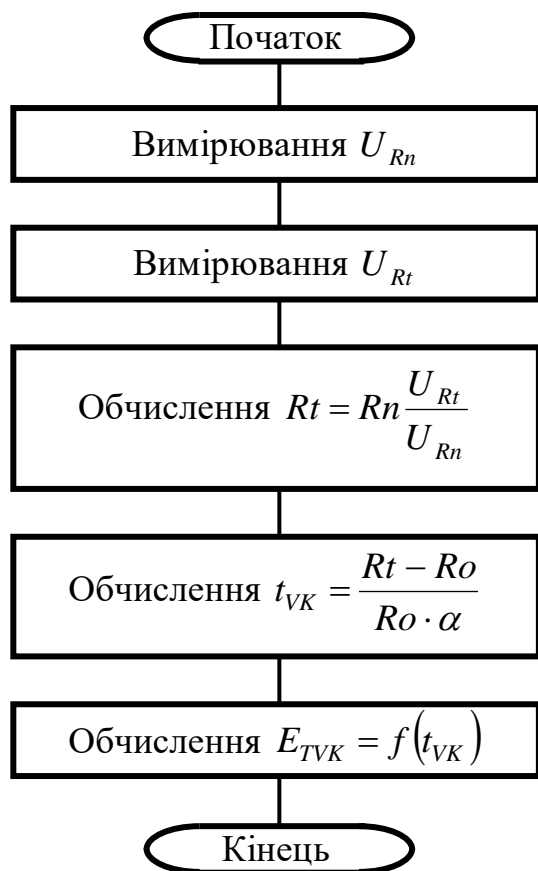


Рис. Ж.1. Потенціометрична схема вимірювання температури вільних кінців

$$I = \frac{U_{Rt}}{Rt} = \frac{U_{Rn}}{Rn} \quad \rightarrow \quad Rt = Rn \frac{U_{Rt}}{U_{Rn}} \quad \rightarrow \quad \delta_{Rt} = \delta_{Rn} + \delta_{URt} - \delta_{URn}$$

$$\text{if } U_{Rt} \approx U_{Rn} \text{ then } \delta_{URt} - \delta_{URn} \rightarrow 0 \quad \rightarrow \quad \delta_{Rt} \rightarrow \delta_{Rn} + \delta_{\Delta ADC}^{NONLIN}$$

$$\delta_{\Delta ADC}^{NONLIN} \leq 0,0015\% \quad \rightarrow \quad \delta_{Rt} \rightarrow \delta_{Rn}$$



## Додаток Ш - Акт впровадження з Люблінської політехніки



# Politechnika Lubelska

## Wydział Mechaniczny

### Katedra Automatyzacji

ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin, Poland

tel/fax: (+48 81) 53 81 267, 53 81 267 email:automat@lctt.pol.lublin.pl

Lublin 21.12.2018

#### Certificate of implementation of the results of the dissertation by Kochan Orest

This certificate is issued to Kochan Orest to confirm the fact that Lublin University of Technology uses the results of his dissertation work within the frame of the course "Fundamentals of automation". The course is for the students of the third year of training. There are two points from the dissertation used as course works within the frame of the course.

The first coursework entitled "The application of neural networks in production automation" that uses the method of temperature field control based on the neural network, is included into the list of the course works as an example of usage of artificial intelligence in science and industry. In many industrial applications, it is important to maintain accurately a stable temperature distribution in a furnace under changeable conditions. The method proposed by Mr. Kochan is a rather simple and effective solution to do this. It illustrates all the stages of use of neural networks including training, testing, and application on an object of control. It can also be used as a typical method in many applications.

The second coursework entitled "Modern trends in sensors" introduces a system for measuring temperature based on the thermocouple with controlled profile of temperature field developed and researched by Mr. Kochan. This coursework is an example of measures directed against the degradation of sensors in harsh operating conditions. Usually, errors of sensors dominate in measurement systems. In addition, all sensors are prone to degradation which inflate their error even more. This coursework illustrates the principles of methods of error compensation and correction.

KIEROWNIK KATEDRY AUTOMATYZACJI

*G. Litak*

prof. dr hab. Grzegorz Litak

*Krzysztof Przystupa*  
Krzysztof Przystupa, Ph.D. Eng.



