

ВИМІРЮВАННЯ НЕСТАЦІОНАРНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ КОНТАКТНИМ МЕТОДОМ

En The main disadvantage of contact methods of temperature measurement by means of thermocouples is the thermal inertia of a sensitive element, which adds an additional methodological error in the dynamic measurements of temperature. In gas temperature measurement, a researcher deals with approximation of the true temperature. And also, thermocouples have limited range of measured temperature.

If the temperature of the object changes with a certain speed, then thermocouple needs time to achieve thermodynamic equilibrium with the object. This time determines the thermocouple reaction rate to incoming temperature change. If the temperature of the object changes at a rate which exceeds the reaction rate of the thermocouple, in this case the thermocouple does not reach the thermodynamic equilibrium with the object of measurement. Thermo EMF of the thermocouple corresponds to the temperature to which the thermocouple sensitive element has heated up, not to the true temperature of the object of measurement.

Hence, it is necessary to study the dynamic characteristics of the thermocouple and to develop a method for the temperature values restoration from thermo EMF of the thermocouple in the transient mode of its operation, with relatively low values of the temperature of the sensitive element.

The purpose of the article is to improve the method of dynamic temperature measurement by using experimentally obtained dynamic characteristics of the thermocouple to restore the true value of the temperature of the medium based on the methods of solving the inverse measurement problem.

The method of determining the gas flow temperature using a thermocouple in the transient mode is considered in the article. The method of nonlinear approximation based on the assumption that the transient characteristic of a thermocouple is the sum of exponentials is applied, and a model of the transient characteristic of a thermocouple is obtained. Applying the deconvolution, the form of the temperature pulse of the gas flow is determined

Ru В статье рассмотрен метод определения температуры газового потока используя термопару в переходном режиме ее работы. Применен метод нелинейной аппроксимации, на основе предположения, что переходная характеристика термопары является суммой экспонент, и получена модель переходной характеристики термопары. Применяя уравнение обратной свертки, определена форма температурного импульса газового потока.

¹ НТУУ «Київський політехнічний інститут ім.Ігоря Сікорського», кафедра автоматизації експериментальних досліджень

Вступ

Вимірювання температури складає значну частину всіх вимірювань у сучасній метрології, що пояснюється впливом температури на якість виходу багатьох технологічних процесів, а також горіння і детонації. Температура є одним із основних факторів, який впливає на точність вимірювання інших фізичних величин.

Вимірювання температури газових продуктів горіння на виході камер згорання двигунів літаків та ракет під час стендових або натурних випробувань, розжарених газових потоків, які виникають у разі вибухів (наприклад, під час випробувань систем від'єднання літальних апаратів тощо), потоку низькотемпературної плазми у разі взаємодії лазерного випромінювання із твердим матеріалом виявляється надзвичайно складним завданням для практичної реалізації в умовах надзвичайно високих тисків і реактивних середовищ із заданим ступенем точності. Такі умови накладають жорсткі обмеження на параметри системи вимірювання температури, такі як використання мініатюрних первинних перетворювачів (внаслідок малих просторів для монтажу чутливих елементів та їх захисту від небезпечного середовища), наявність додаткових захисних засобів і заходів, спрямованих на збереження вимірювальних каналів і системи в цілому від дії агресивного середовища. Найбільш складно підібрати матеріали чутливих елементів первинних перетворювачів і захисного обладнання, які витримують високі значення температури і тиску, а також не піддаються впливу корозії. З іншого боку, первинний перетворювач повинен мати мінімально можливий вплив на температурне поле потоку.

Аналіз проблеми

В останні десятиліття широкого розповсюдження набули безконтактні методи вимірювання температури. Серед них варто виділити оптичні методи вимірювання [1]. Широке застосування оптичних перетворювачів пов'язане із значним прогресом у галузі напівпровідникових матеріалів та розширенням функціональних потужностей мікропроцесорної техніки. Перевагами оптичних засобів є відсутність впливу на вимірюване середовище, можливість визначення просторового розподілу температури у значному об'ємі та головне – це надзвичайно високі значення швидкості відгуку оптичного перетворювача. Проте, перераховані переваги оптичних засобів не дозволили їм витіснити контактні засоби вимірювання температури. Перш за все, це пов'язано із значними методичними похибками у разі застосування оптичних методів. Носієм інформації про температуру середовища є електромагнітне випромінювання [2]. Рівняння залежності температури від інтенсивності і спектру електромагнітного випромінювання розроблені для математичної

