computing@computingonline.net
www.computingonline.net

ISSN 1727-6209
International Journal of Computing

ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТРОЛОГІЧНОГО ПРОГРАМНОГО ТЕСТУ В КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМАХ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ

Надія Васильків

Тернопільський національний економічний університет,
площа Перемоги, 3, Тернопіль, 46020 Україна
e-mail: Nadiya.Vasylkiv@gmail.com

Резюме: *У даній статті вдосконалено метрологічний програмний тест імітації процесу наростання набутої в процесі експлуатації термоелектричної неоднорідності електродів термопар для створення можливості метрологічного дослідження вимірювального каналу температури та корекції похибки від неоднорідності.*

Ключові слова: *метрологічний тест, термопара, термоелектрична неоднорідність, вимірювальний канал, корекція похибки.*

Вступ

Вимірювальні канали комп'ютерних вимірювально-керуючих систем постійно ускладнюються, зокрема, за рахунок реалізації функцій їх інтелектуалізації підсистемами корекції різного роду похибок [1, 2]. В результаті процес визначення метрологічних характеристик таких систем також ускладнюється за рахунок різкого зростання об'єму необхідних досліджень та часу їх проведення. Для вирішення цієї проблеми використовують імітаційне та напівнатурне моделювання [3,4]. У [5] запропоновано для прискорення метрологічних досліджень створення спеціалізованого програмного засобу – метрологічного програмного тесту (МПТ), який дозволяє імітувати різні значення окремих складових похибки вимірювального каналу, співвідношення між ними, дію впливаючих величин, часовий і температурний дрейф. При цьому для забезпечення можливості ефективних досліджень структура МПТ повинна відповідати структурі досліджуваного вимірювального каналу, а набір імітаційних моделей похибок – дійсним похибкам його компонентів.

Тому, на думку автора, для дослідження похибок комп'ютерних систем вимірювання температури, куди входять термопари із значною, набутою в процесі експлуатації, термоелектричною неоднорідністю електродів, необхідно в склад МПТ включити відповідну імітаційну модель. Особливо це потрібно для дослідження метрологічних характеристик вимірювальних каналів з корекцією впливу набутої термоелектричної неоднорідності електродів термопар на результат вимірювання [6].

Таким чином, метою статті є вдосконалення МПТ, описаного в [5], шляхом імітації процесу наростання набутої термоелектричної неоднорідності електродів термопар для створення можливості дослідження вимірювального каналу температури та корекції похибки від неоднорідності.

1. СТРУКТУРА МПТ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ З ТЕРМОПАРАМИ

Розглянемо структуру МПТ вимірювального каналу з термопарою, де оптимальною визнана адитивна модель дії похибок на компоненти вимірювального каналу [5].

У верхній частині рис. 1 представлена структура самого вимірювального каналу і цифро-аналогові перетворювачі, які можуть безпосередньо взаємодіяти з компонентами вимірювального каналу. Структура найважливішої частини МПТ – програми формування наборів тестових сигналів (кодів) – займає нижню частину рис. 1. Кожен блок МПТ імітує лише одну властивість одного компонента вимірювального каналу. Блоки згруповані за компонентами (під кожним компонентом вимірювального каналу з верхньої частини рис. 1 розміщено "його" блоки МПТ) та за імітованими властивостями компонентів. Верхній ряд

займають блоки імітації основної похибки, розбиті на складові відповідно до компонента, нижче ідуть додаткові похибки (температурні і часові), потім похибки від додаткових параметрів. Якщо деяка похибка має окремі складові, вони розміщені нижче неї. Найнижчий ряд – блоки відтворення номінальних ХП компонентів, де враховано розбиття термопари на три компоненти (робочий кінець, термоелектроди, вільні кінці), а також рівність одиниці номінальної ХП комутатора.

Як видно з рис. 1, в МПТ передбачено імітування термоелектричної неоднорідності електродів термопар (блок Heterog. в другій колонці ряду додаткових похибок), однак у [5] не розроблена модель його реалізації і навіть відсутні рекомендації щодо його використання. Створення такої моделі ускладнюється залежністю похибки неоднорідності від змін профілю температурного поля вздовж електродів термопари. Тому розробка моделі процесу накопичення неоднорідності електродів термопар в процесі експлуатації є актуальною задачею, рішення якої описано нижче.