Politechnika Lubelska  
Wydział Mechaniczny  
**Katedra  
Automatyzacji**  
ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin  
tel./fax: 81 338 42 67, wm.ka@polub.pl

**Додаток Щ - Акт впровадження компанії TPV Display Technology**

Certificate  
about the use of the results of the thesis by Kochan Orest

With this, we certify that TPV technology company uses the results of the thesis by Kochan Orest in manufacturing electronic devices on printed circuit boards.

The company TPV technology company manufactures diverse electronic devices for various purposes. They use integrated circuits and other elements of surface-mounting assembly. This ensures high installation density and small device size. However, the high installation density requires a quite accurate maintenance of a complex algorithm for controlling the temperature field within the furnace, where the soldering of the elements of the circuit is carried out. At the same time, it is important not only to accurately maintain the temperature in the furnace, it is also necessary to keep the temperature field in the furnace stable during technological pauses (when the printed circuit boards are kept at given temperatures).

The existing soldering temperature control system ensures the required accuracy only under a small load of the furnace. When increasing the load and using complex algorithms for controlling the temperature in the furnace, deviations of the temperature field from the required one increase. As a result, biases in positions of the circuit components appear. Sometimes, such biased components are not properly soldered due to improper temperature.

The use of the neural network method for controlling the temperature of a complex object proposed by Kochan Orest in his thesis will allow getting rid of exceeding the furnace temperature beyond the permissible limits.

Deputy Manager *Candy Lin*

TPV Display Technology (Wuhan) Co., Ltd



## Додаток Ю - Акт впровадження з СКБ МП



"Затверджую"

Директор ПрАТ СКБ

мікроелектроніки у приладобудуванні

Матвіїв Ф. О.

2019 р.

### ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ КОЧАНА ОРЕСТА ВОЛОДИМИРОВИЧА

Ми, комісія у складі заступника директора з наукової роботи Крилошанського Є. І. та Головного конструктора Матвіїва В. І., засвідчуємо, що результати досліджень, викладених у докторській дисертації Кочана Ореста Володимировича "РОЗВИТОК ТЕОРІЇ ТА МЕТОДІВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ", зокрема:

1. Бездемонтажний метод визначення похибки термодар, що входять у склад термоелектричного перетворювача з керованим профілем температурного поля, у процесі експлуатації без використання еталонних засобів;
2. Термоелектричний перетворювач із самодіагностуванням стану електродів його термодари у процесі експлуатації, без використання еталонних засобів;
3. Двоконтурна система вимірювання температури за допомогою термоелектричних перетворювачів з керованим профілем температурного поля;

є перспективними до використання у засобах вимірювання температури.

Перелічені технічні рішення мають ряд переваг порівняно із відомими методами визначення похибки термодар та діагностування стану їх електродів. Зокрема, їх перевагами є:

1. можливість бездемонтажного визначення похибки термодар і діагностування стану їх електродів у процесі експлуатації, без переривання функціонування технологічного об'єкту, температура якого вимірюється;
2. відсутність необхідності використання у робочих умовах еталонних засобів.

Ці технічні рішення будуть використані при модернізації серійних вимірювальних перетворювачів типу ЕП4700, а також у нових розробках ПрАТ СКБ мікроелектроніки у приладобудуванні.

Заступник директора ПрАТ СКБ  
мікроелектроніки у приладобудуванні,  
к.т.н.



Крилошанський Є.І.

Головний конструктор ПрАТ СКБ  
мікроелектроніки у приладобудуванні,  
к.т.н.

Матвіїв В.І.

## Додаток Я - Акт впровадження у навчальний процес



### АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи в навчальний процес

*Кочана Ореста Володимировича*

**"Методи і засоби підвищення точності вимірювання температури термоелектричними перетворювачами з неоднорідними термопарами",**

представленої на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.11.04 – *прилади та методи вимірювання теплових величин*

Комісія НУ «Львівська політехніка» у складі:

Голова комісії – голова науково-методичної ради інституту комп'ютерних технологій, автоматики та метрології, д.т.н., проф. Байцар Р. І.

Члени комісії: професор кафедри «Інформаційно-вимірювальних технологій», д.т.н., проф. Скоропад П. І., професор кафедри «Інформаційно-вимірювальних технологій», д.т.н., доц. Мотало В. П., професор кафедри «Інформаційно-вимірювальних технологій», д.т.н., проф. Яцишин С. П.