абстракції – абсолютно чорного тіла [3]. Існує декілька рівнянь, які описують цю залежність, спираючись на параметр оптичного сигналу, який є функцією температури. У реальних випробуваннях ці рівняння застосовують, якщо відомі фізичні та хімічні характеристики об'єкта. Спектральна щільність розподілу електромагнітного випромінювання, яку можна використати для визначення температури, залежить від хімічного складу об'єкту вимірювання, його фізичного стану, стану поверхні (границі розділу об'єкта і навколишнього середовища) тощо [1]. Також потрібно враховувати той факт, що тільки частина загального випромінювання викликана тепловими процесами, це особливо стосується газових середовищ, де спектр випромінювання може бути викликаний нетепловим випромінюванням (флуоресцентним тощо) [2]. Іншою перешкодою на шляху всебічного застосування оптичних засобів є ціна обладнання та затрати на його встановлення. Тому і сьогодні у більшості випадків перевагу віддають контактним методам вимірювання температури. Так, наприклад, на стендових випробуваннях реактивних двигунів застосовуються матриці із контактних датчиків. Найбільшого поширення набули термопари, що пояснюється простотою виготовлення датчиків, використання та побудови на їх основі вимірювальних каналів [4].

Головним недоліком контактних методів вимірювання із використанням термопар є тепла інерційність чутливого елемента, що вносить додаткову методичну похибку у разі динамічних вимірювань температури [2]. Тому, що стосується вимірювання температури газових середовищ, дослідник має справу із наближеними значеннями температури. Застосування термопар для вимірювання температури газових потоків під час вибухів майже не реалізовано. Також термопари обмежені за діапазоном вимірюваних температур.

Задоволення вищезгаданих обмежень із збереженням необхідної точності і достовірності вимірювань, оскільки у більшості випадків вимірювання температури зазначених процесів і явищ має надзвичайно обмежену кількість випробувань, значно зменшує перелік первинних перетворювачів, придатних для застосування у таких умовах.

Звідси впливає необхідність дослідження динамічних характеристик термопари і розробки методики відновлення значень температури за значеннями термоелектрорушійна сила (термоЕРС) термопари у перехідному режимі її роботи, за відносно невисоких значень температури чутливого елемента.

Постановка задачі

Метою статті є вдосконалення методу динамічного вимірювання температури шляхом використання експериментально отриманих динамічних характеристик термопари для відновлення дійсного значення

температури середовища на основі методів рішення зворотної задачі вимірювання.

Основи вимірювань температури термопарами

У основі вимірювання температури термопарами покладено термоелектричний ефект Зеєбека. Цей ефект встановлює залежність термоЕРС, яка виникає на вільних кінцях термопари, від різниці температур холодного і гарячого з'єднаних. Залежність термоЕРС від температури визначається на основі наступної формули [2]:

$$E = \sigma_{ab} \Delta T,$$

де E - термоЕРС на вільних кінцях термопари;

σ_{ab} - коефіцієнт Зеєбека для a і b провідників;

ΔT - різниця температур гарячого та холодного контактів термопари.

Загальний метод вимірювання температури полягає в створенні теплового контакту між чутливим елементом термопари та об'єктом вимірювання. Через деякий час, після встановлення термодинамічної рівноваги між термопарою та об'єктом, вимірюють термоЕРС, за якою встановлюють температуру об'єкту на основі використання градувальних таблиць.

Математична модель термопари

Згідно із [5] будь-який датчик, із достатньою для практики точністю, можна представити у вигляді двох послідовно з'єднаних ланок: лінійної та нелінійної. Лінійна частина термопари може бути апроксимована лінійною аперіодичною ланкою, яка характеризується передавальною функцією $W(j\omega)$ у частотній області; нелінійна ланка – представляє нелінійну залежність термоЕРС термопари від температури (рис. 1).