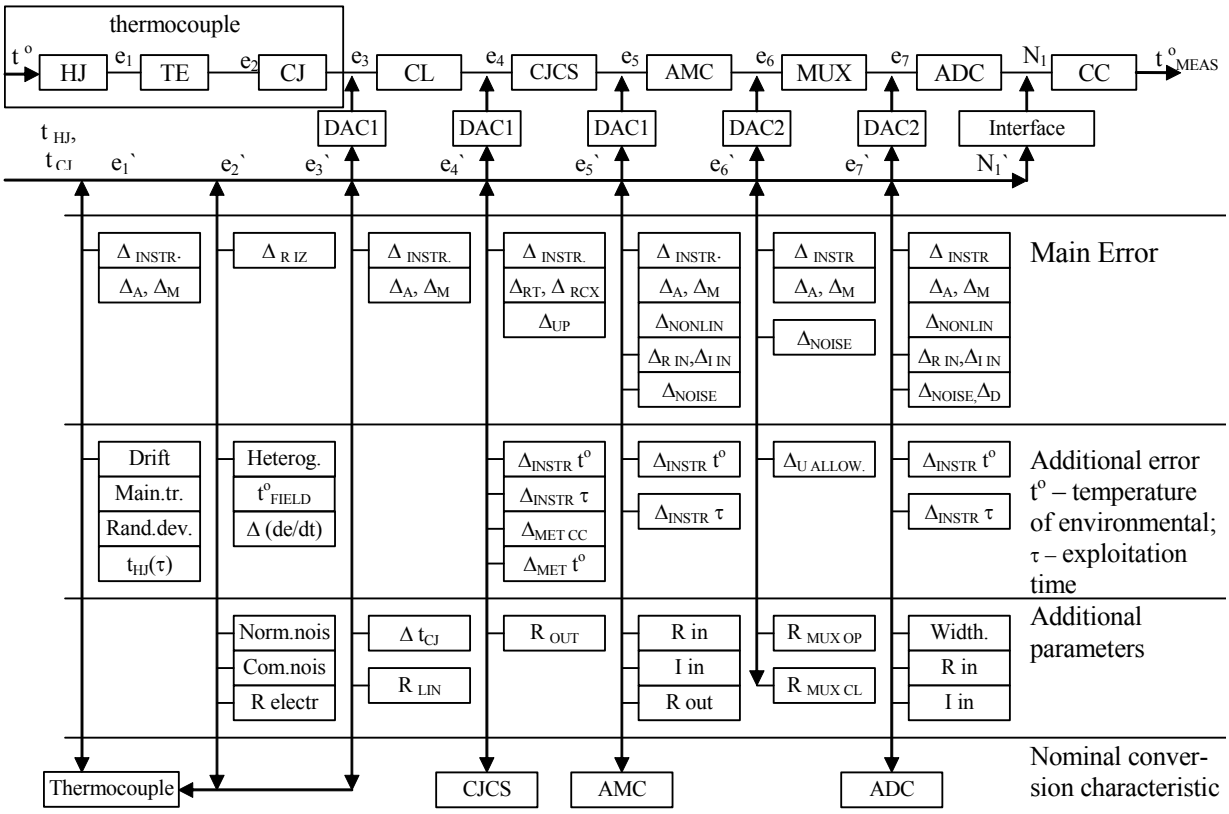

Рис. 1 – Структура МПТ вимірювального каналу з термопарою

2. СКЛАДОВІ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ НАКОПИЧЕННЯ НЕОДНОРІДНОСТІ ЕЛЕКТРОДІВ ТЕРМОПАР

Запропонований автором метод корекції похибки від набутої неоднорідності термопари [7] в ідеальному випадку забезпечує відсутність впливу профілю температурного поля на результат вимірювання температури навіть при великій набутій термоелектричній неоднорідності електродів термопар через те, що навчена нейронна мережа містить в собі розподіл сумарного відхилення прогнозованої похибки від її дійсного значення. Цей розподіл в ідеальному випадку дозволяє повністю відкоригувати математичні моделі дрейфу всіх ділянок термоелектродів, тобто реалізувати ланцюжок "ідеальна метрологічна перевірка – ідеальний розподіл – повна корекція моделей". Однак в реальному випадку вплив похибок метрологічної перевірки, навчання нейронної мережі та інші фактори ведуть до того, що при реалізації методу, запропонованого в [7], виникає залишкова похибка, яка впливає на результат вимірювання температури. Завданням МПТ є дослідження значення цієї залишкової похибки і умов, при яких вона є максимальною. Для цього МПТ повинен генерувати значення кодів, які відповідають:

