

УДК 006.91

DOI: <http://dx.doi.org/10.20535/0203-377130201570288>

Туз Ю. М.¹, професор, д.т.н., Козир О. В.², аспірант,
Червона Т. В.³, аспірантка

ІДЕНТИФІКАЦІЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

En In this article the analysis of preset techniques for dynamic identification of temperature transducers is expressed. The proposed technique includes step temperature changing in temperature transducer input by means of laser irradiation of its sensor until the steady state of temperature transducer will be achieved with parallel transient response registration. Numerical investigations of acquired data have demonstrated that the proposed method performs satisfactorily and is better than others. Test rig, used for experimental validation of proposed technique, features of output signal and model of transfer function of “C” type thermocouple are presented.

¹ Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут",
кафедра автоматизації експериментальних досліджень

² Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут",
кафедра автоматизації експериментальних досліджень

³ Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут",
кафедра лазерної техніки та фізико-технічних технологій

Ru

В статье проанализировано существующие методы идентификации динамических характеристик термопреобразователей. Предложен метод экспериментального определения динамических характеристик термопреобразователей, который состоит в создании тестового влияния на чувствительный элемент термопреобразователя и параллельной регистрации его переходной характеристики. Приведено схему тестового оборудования, характеристики выходного сигнала и модель передаточной функции термодатчика типа С.

Вступ

Вимірювання температури в динамічному режимі має ключове значення в багатьох галузях науки і техніки. В особливості лазерна обробка матеріалів, дослідження і контроль процесів горіння та детонації та ін. потребують проведення даних вимірювань.

За температуру досліджуваного об'єкту приймається температура чутливого елемента термоперетворювача при умові, що сигнал на його виході досяг усталеного значення, тобто чутливий елемент термоперетворювача перебуває в стані динамічної рівноваги з досліджуваним об'єктом. При зменшенні часу тривалості теплового імпульсу або збільшенні швидкості зміни температури об'єкту сигнал на виході термоперетворювача не встигає досягти усталеного значення, внаслідок теплової інерції термоперетворювача. Це зумовлює виникнення динамічної похибки вимірювання температури. Для усунення похибки зменшують масо-габаритні параметри чутливого елемента термоперетворювача або підбирають матеріал із прийнятними значеннями фізичних параметрів (теплоємність, теплопровідність та ін.). Проте вимірювання високо температурних нестационарних процесів, які супроводжуються наявністю агресивного середовища та великих значень тиску, накладають обмеження на конструктивні параметри термоперетворювача. Через що, в більшості випадків доводиться проводити вимірювання нестационарних температур термоперетворювачами в перехідному режимі.

Існує декілька методів ідентифікації динамічних характеристик термоперетворювачів, які відрізняються за формою сигналу на вході термоперетворювача. Найбільш поширеним методом є визначення реакції термоперетворювача на ступінчасту зміну температури. Даний метод можна реалізувати за рахунок внутрішнього розігріву чутливого елемента термоперетворювача. В [1] запропоновано розігрів здійснювати змінним, а в [2-3] постійним струмом з наступною реєстрацією електрорушійної сили після вимикання струму. В подальшому на основі спадної перехідної характеристики визначається стала часу термоперетворювача, модель якої представляється у вигляді аперіодичної ланки першого порядку. При аналізі тільки спадної перехідної характеристики при знеструмленому термоперетворювачі виключається вплив термоелектричних ефектів (Пельтьє, Томсона) при розігріві постійним струмом, змінної складової на змінному струмі, що

є перевагами цих методів. Динамічні характеристики термоперетворювачів відрізняються при спаді температури і при її наростанні. Тому описані методи дають неповний опис динамічних характеристик.

Різновидом описаних вище методів є використання радіоімпульсу струму для створення ступінчатого тестового впливу [4]. Проте цей метод може бути застосований не до всіх видів термоперетворювачів.

Іншим підходом до створення ступінчатого тестового впливу є використання зовнішніх теплових джерел. Так звані випробування із зануренням, полягають в зануренні термоперетворювача із повітря в потік рідини [1,5], або почергове омивання чутливого елемента спочатку холодною, а потім гарячою рідиною [6]. Іншим варіантом є використання газових потоків різної температури з стрибкоподібним переміщенням термоперетворювача з одного шару в інший [7]. Незважаючи на те що ці способи відносяться до прямих і дозволяють наблизитись до реальних умов вимірювання, їх застосування пов'язане з труднощами конструктивного характеру та в створенні стрибкоподібного впливу на термоперетворювач. Також ці способи обмежені по амплітуді і часу наростання імпульсу температури, тому вони не можуть бути використані для високотемпературних швидкодійних термоперетворювачів.