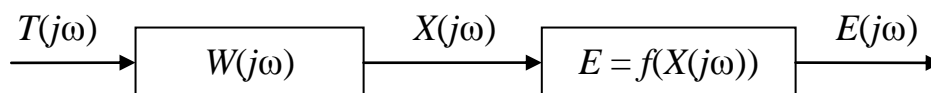


Рис. 1. Математична модель термопари

Під час вимірювання температури термопарою у статичному режимі має значення тільки нелінійна ланка моделі, яка не залежить від часу і є нормованою статичною характеристикою термопари. Ця характеристика зазначається у технічному паспорті термопари. Для спрощення розрахунків, вважаємо, що моделлю термопари є лінійна, незалежна від часу система і представлена лінійною аперіодичною ланкою (рис. 2). Дане спрощення дозволяє застосувати для дослідження системи (термопари) ме-

тоди цифрової обробки сигналів та динамічної ідентифікації для лінійних систем.

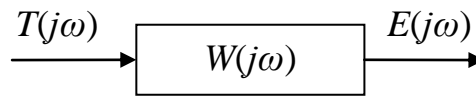


Рис. 2. Динамічна модель термопар

Якщо температура об'єкту змінюється за певною швидкістю, то для досягнення термопарою термодинамічної рівноваги із об'єктом потрібен деякий час. Цей час визначає швидкість реакції термопар на вхідну зміну температури [6]. Якщо температура об'єкту змінюється зі швидкістю, яка перевищує швидкість реакції термопар, то у цьому випадку термопара не досягає термодинамічної рівноваги із об'єктом вимірювання. ТермоЕРС на виході термопарі відповідає температурі, до якої встиг нагрітись чутливий елемент термопарі, а не температурі об'єкту вимірювання.

Параметр який характеризує динамічну реакцію термопар і відноситься до часткових нормованих динамічних характеристик вимірювальних перетворювачів називається постійною часу термопарі. Це час, за який термоЕРС на виході термопарі досягає 63,2 % від термоЕРС у разі термодинамічної рівноваги термопарі та об'єкту вимірювання [7].

Різниця між температурою чутливого елемента термопарі і об'єкту, яка виникає внаслідок теплової інерції термопарі, вносить методичну похибку до результату вимірювання температури. Дана похибка є динамічною складовою загальної похибки вимірювання.

Розглянемо найпростіший випадок математичної моделі термопарі, представлені диференціальним рівнянням першого порядку [6-7]:

$$T_0 = T + \tau \frac{\partial T}{\partial t},$$

де T_0 - температура потоку;

T - температура чутливого елемента термопарі;

τ - постійна часу термопарі.

Для визначення даної системи виберемо її перехідну характеристику, як реакцію термопарі на стрибок температури на її чутливому елементі.

Оскільки для дослідника єдиним доступним сигналом під час вимірювання температури термопарою є термоЕРС і в даній роботі прийнята пряма пропорційність між температурою та термоЕРС, то перехідну характеристику термопарі можна записати у наступному вигляді:

$$\frac{E_0 - E_{th}}{E_0 - E_s} = e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (1)$$

де E_0 - термоЕРС термопарі у стані термодинамічної рівноваги;

E_{th} - термоЕРС термопарі у перехідному режимі;

E_s - початкове значення термоЕРС.

Для простоти розрахунків покладемо $E_s = 0$ і перепишемо рівняння (1):

$$E_{th} = E_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right). \quad (2)$$

Рівняння (2) – ідеалізоване рівняння тільки чутливого елементу термомпари без захисного чохла, яке враховує тільки один канал теплообміну. Для вимірювання високотемпературних газових потоків використовують термомпари із відкритим чутливим елементом, але наявність багатьох каналів теплообміну чутливого елементу з іншими об'єктами (радіаційний теплообмін, кондуктивний теплообмін із корпусом та електродами термомпари тощо) не можливо характеризувати єдиною постійною часу. Тому наявність багатьох каналів теплообміну чутливого елементу термомпари включає до рівняння (2) стільки ж сталих часу. Для загального випадку (2) можна записати у вигляді:

$$E_{th}(t) = E_0 \left(1 + a_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} + a_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}} + \dots + a_n e^{-\frac{t}{\tau_n}} \right). \quad (3)$$

Коефіцієнти a_1, a_2, \dots, a_n та сталі часу $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ отримують провівши ідентифікацію динамічних характеристик термомпари і виконавши нелінійний регресійний аналіз отриманої перехідної характеристики термомпари. Рівняння (3) описує реакцію системи на ступінчасту дію температури. Перехідна характеристика системи, як реакція на одиничну ступінчасту дію температури, має вигляд:

$$g(t) = 1 + a_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} + a_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}} + \dots + a_n e^{-\frac{t}{\tau_n}}. \quad (4)$$