1. Значенню термо-е.р.с. досліджуваної термопари, що відповідає заданій вимірюваній температурі згідно номінальної ХП;

2. Відхиленню значення термо-е.р.с. досліджуваної термопари від номінального, що відповідає сумарній термо-е.р.с. дрейфу кожної ділянки обох термоелектродів. При цьому дрейф кожної ділянки повинен відповідати:
   2.1. Загальному тренду дрейфу даного типу термоелектрода при нормальній температурі експлуатації цієї ділянки;
   2.2. Температурі ділянки, яка виникла в результаті зміни профілю температурного поля вздовж термоелектродів.
   2.3. Індивідуальним відхиленням темпу дрейфу кожної ділянки обох термоелектродів.

Перелічені в п. 2 вимоги повинен реалізувати блок Heterog. Для цього він повинен реалізувати математичну модель дрейфу кожної ділянки кожного термоелектрода згідно часу експлуатації термопари τ, температури експлуатації ділянки t_E та температури діапазону t_D, до якої може змінитися температура ділянки при зміні профілю температурного поля вздовж електродів термопари, тобто математична модель дрейфу повинна бути функцією трьох змінних $e(\tau, t_E, t_D)$. Основою для побудови математичної моделі дрейфу повинні бути результати його експериментальних досліджень. Найбільш повні результати опубліковані у [6], тому візьмемо їх за основу. Однак під час апроксимації функцій трьох змінних при відносно малій кількості даних для забезпечення достатньої точності необхідно використати складні функції. Тому доцільно, для спрощення задачі, змінну час експлуатації термопари τ фіксувати як параметр при проведенні дослідження залишкової похибки. В такому разі, при дослідженні вимірювального каналу на базі найбільш широко розповсюджених термопар типу ХА, згідно [6], середній дрейф ділянок хромелевого електрода при 1000 годинах експлуатації можна записати як

$$\Delta E_X^{1000} = 0{,}035\sqrt{t_e}\,(-4{,}6\cdot 10^{-7} t_D^3 + 0{,}275\cdot 10^{-3} t_D^2 + 0{,}213 t_D)\mu V\,. \qquad (1)$$

Середній дрейф ділянок алюмелевого електрода в аналогічних умовах можна записати

як $$\Delta E_A^{1000} = 0{,}035\sqrt{t_e}\,(-4\cdot 10^{-9} t_D^4 + 0{,}71\cdot 10^{-5} t_D^3 - 0{,}38\cdot 10^{-2} t_D^2 + 0{,}715 t_D)\mu V\,. \qquad (2)$$

Однак кожна i-та ділянка має індивідуальні відхилення швидкості дрейфу, які можна імітувати коефіцієнтом K_i, що має випадкову складову, відповідно до наступної формули

$$K_i = 1 + 0{,}05(r_1 - 0{,}5)\,, \qquad (3)$$

де r_1 – випадкові числа в діапазоні від нуля до одиниці, $r_1 \in [0;1]$.

Реальний дрейф ділянок має також нерівномірність ΔE_{NRi}, яку можна імітувати залежністю

$$\Delta E_{NRi} = 5(r_2 \cdot \sin(t_D/100))\mu V\,, \qquad (4)$$

де r_2 – випадкові числа в діапазоні від нуля до одиниці, $r_2 \in [0;1]$.

Похибку термопари в цілому МПТ визначає як суму похибок всіх n ділянок, що належать обом термоелектродам

$$\Delta E_{TC} = \sum_{i=1}^{n} \Delta E_{TE1i} + \sum_{i=1}^{n} \Delta E_{TE2i}\,, \qquad (5)$$

де $\Delta E_{TE1i} = K_i \cdot \Delta E_X^{1000} + \Delta E_{NRi}$ – сумарна похибка дрейфу хромелевого термоелектрода згідно (1), (3) і (4); $\Delta E_{TE2i} = K_i \cdot \Delta E_A^{1000} + \Delta E_{NRi}$ – сумарна похибка дрейфу алюмелевого термоелектрода згідно (2), (3) і (4).

3. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ З ДОПОМОГОЮ МПТ

Комплекс експериментальних досліджень з допомогою МПТ включає:

1. Підготовку набору кодів, які імітують різні варіанти процесу наростання набутої термоелектричної неоднорідності електродів термопари;
2. Власне експериментальні дослідження, які полягають у подачі підготовлених згідно п. 1

наборів кодів на досліджувані компоненти вимірювального каналу з допомогою відповідних цифро-аналогових перетворювачів;

3. Оцінку похибки корекції досліджуваним вимірювальним каналом похибки від набутої термоелектричної неоднорідності термопар для різних варіантів;
4. Формування комплексу метрологічних характеристик, які будуть в достатній мірі характеризувати вимірювальний канал щодо якості процедури корекції похибки від набутої термоелектричної неоднорідності термопар.

П. 1 реалізується блоком Heterog. Його внутрішня структура показана на рис. 2. Лічильник реалізацій формує коди номера експерименту і номера етапу кожного експерименту. Кожен експеримент відповідає процесу метрологічної перевірки деякої термопари зі своїм варіантом процесу наростання набутої термоелектричної неоднорідності електродів. Номери етапу експерименту відповідають метрологічній перевірці цієї термопари в одному з профілів температурного поля вздовж її термоелектродів. На час одного експерименту параметри r_1 і r_2 залежностей (3) і (4) залишаються незмінними, тобто значення K_i та ΔE_{NRi} залишаються фіксованими. Блок номера експерименту адресує в запам'ятовуючому пристрої область, де зберігається масив K_i та ΔE_{NRi}, і відповідні для даного експерименту поточні значення поступають у файл, в який будуть записані в подальшому результати обробки даних досліджуваною системою для наступного визначення її метрологвчних характеристик. Номер етапу адресує в запам'ятовуючому пристрої область, що містить значення сигналів давачів, які імітують поточний профіль температурного поля, в якому на даному етапі термопара проходить метрологічну перевірку. Обидва набори поступають на блок обчислення дрейфу ділянок, який визначає індивідуальне значення дрейфу кожної ділянки згідно (1)-(4), використовуючи фіксовані значення K_i та ΔE_{NRi}. Блок обчислення сумарної похибки сумує похибки ділянок згідно (5). Сумарна похибка поступає у вихідний масив похибок від набутої неоднорідності, який використовується для імітації похибок термопари під час експериментального дослідження вимірювального каналу. На інші вимірювальні канали досліджуваної системи поступають значення температури з області імітації профілю температурного поля.