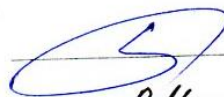
даним актом підтверджує, що проведені докторантом наукові дослідження виконувалися ним на кафедрі інформаційно-вимірювальних технологій Національного університету «Львівська політехніка». Основні положення та результати дисертаційної роботи впроваджені у навчальний процес кафедри «Інформаційно-вимірювальних технологій» Національного університету «Львівська політехніка» при вивченні дисциплін:

- "Тестування Middleware смарт-приладів" для підготовки фахівців за спеціальністю 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка» спеціалізація 0701 «Інформаційно-вимірювальні технології у робототехніці».

Голова комісії,  
голова науково-методичної ради ІКТА  
д.т.н., проф.

 Байцар Р. І.

Члени комісії:  
проф. каф. ІВТ, д.т.н., проф.

 Скоропад П. І.

доц. каф. ІВТ, д.т.н., доц.

 Мотало В. П.

проф. каф. ІВТ, д.т.н., проф.

 Яцишин С. П.

## Додаток АА - СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Кочан, О., Сапожник, Г., Паучок, В., & Майків, І. (2012). Удосконалення метрологічного програмного тесту вимірювального каналу температури. *Вісник Тернопільського національного технічного університету*, 68(№4), 175-185.
2. Васильків, Н., Кочан, В., Кочан, О., Чирка, М. (2012). Дослідження впливу нерівномірності дрейфу термопар на похибку корекції їх неоднорідності. *Вісник Хмельницького національного університету*, 4, 142–149.
3. Кочан, О., Биковий, П., Чирка, М., Кочан, В. (2012). Дослідження впливу швидкості дрейфу термопар на похибку корекції їх неоднорідності. *Науковий вісник Чернівецького університету. Комп'ютерні системи та компоненти*, 3(1), 54-61.
4. Єрмоменко, В. & Кочан О. (2013). Проблеми використання методу найменших квадратів при дослідженні дрейфу термопар. *Метрологія та прилади*, 2, 98–105.
5. Кочан, О. (2013). Оцінка максимальної потужності нагрівачів термоелектричних перетворювачів з керованим профілем температурного поля. *Вимірювальна техніка та метрологія*, 74, 29-33.
6. Кочан, О. (2013). Піч з керованим профілем температурного поля для компенсації похибки неоднорідності термопар. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, 27–32.
7. Кочан, О. В. (2012). Нейромережевий метод керування для термоелектричного перетворювача з керованим профілем температурного поля. *Адаптивні системи автоматичного управління*, 2(21), 35-45.
8. Кочан В., Яскілка, В. & Кочан, О. (2013). Подавлення завад загального виду у вимірювальних каналах. *Вісник Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя*, 2, 190–196.

9. Кочан, О. В. (2013). Метод умовних найменших квадратів для побудови моделі похибки термопар. *Системи обробки інформації*, 6, 90-95.
10. Кочан, О.В. (2013). Оцінка тривалості самоперевірки термоелектричного перетворювача з керованим профілем температурного поля. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. Серія приладобудування, 46, 70-80.
11. Shu, C., & Kochan, O. (2013). Method of thermocouples self verification on operation place. *Sensors & Transducers*, 160(12), 55-61. (**Scopus, Web of Science**).
12. Chen, Z., Kochan, O., Jun, S., & Demkiv, T. (2013). Decreasing of Thermocouple Inhomogeneity Impact on Temperature Measurement Error. *Sensors & Transducers*, 160(12), 509-513. (**Scopus**).
13. Jun, S., & Kochan, O. (2014). Investigations of thermocouple drift irregularity impact on error of their inhomogeneity correction. *Measurement Science Review*, 14(1), 29-34. (**Scopus, Web of Science**).
14. Кочан, О., Васильків, Н., Кочан, В., & Рошупкін, О. (2013). Дослідження невиключеної похибки неоднорідності термоелектричного перетворювача з керованим профілем температурного поля. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, 3, 26-32.
15. Єрмоєнко, В. О., & Кочан, О. В. (2013). Застосування регресійного аналізу для побудови моделі дрейфу функції перетворення термопар. *Математичне та комп'ютерне моделювання. Сер.: Технічні науки*, 8, 50-61.
16. Єрмоєнко, В., & Кочан, О. (2014). Метод умовних найменших квадратів дослідження поліноміальних регресійних моделей без вільного члена. *Вісник Тернопільського національного технічного університету*, 2(74), 244-259.
17. Кочан, О. В. (2014). Бездемонтажний метод тестування стану електродів термоелектричних перетворювачів. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, 4, 96-101.
18. Кочан, О. (2014). Метод визначення похибки термоелектричних



перетворювачів на місці експлуатації. *Вимірвальна техніка та метрологія*, 75, 32–39.