Для практичної реалізації ідентифікації динамічних характеристик термомпари краще отримати перехідну характеристику системи $g(t)$. Імпульсна характеристика є похідною від перехідної характеристики і в загальному вигляді може бути знайдена із рівняння (4):

$$h(t) = \frac{dg(t)}{dt} = \frac{a_1}{\tau_1} e^{-\frac{t}{\tau_1}} + \frac{a_2}{\tau_2} e^{-\frac{t}{\tau_2}} + \dots + \frac{a_n}{\tau_n} e^{-\frac{t}{\tau_n}}.$$

Ідентифікація динамічних характеристик термомпар

Передавальна функція термомпари є найбільш інформативною, та її порівняно просто отримати експериментальним шляхом [8]. Для отримання перехідної характеристики термомпари використовують метод ідентифікації динамічних характеристик системи.

Існує декілька методів динамічної ідентифікації [7 – 9]. Найбільш точними є методи ідентифікації з використанням радіоімпульсу струму та когерентного оптичного опромінення [8, 10 - 15]. В основу методів покладено дію тестового ступінчатого сигналу на досліджувану систему. У ролі тестового сигналу виступає стрибкоподібне збільшення температури чутливого елемента терморпарі за рахунок внутрішнього розігріву радіоімпульсом струму або зовнішнього розігріву лазерним променем. Збільшуючи тривалість тестового впливу за постійної потужності отримують сімейство кривих перехідної функції терморпарі (рис. 3).

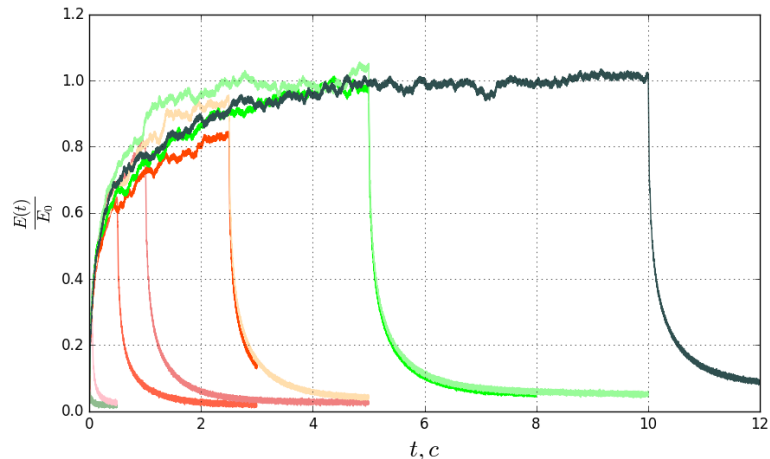


Рис. 3. Перехідні характеристики терморпарі за різної тривалості дії квазіступінчатого лазерного променя [8, 14 - 15]

Відновлення значення температури газового потоку

Лінійна, не залежна від часу, система може бути повністю описана її імпульсною характеристикою $h(t)$ у часовій області або передавальною функцією $H(j\omega)$ у частотній області, використовуючи перетворення Фур'є. Реакцію цієї системи на будь-який сигнал у часовій області можна визначити, використовуючи рівняння згортки [6]:

$$E(t) = T(t) * h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} T(\tau) h(t - \tau) d\tau, \quad (5)$$

де $T(t)$ - дійсна температура середовища;

$E(t)$ - реакція терморпарі на зміну температури.

У частотній області дана операція перетворюється на звичайне множення:

$$E(j\omega) = T(j\omega)H(j\omega), \quad (6)$$

де $E(\omega)$ – реакція терморпарі на зміну температури;

$T(\omega)$ – температура середовища;

$H(\omega)$ - передавальна функція у частотній області.

Якщо імпульсна характеристика системи точно відома і відсутній вплив шуму, то відновити вхідний сигнал можна виходячи із простого рівняння:

$$T(j\omega) = \frac{E(j\omega)}{H(j\omega)}.$$

Потім, застосувавши обернене перетворення Фур'є, отримаємо вхідний сигнал у часовій області:

$$T(t) = \int_{-\infty}^{\infty} T(j\omega) e^{j\omega t} d\omega. \quad (7)$$

Насправді будь-який сигнал на виході вимірювальної системи додатково містить спотворення або шум $N(j\omega)$ (рис. 4).