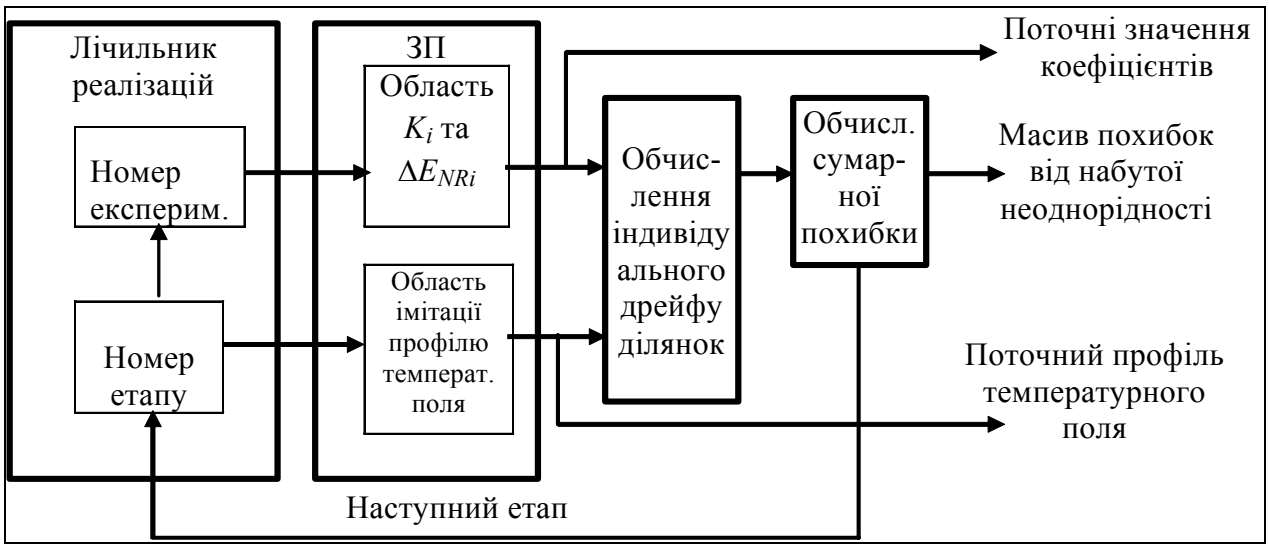

Рис. 2 – Структура блоку Heterog, що входить в МПТ

Завданням обробки даних у вимірювальному каналі, що коригує похибку від набутої неоднорідності з використанням методу, запропонованого в [7], є знаходження дійсного значення температури, яка поступає на вхід неоднорідної термопари. Для цього необхідно за результатами метрологічної перевірки, імітованими блоком Heterog, визначити значення коефіцієнтів K_i. Якщо у вимірювальному каналі коефіцієнти K_i визначаються явно (наприклад, шляхом розв'язку системи рівнянь, складених за результатами достатньої кількості повірок), то метрологічні параметри вимірювального каналу можна визначити шляхом порівняння знайдених

коефіцієнтів K_i з заданими блоком Heterog. Для цього в окремий масив виведено значення заданих для даного номера експерименту значень коефіцієнтів K_i.

Якщо ж корекція ведеться з використанням штучних нейронних мереж (як це запропоновано в [7]), то коефіцієнти K_i явно не визначаються, вони виявляються "схованими" у вагових коефіцієнтах та зміщеннях нейронів схованого рівня. В такому випадку метрологічні параметри вимірювального каналу можна визначити шляхом порівняння подальшого тривалого прогнозу похибки від набутої неоднорідності з імітованим блоком Heterog. накопиченням цієї похибки згідно індивідуальних значень K_i та ΔE_{NRi} ділянок термопари.

Описане вдосконалення МПТ дає можливість дослідити не тільки якість алгоритму, що реалізує метод корекції похибки термопар від набутої термоелектричної неоднорідності, але і вплив похибок вимірювального каналу на похибку корекції. У випадку дослідження самого методу всі похибки всіх інших компонентів вимірювального каналу задаються рівними нулю. Під час дослідження впливу похибок вимірювального каналу на похибку корекції можлива імітація довільних похибок компонентів. Таким чином можна дослідити вплив на результат вимірювання похибок вимірювального каналу у двох режимах: (i) в режимі метрологічної перевірки, тобто під час знаходження значень K_i, що характеризують індивідуальний дрейф окремих ділянок; (ii) в режимі вимірювання температури, при якому знайдені значення K_i використовуються для корекції похибки термопари. Також можна визначити стійкість алгоритму реалізації методу до різних комбінацій похибок компонентів і найбільш небезпечні їх варіанти.

Друга частина описаного в [5] МПТ – програма зв'язку з досліджуваним вимірювальним каналом – при метрологічних дослідженнях вимірювального каналу, що використовує метод корекції похибки термопар від набутої неоднорідності, залишається без змін. Третя частина цього МПТ – програма оброблення результатів – може теж залишатися без змін, якщо метрологічні характеристики вимірювального каналу визначаються шляхом порівняння подальшого тривалого прогнозу похибки від набутої неоднорідності з імітованим блоком Heterog. Якщо ж порівнюються значення знайдених коефіцієнтів K_i з фіксованими блоком Heterog., то програма оброблення результатів повинна бути відповідно змінена.

ВИСНОВКИ

Вдосконалений метрологічний програмний тест дозволяє проводити метрологічні дослідження вимірювальних каналів температури з врахуванням похибок не тільки широко вживаних первинних вимірювальних перетворювачів – термопар, а й їх специфічних похибок, зокрема, похибки від набутої в процесі довготривалої експлуатації неоднорідності їх термоелектродів. При цьому можливі метрологічні дослідження вимірювальних каналів, що використовують новий, запропонований в [7], метод корекції цієї похибки, а також дослідження як похибок самого методу, так і вплив на них похибок вимірювального каналу і в режимі метрологічної перевірки термопар, і в режимі вимірювання температури.