19. Су, Ц., Кочан, Р.В. & Кочан, О.В. (2014). Нелінійність аналого-цифрового перетворювача на базі сигма-дельта модулятора другого порядку. *Технічна електродинаміка*, 4, 99–101.

20. Су, Ц., & Кочан, О. (2014). Механизм возникновения приобретенной термоэлектрической неоднородности термопар и его влияние на результат измерения температуры. *Измерительная техника*, (10), 38-41.

21. Су, Ц. & Кочан, О. (2014). Подавление помех общего вида в измерительных каналах. *Приборы и техника эксперимента*, 1, 87–90.

22. Jun, S., & Kochan, O. (2015). The mechanism of the occurrence of acquired thermoelectric inhomogeneity of thermocouples and its effect on the result of temperature measurement. *Measurement Techniques*, 57(10), 1160-1166. (**Scopus, Web of Science**).

23. Jun, S., & Kochan, O. (2015). Common mode noise rejection in measuring channels. *Instruments and Experimental Techniques*, 58(1), 86-89. (**Scopus, Web of Science**).

24. Кочан, Р., Кочан, О., Клим, Г. & Гоц, Н. (2014). Комбінований метод корекції нелінійності АЦП. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка» Автоматика, вимірювання та керування*, 802, 50-54.

25. Єрмоменко, В. & Кочан О. (2014). Дослідження класичних поліноміальних регресійних моделей без вільного члена. частина I. побудова емпірично ефективних оцінок параметрів регресійних моделей. *Вимірвальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, 4, 13–23.

26. Су, Ц., Кочан, О., & Йоцов, В. (2015). Методы снижения влияния приобретенной термоэлектрической неоднородности термопар на погрешность измерения температуры. *Измерительная техника*, 3, 52-55.

27. Kochan, O. (2015). The Study of Classical Polynomial Regression Models Without a Constant Term. Building Empirically Effective Estimates of the Parameters of Regression Models. *Sensors & Transducers*, 187(4), 82.

28. Jun, S., Kochan, O. V., & Jotsov, V. S. (2015). Methods of Reducing the Effect of the Acquired Thermoelectric Inhomogeneity of Thermocouples on Temperature Measurement Error. *Measurement Techniques*, 58(3), 327-331. **(Scopus, Web of Science)**.
29. Су, Ц., Кочан, О., Васильків, Н., & Кочан, Р. (2015). Метод корекції погрешности измерений температуры из-за приобретенной неоднородности электродов термопар. *Измерительная техника*, 8, 49-53.
30. Hu, Z., Kochan, R., Kochan, O., Su, J. & Klym, H. (2015). Method of Integral Nonlinearity Testing and Correction of Multi-Range ADC by Direct Measurement of Output Voltages of Multi-Resistors Divider. *AKTA IMEKO*, 4(2), 80-84. **(Scopus)**.
31. Jun, S., Kochan, O. V., Vasylykiv, N. M., & Kochan, R. V. (2015). A method of correcting the error of temperature measurements due to acquired inhomogeneity of the electrodes of thermocouples. *Measurement techniques*, 58(8), 904-910. **(Scopus, Web of Science)**.
32. Su, J., Kochan, O., Wang, C. & Kochan, R. (2015). Theoretical and Experimental Research of Error of Method of Thermocouple with Controlled Profile of Temperature Field. *Measurement science review*, 15(6), 304-312. **(Scopus, Web of Science)**.
33. Jun, S., Kochan, O., Kochan, V., & Wang, C. (2016). Development and investigation of the method for compensating thermoelectric inhomogeneity error. *International Journal of Thermophysics*, 37(1), 10. **(Scopus, Web of Science)**.
34. Jun, S., Kochan, O., & Kochan, R. (2016). Thermocouples with built-in self-testing. *International Journal of Thermophysics*, 37(4), 37. **(Scopus, Web of Science)**.
35. Sun, H., Kochan, R., Kochan, O. & Su, J. (2016). Integral nonlinearity of second-order single-bit sigma-delta modulator. *Технічна електродинаміка*, 6, 63-68. **(Scopus)**.
36. Mykyuchuk, M., Kochan, R., Kochan, O., Jun, S., Stadnyk, B., &

Stolyarchuk, P. (2016). Increasing metrological autonomy of in-plant measuring systems. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 10(32), 193-197. **(Web of Science)**.