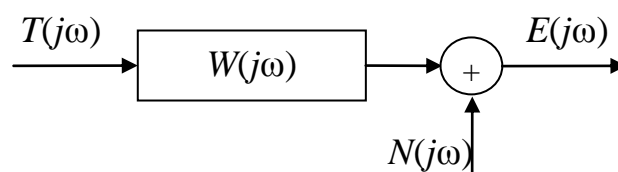


Рис. 4. Розширена модель термоперетворювача

Для даної системи рівняння (5) і (6) матимуть вигляд:

$$E(t) = T(t) * h(t) + n(t), \quad (8)$$

$$E(j\omega) = T(j\omega)H(j\omega) + N(j\omega). \quad (9)$$

Дійсну температуру середовища можна визначити вирішивши рівняння (9) відносно $T(j\omega)$:

$$T(j\omega) = \frac{E(j\omega) - N(j\omega)}{H(j\omega)}. \quad (10)$$

Використовуючи обернене перетворення Фур'є, можна встановити значення температури. Якщо вимірювальна система спроектована таким чином, що відношення сигнал–шум на виході термопарі має високе значення, то в цьому випадку можна скористатись цим алгоритмом відновлення сигналу в частотній області. Якщо сигнал термопарі сильно зашумлений, потрібно застосовувати додаткову фільтрацію у частотній області. Для цього можна застосувати фільтр Вінера.

На рис. 5 зображено змодельоване відновлення значення температури із використанням розглянутого у даній статті алгоритму.

Висновки

Розглянуто метод визначення температури газового потоку, використовуючи термопару у перехідному режимі її роботи. Застосовуючи методи нелінійної апроксимації, на основі припущення, що перехідна характе-

ристика терморпери є сумою експонент, отримують модель перехідної характеристики. Виконавши диференціювання моделі перехідної характеристики, отримують модель імпульсної характеристики терморпери. Застосовуючи рівняння оберненої згортки, визначають температуру газового потоку.