ЛІТЕРАТУРА

[1] J. Brignell. Digital compensation of sensors. *Scientific Instruments*, 1978, vol. 20, no 9, p. 1097-1102.

[2] J. E. Brignell. The future of intelligent sensors: a problem of technology or ethics? *Sensors and Actuators A: Physical*, 1996, vol. 56, No. 1-2, p. 11–15.

[3] Цветков Э.И., Хуснутдинов Г.Н., Соболев В.С. и др. Применение методов имитационного моделирования для метрологического анализа процессорных измерительных средств и их блоков. *Измерения, контроль, автоматизация*. 1987, № 1, с. 3–14.

[4] Соболев В.С. Программное обеспечение современных систем сбора и обработки измерительной информации. *Приборы и системы управления. Измерения, контроль, автоматизация*. 1998, № 1, с. 55–63.

[5] Kochan R. Approach to development metrological software test for verification intelligent instrumentation. *Proc. of second IEEE international workshop on Intelligent Data Acquisition and Advansing Computing Systems (IDAACS'2003),* Lviv (Ukraine), 2003, p. 168–173.

[6] Рогельберг Н.А. Изменения термоэлектрической силы проволок из хромеля и алюмеля при нагреве на воздухе при 800°С продолжительностью до 10000 ч. *Исследование сплавов для термопар: Сб. тр. института Гипроцветметобработка. Том III.* – М.: Металлургия, 1969.

[7] Пат. 2008 05623 Україна, МПК G01K 7/02. Спосіб корекції похибки неоднорідності

термопар / Васильків Н.М., Кочан О.В., Кочан В.В.; заявл. 29.04.2008.

Надія Васильків *закінчила Львівський національний університет імені І. Франка за спеціальністю "Фізика" у 1981 році. Працює старшим викладачем кафедри інформаційно-обчислювальних технологій Тернопільського національного економічного університету.*

Наукові інтереси: стандартизація і метрологія, вимірювання теплових величин.

computing@computingonline.net
www.computingonline.net

ISSN 1727-6209
International Journal of Computing

IMPROVEMENT OF METROLOGY SOFTWARE TEST IN COMPUTER SYSTEMS OF TEMPERATURE MEASUREMENT

Nadiya Vasylkiv

Ternopil National Economic University,
3, Peremoga square, Ternopil, 46020 Ukraine
e-mail: Nadiya.Vasylkiv@gmail.com

Abstract: *In this paper the improved metrology software test is described by simulation the growth process of thermocouple thermoelectric heterogeneity acquired in operation conditions. It's aimed to create the possibilities for the metrological studies of the temperature measuring channel in the computer measurement and control systems as well as a correction of the error caused by the thermocouple thermoelectric heterogeneity.*

Keywords: *metrological test, computer measurement and control systems, thermocouple, thermoelectric heterogeneity, measuring channel, error correction.*

Measuring channels (MC) of the computer measurement and control systems are constantly complicating due to their intellectualization functions by various subsystems and ways of different errors correction [1, 2]. To accelerate the metrological exploration a specialized software tool – the software metrological test (SMT) is described in[5], and it enables to simulate the various errors of a measuring channel. Therefore we propose to include the appropriate simulation model into the SMT framework. The MC structure and the digital-analog converters (DAC) are illustrated in the top of Fig. 1 [5], and the program structure of the formation sets for test signals is shown in the bottom. Each SMT block simulates the one property only per one MC component, and the blocks are grouped according MC components correspondly.

The simulation model above is based on the proposed correction method of error [7] which caused by thermocouple thermoelectric heterogeneity acquired in operation conditions. In an ideal case this method provides a correction of such error above even for a large acquired thermoelectric heterogeneity because the trained neural network itself includes a distribution of the total deviation for a predicted error from its valid value. However in real case there are influences of metrological validation errors and neural network study both. Those and some other factors cause the appearance of the residual error which affects the temperature measurement result. Therefore the MPT goal is an exploration of the residual error above as well as conditions where this error gets a maximal value. To reach this goal the MPT must generate the values of codes which are appropriate:

1. The value of the thermal electromotive force for the investigated thermocouple which corresponds to the specified measured temperatures according a nominal conversion characteristic.
2. The deviation of the thermal electromotive force value for the investigated thermocouple from nominal one which corresponds to the total drift thermal electromotive force per each part of both thermo electrodes. This drift must be correspond to:
   - A general trend of the drift for this type thermo electrodes at the normal exploitation temperature for the given thermo electrodes part;
   - The given part temperature(per each part of both thermo electrodes) which has arisen as a result of the temperature field change along thermo electrodes;
   - The individual deviations of drift rate per each part of both thermo electrodes.