37. Кочан, О. (2016). Корекція похибок дрейфу та набутої неоднорідності у термоелектричному перетворювачі з керованим профілем температурного поля. *Вимірювальна техніка та метрологія*, 77, 99-108.

38. Liu, Z., Song, W., Kochan, O., Mykyichuk, M., & Jun, S. (2017). Theoretical Study of the Conditions of Maximum Manifestation of the Error Due to Inhomogeneity of Thermocouple Legs. *International Journal of Thermophysics*, 38(6), 88. **(Scopus, Web of Science)**.

39. Wang, J., Kochan, O., Przystupa, K., & Su, J. (2019). Information-measuring System to Study the Thermocouple with Controlled Temperature Field. *Measurement Science Review*, 19(4), 161-169. **(Scopus, Web of Science)**.

40. Кочан О. (2017). Теоретичні основи оцінки стану електродів термопар у процесі експлуатації. *Сенсорна електроніка і мікросистемні технології*, 14(3), 79-90.

41. Kochan, O., Su, J., & Kochan, R. (2017). Designing an accurate system for temperature measurements. In *E3S Web of Conferences*, 19(03023), 1-6. **(Scopus, Web of Science)**.

42. Chen, J., Su, J., Kochan, O., & Levkiv, M. (2018). Metrological Software Test for Simulating the Method of Determining the Thermocouple Error in Situ During Operation. *Measurement Science Review*, 18(2), 52-58. **(Scopus, Web of Science)**.

43. Jotsov, V., Kochan, O. & Su, J. (2018). Decreasing Influence of the Error Due to Acquired Inhomogeneity of Sensors by the Means of Artificial Intelligence. In: *Sgurev V., Jotsov V., Kacprzyk J. (eds) Practical Issues of Intelligent Innovations. Studies in Systems, Decision and Control*, (Vol. 140, pp. 89-130). Springer. **(Scopus)**.

**Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:**

44. Kochan, R., Kochan, O., Sapojnyk, G. & Chyrka, M. (2011). Investigation of Histogram Method Implementation for High Resolution ADC Testing. In: *Proceedings of the International Conference IDAACS 2011* (pp. 43–49). Praha, Czech Republic. **(Scopus)**.
45. Кочан, О., Васильків, Н., Кочан, В. & Рошупкін, О. (2012). Дослідження невиключеної похибки неоднорідності термоелектричного перетворювача з керованим профілем температурного поля. У *Збірник праць Міжнародної науково-технічної конференції "Температура"* (сс. 150-152). Львів.
46. Єрмоєнко, В., Кочан, О. (2013). Метод умовних найменших квадратів для побудови моделі похибки термопар. В *Збірник праць III Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів „Сучасні комп'ютерні інформаційні технології”* (сс. 29-30). Тернопіль.
47. Єрмоєнко, В., Кочан, О. (2013). Побудова моделі дрейфу функції перетворення термопар за допомогою регресійного аналізу. В *Збірник праць III Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів „Сучасні комп'ютерні інформаційні технології”* (сс. 31-32). Тернопіль.
48. Мачужак, В., Кочан В., Кочан О. (2013). Метод керування профілем температурного поля. В *Збірник праць III Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів „Сучасні комп'ютерні інформаційні технології”* (сс. 103-104). Тернопіль.
49. Kochan, O., Sapojnyk, H., & Kochan, R. (2013). Temperature field control method based on neural network. In *Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS), 2013 IEEE 7th International Conference* (Vol. 1, pp. 21-24). Berlin. **(Scopus)**.
50. Kochan, R., Kochan, O., Chyrka, M., Su, J. & Bykovyy, P. (2013). Approaches of Voltage Divider Development for Metrology Verification of ADC. In: *Proceedings of the 2013 IEEE 7 International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems IDAACS'2013* (pp. 70-76). Berlin, Germany. **(Scopus)**.