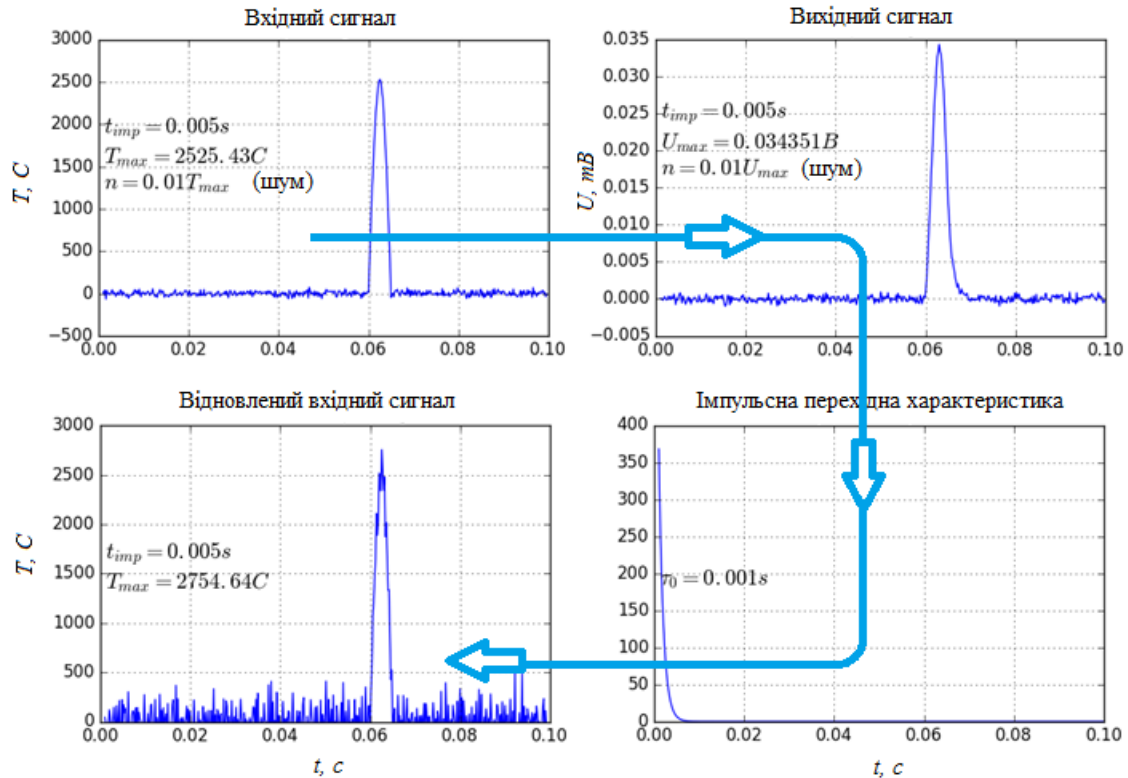


Рис. 5. Відновлення вхідного сигналу з шумом вирішенням зворотної задачі вимірювання

Список використаної літератури

1. Zhang Z. Radiometric Temperature Measurements. I. Fundamentals / Z. Zhang, B. Tsai, G. Machin. // Experimental Methods in the Physical Sciences. – Academic Press, 2009. – Vol. 42. – 376 p.
2. Луцик Я. Т. Вимірювання температурні: теорія та практика / Я. Т. Луцик, О. П. Гук, О. І. Лах, Б. І. Стадник. – Львів : Бескід-Біт, 2006. – 560 с.
3. Геращенко О. А. Температурные измерения: Справочник / О. А. Геращенко – К. : Наук. думка, 1989. – 704 с.
4. Nicholas J. V. Traceable Temperatures: An Introduction to Temperature Measurement and Calibration. 2nd Edition / J. V. Nicholas and D. R. White. – John Wiley & Sons, Ltd, 2001. – 444 p.
5. Полярус О. В. Наближене розв'язання оберненої задачі вимірювань та його метрологічне забезпечення: монографія / О. В. Полярус, С. О. Поляков. – Х. : Видавництво «Лідер», 2014. – 120 с.

6. *Коротков П. А.* Динамические контактные измерения тепловых величин / П. А. Коротков, Г. Е. Лондон. – Л. : «Машиностроение», 1974. – 224 с.
7. *Hashemian H. M.* Maintenance of process instrumentation in nuclear power plants / H. M. Hashemian. – Springer, 2006. – 308 p.
8. *Туз Ю. М.* Ідентифікація динамічних характеристик термоперетворювачів / Ю. М. Туз, О. В. Козир, Т. В. Червона // Механіка гіроскопічних систем. – 2015. - № 30. С. 53-61. DOI: <https://doi.org/10.20535/0203-377130201570288>.
9. Ідентифікація статичних та динамічних характеристик термоперетворювачів : автореф. дис ... канд. техн. наук : 05.11.04 / Володимир Петрович Столярчук . – Львів : Б.в., 2012 . – 19 с.
10. *Туз Ю. М.* Автоматизированная система идентификации динамических параметров термопар / Ю. М. Туз, О. В. Козырь, А. В. Порхун // «Инженерные и научные приложения на базе технологий NI NIDays-2015»: Сборник трудов XIV международной научно-практической конференции, Москва 27 ноября 2015 г. – М.: ДМК-пресс, 2015. С. 237-239.
11. *Туз Ю. М.* Спосіб визначення динамічних характеристик термопар за допомогою радіоімпульсу струму /Ю. М. Туз, О. В. Козир, А. В. Порхун. // Системи обробки інформації. – 2016. – №6. – С. 164-166.
12. Патент України «Спосіб визначення динамічних характеристик термоперетворювачів», № 109832, Ю. М. Туз, О. В. Козир, А. В. Порхун, 12.09.2016.
13. Патент України «Пристрій для визначення динамічних характеристик термопар», № 110516, Ю. М. Туз, О. В. Козир, А. В. Порхун, 10.10.2016.
14. Патент України «Спосіб визначення динамічних характеристик термоперетворювачів», № 110515, Ю. М. Туз, О. В. Козир, Т. В. Червона, 10.10.2016.
15. Патент України «Пристрій для визначення динамічних характеристик термоперетворювачів», № 112499, Ю. М. Туз, О. В. Козир, Т. В. Червона, 26.12.2016.