All specifications listed in clause 2 above are completed in the block Heterog(see Fig.1) where the drift mathematical model per each thermo electrodes part is running according to the thermocouple operation time, operation part temperature and range temperature, i.e. the mathematical model of drift should be a function of three variables. The result of the drift experimental studies [6] are a basis to build

a correspondent mathematical model. To simplify the approximation process for the function of three variables above we propose to fix the variable of the operation thermocouple time as a parameter at the stage of the residual error exploration. For example in case of experimental studies of broadly used chromel-alumel thermocouples[6] the approximation model of an average drift for a chromel thermo electrode at the 1000 exploitation hours can be describe by the expression(1), and the expression (2) for the alumel thermo electrode at the same conditions.

However each *i*- part of thermo electrode has the individual deviations of drift speed which can be described by coefficients *Ki* (see an expression 3). A real drift has an irregularity $\Delta Enri$ which is simulated by the expression(4). A total thermocouples error as a sum of errors for all *n* parts per each thermo electrode can be determined using the expression(5).

The developed complex of experimental studies using the MPT includes:

1. The prepared set of codes which simulate the different processes for the growth of the thermocouple thermoelectric heterogeneity acquired in operation conditions;
2. The experimental studies itself which are running due sending the prepared sets of codes, see clause 1 above on the MC components using the proper DACs;
3. The error correction assessment of the investigated MC for the acquired thermoelectric heterogeneity in different modes;
4. The formation of metrological characteristics set which will describe adequately the MC towards the correction procedure quality for acquired thermocouple thermoelectric heterogeneity.

The clause 1 above is running by a block Heterog (see Fig. 2). Each experiment is corresponds to the metrological validation procedure of some thermocouple with its own mode of the growth process for acquired thermocouple thermoelectric heterogeneity. The numbers of the experiment stage are corresponding to the metrological validation procedure of this thermocouple in one of the profiles of temperature field along its thermo electrodes.

A goal of data processing in the MC – where the error of the acquired thermocouple thermoelectric heterogeneity is corrected using a proposed method [7] – is a determination of the valid temperature value which comes in input of the heterogeneous thermocouple. For this purpose is necessary to determine values of the proper coefficients *Ki* on the base of the metrological validation results simulated by block Heterog. If those coefficients *Ki* are defined in MC clearly enough – due solving the equations system on the base of the metrological validation results for example – then the MC metrological parameters can be determined by comparing the calculated coefficients *Ki* with the given ones by block Heterog.

If the correction is carried out using artificial neural networks [7] then the coefficients *Ki* are not clearly defined, they are “hidden” in the weights and neurons biases of hidden level. In this case the MC metrological parameters can be determined by comparing the long-term future prediction of acquired heterogeneity error with the accumulation of that error according to the individual values of *Ki* and $\Delta Enri$ for thermocouple parts which were simulated by block Heterog.

The MPT second part described in [5] – the program of communication with the investigated MC – doesn’t change. The MPT third part – the program of processing the results – doesn’t change too in a case the MC metrological characteristics are determined by comparing the long-term future prediction of acquired heterogeneity error with the error value simulated by block Heterog. However this program changes correspondly in a case the determined coefficients *Ki* compare with values fixed by block Heterog.

In conclusion we should note the proposed metrology software test allows to run the metrological studies of the temperature MC taking into account not only common errors of thermocouples, but their specific errors, in particular an error caused by thermocouple thermoelectric heterogeneity acquired in operation conditions. We should stress it’s possible to run the metrological studies of the MCs using a proposed method [7] as well as the studies both this method errors itself and the influence of the MC errors in the two modes: the metrological validation of the thermocouples and a process of the temperature measurement.