51. Yeromenko, V., & Kochan, O. (2013). The conditional least squares method for thermocouples error modeling. In *Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS), 2013 IEEE 7th International Conference* (Vol. 1, pp. 157-162). Berlin, Germany. (Scopus).
52. Кочан, О. (2013). Модель похибки термометричних перетворювачів на базі методу умовних найменших квадратів. В *Збірник праць Міжнародної науково-технічної конференції «Системи 2013. Термографія і термометрія, метрологічне забезпечення вимірювань та випробувань»* (сс. 149). Львів.
53. Кочан, О. (2013). Метод самодіагностики термоелектричних перетворювачів на місці їх експлуатації. В *Збірник праць Міжнародної науково-технічної конференції «Системи 2013. Термографія і термометрія, метрологічне забезпечення вимірювань та випробувань»* (сс. 199). Львів.
54. Єрмоменко, В. & Кочан, О. (2014). Метод умовних найменших квадратів для побудови моделі похибки термопар. В *Abstracts of conf. reports Dynamical system modeling and stability investigation: XVI International Conference: Modeling and Stability* (pp. 192). Kiev.
55. Chen, Z., Kochan, R., Kochan, O. & Yaremchuk, I. (2014). Investigation of Integral Nonlinearity of Third Order Sigma-Delta Modulator. In: *Proceedings of the International Conference TCSET'2014* (pp. 129-130). Lviv-Slavske.
56. Lei, M., Kochan, O., Kochan, R., Sapojnyk, H. (2014). Neural Network Method for Temperature Field Control. In *Proceedings of the International Conference TCSET'2014*, (pp. 232). Lviv-Slavske.
57. Lin, Q., Kochan, R., Kochan, O. & Klym, H. (2014). Approach of Testing Signals Generation for ADC Metrology Verification. In: *Proceedings of the International Conference TCSET'2014*, (pp. 247-248). Lviv-Slavske.
58. Єрмоменко, В.О. & Кочан, О.В. (2014). Побудова емпірично ефективних оцінок параметрів класичної поліноміальної регресії моделі без вільного члена. У: *матеріали П'ятнадцятої міжнародної наукової конференції ім. акад. Михайла Кравчука. Т. 3. Теорія ймовірностей та математична статистика* (сс. 57-58). Київ.

59. Єршоменко, В.О. & Кочан, О.В. (2014). Емпірично ефективні оцінки параметрів класичної поліноміальної регресійної моделі без вільного члена. У: *Матеріали IV Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів Сучасні комп'ютерні інформаційні технології АСІТ'2014* (сс. 22-24). Тернопіль.
60. Кочан, Р.В., Кочан, О.В., Клим, Г.І. & Гоц, Н.Є. (2014). Нелінійність АЦП на базі сигма-дельта модулятора третього порядку. У: *Збірнику матеріалів міжнародної наукової координаційної наради "Інформаційні проблеми комп'ютерних систем, юриспруденції, енергетики, економіки, моделювання та управління" ICSM-2014* (сс. 97-101). Тернопіль.
61. Су, Ц., Кочан, Р.В. & Кочан, О.В. (2014). Нелінійність аналого-цифрового перетворювача на базі сигма-дельта модулятора другого порядку. У: *збірнику XIII Міжнародної науково-технічної конференції "Проблеми сучасної електротехніки-2014"* (сс. 101). Київ.
62. Ma, N., Kochan, O., Su, J., Kochan, V. (2014). Decreasing of thermocouple inhomogeneity impact on temperature measurement error. In *Proceedings of the 13th IMEKO TC10 Workshop on Technical Diagnostics Advanced measurement tools in technical diagnostics for systems' reliability and safety* (pp. 105-110). Warsaw. (**Scopus**).
63. Hu, Z., Kochan, R., Kochan, O., Su, J. & Klym, H. (2014). Method of Integral Nonlinearity Testing and Correction of Multi-Range ADC by Direct Measurement of Output Voltages of Multi-Resistors Divider. In: *Proceedings of the 13<sup>th</sup> IMEKO TC10 Workshop on Technical Diagnostics Advanced measurement tools in technical diagnostics for systems' reliability and safety* (pp. 76-80). Warsaw. (**Scopus**).
64. Su, J., Kochan, O. & Kochan, R. (2015). Evaluation of error of method of thermocouple with controlled profile of temperature filed. In: *Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Conference Measurement 2015* (pp. 301-304). Smolenice, Slovakia.
65. Hu, Z., Kochan, R., Kochan, O., Klym, H. & Su J. (2015). Integral nonlinearity correction of multi-range adc by iterative applying of multi-resistors

divider. In: *Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Conference Measurement 2015* (pp. 29-32). Smolenice, Slovakia.

66. Li, J., Kochan, R., Kochan, O. & Klym, H. (2015). Integral Nonlinearity Correction of ADC Using Multi-Resistors Voltage Divider. In: *Proceedings of the 2015 IEEE 8 International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems IDAACS'2015* (pp. 767-772). Warsaw, Poland. **(Scopus, Web of Science).**

67. Shu, C., Kochan, O., Kochan, V., & Vasylykiv, N. (2015). The method of self-testing of thermocouples in situ. In *Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS), 2015 IEEE 8th International Conference* (Vol. 2, pp. 773-778). Warsaw, Poland. **(Scopus, Web of Science).**

68. Кочан, О.В. & Микийчук, М.М. (2016). Застосування нейронних мереж для зменшення похибок вимірювання температури термоелектричними перетворювачами. У: *Матеріали XVI міжнародної науково-технічної конференції «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах БОТТІ-2016»* (сс. 16-18). Одеса (Затока).

69. Hu, Z., Su, J., Jotsov, V., Kochan, O., Mykyichuk, M., Kochan, R & Sasiuk, T. Data Science Applications to Improve Accuracy of Thermocouples. In: *Proceedings 2016 IEEE 8th International Conference on Intelligent Systems* (pp. 180-188). Sofia, Bulgaria. **(Scopus, Web of Science).**

70. Kochan, R, Ganczarczyk, T., Kochan, O. & Klym, H. (2016). Integral Nonlinearity of Third Order Single Bit Sigma-Delta Modulator. In: *Proceedings of 16th International Conference on Control, Automation and Systems ICCAS 2016* (pp. 1591 – 1593). Gyeongju, South Korea. **(Scopus).**

71. Jun, S., Kochan, O., & Levkiv, M. (2017). Metrological software test for studying the method of thermocouple error determination during operation. In *Measurement, 2017 11th International Conference* (pp. 171-174). Smolenice, Slovakia. **(Scopus).**

72. Kochan, O., Su, J., Kochan, R. (2017). Designing an accurate system for

temperature measurements. In *Book of abstracts of the International conference Energy, Environment and Material systems (EEMS)* (pp. 103-104). Polanica Zdroj.

73. Kochan, O., Kochan, R., Kochan, V., & Su, J. (2017, September). Thermocouple with adjustable error. In *Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS), 2017 9th IEEE International Conference* (Vol. 2, pp. 684-689). Bucharest, Romania. (**Scopus, Web of Science**).

74. Кочан О., Гусіна Є., Стадник А. & Рудник П. Розроблення теоретичних основ оцінки стану електродів термопар у процесі експлуатації. У *Актуальні проблеми автоматики та приладобудування: матеріали міжнародної науково-технічної конференції* (сс. 167-168.).

75. Кочан О., Гусіна Є., Стадник А. & Рудник П. Метрологічний програмний тест дослідження методу визначення похибки термоелектричних перетворювачів у процесі експлуатації. *Актуальні проблеми автоматики та приладобудування: матеріали міжнародної науково-технічної конференції* (сс. 169-170.).

#### **Публікації, які додатково відображають наукові результати дисертації**

76. Кочан, О. & Кочан, Р. *Спосіб корекції похибки головної термопари. Пат. Україна 102981. G01K7/02.*

77. Кочан, О., Кочан, Р. & Кочан, В. *Піч з керованим профілем температурного поля Пат. Україна 105700. G01K 7/02.*

78. Кочан, О., Кочан, Р. & Кочан В. *Пристрій для вимірювання температури в електронпечах опору. Пат. України 104099. G01K7/01.*

79. Кочан, О. *Спосіб самодіагностики термопар на місці експлуатації та пристрій для його реалізації. Пат. Україна 104952. G01K13/00.*

80. Кочан, О. & Кочан, Р. *Термоелектричний перетворювач із можливістю імітації заданої похибки. Пат. України 115846.*

81. Кочан, О. & Кочан, Р. *Термоелектричний перетворювач із можливістю імітації заданої похибки. Пат. України 115931.*



82. Кочан, О. & Кочан, Р. Система вимірювання та регулювання температури. Пат. України 115927.

83. Кочан, О., Кочан, Р. & Кочан В. Спосіб керування профілем температурного поля багатозонного об'єкта та пристрій для його реалізації. Пат. Україна 105541. G01K13/00.