Окремо можна виділити метод ідентифікації динамічних характеристик з використанням лазерного випромінювання. В [8] запропоновано використання постійного лазерного випромінювання для визначення постійної часу термопари з паралельною реєстрацією розігріву термопари інфрачервоним детектором, для нормування даних термопари. Проте отримані авторами результати свідчать про те, що сигнал на виході термопари не досяг усталеного значення, тому наведені в [8] результати містять методичні похибки.

Постановка задачі

Для компенсації динамічної похибки потрібно мати данні про динамічні характеристики термоперетворювачів. Тому проведення ідентифікації динамічних характеристик термоперетворювачів має вирішальне значення при вимірюванні високотемпературних нестационарних процесів. Оскільки когерентне оптичне випромінювання має керовані значення потужності і тривалості дії на об'єкт дослідження, а також враховуючи, що фронт наростання потужності на декілька порядків перевищує постійну часту більшості промислових термоперетворювачів, то використання цього методу є практично найбільш вигідними в порівнянні з попередніми методами. Виходячи з цього метою даної статті є вдосконалення методу ідентифікації динамічних характеристик термоперетворювачів з використанням лазерного випромінювання.

Теоретичні основи методу

В даній статті приведено: теоретичні основи запропонованого методу ідентифікації динамічних характеристик термоперетворювачів, на основі яких був створений вимірювальний стенд з використанням вимірювальних модулів компанії *National Instruments*, відповідне програмне забезпечення для керування вимірюваннями, написане на мові *LabVIEW*, результати проведених експериментальних досліджень.

В найпростішому випадку вимірювання температури, рівняння теплової рівноваги термоперетворювача, враховуючи тільки конвективний теплообмін, можна записати [3]:

$$\tau \frac{dT_u}{dt} + T_u = T_\infty, \quad (1)$$

де T_∞ - температура середовища; T_u - температура чутливого елемента термоперетворювача; τ - постійна часу термоперетворювача. Постійну часу в свою чергу можна записати у вигляді фізичних параметрів чутливого елемента термоперетворювача [3]:

$$\tau = \frac{\rho V c}{hA}, \quad (2)$$

де ρ - густина; V - об'єм; c - питома теплоємність; h - коефіцієнт конвективного теплообміну і A - контактна площа поверхні чутливого елемента.

Оскільки, чутливий елемент термопарних термоперетворювачів в більшості випадків утворений із сплавів різних металів, точні фізичні параметри яких невідомі, то із рівняння (2) не можливо визначити постійну часу термоперетворювача. Також неможливо визначити постійну часу використовуючи рівняння (1), оскільки дійсна температура середовища T_∞ залишається невідомою.

Серед динамічних характеристик, таких як диференціальні рівняння, амплітудо- і фазо-частотних, перехідних та імпульсно-перехідних характеристик, найбільш придатними при експериментальних випробувань термоперетворювачів є передавальна функція[9]:

$$W(p) = \frac{E(p)}{T(p)}, \quad (3)$$

де в операторній формі і за нульових початкових умов представлено:

$W(p)$ - передавальна функція термоперетворювача;

$E(p)$ - вихідний сигнал – термоелектрорушійна сила (термоЕРС);

$T(p)$ - вхідний сигнал – температура.

Оскільки, процес теплообміну термоперетворювача можна описати диференціальним рівнянням з постійними коефіцієнтами, то передавальна функція (3) являє собою дрібно раціональну функцію параметра p

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

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

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

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

$$E(t) = c_0 - \sum_{i=1}^n c_i e^{-\frac{t}{\tau_i}}, \quad (4)$$

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

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

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

Виконавши серію перетворень [10], з урахуванням початкових умов, отримаємо передавальну функцію термоперетворювача на основі експериментальної перехідної характеристики:

$$W(p) = \frac{k}{\prod_{i=1}^n (\tau_i p + 1)}, \quad (5)$$

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

Експериментальні дослідження

Для підтвердження теоретичних розрахунків був створений експериментальний стенд (рис. 1 – рис. 2).

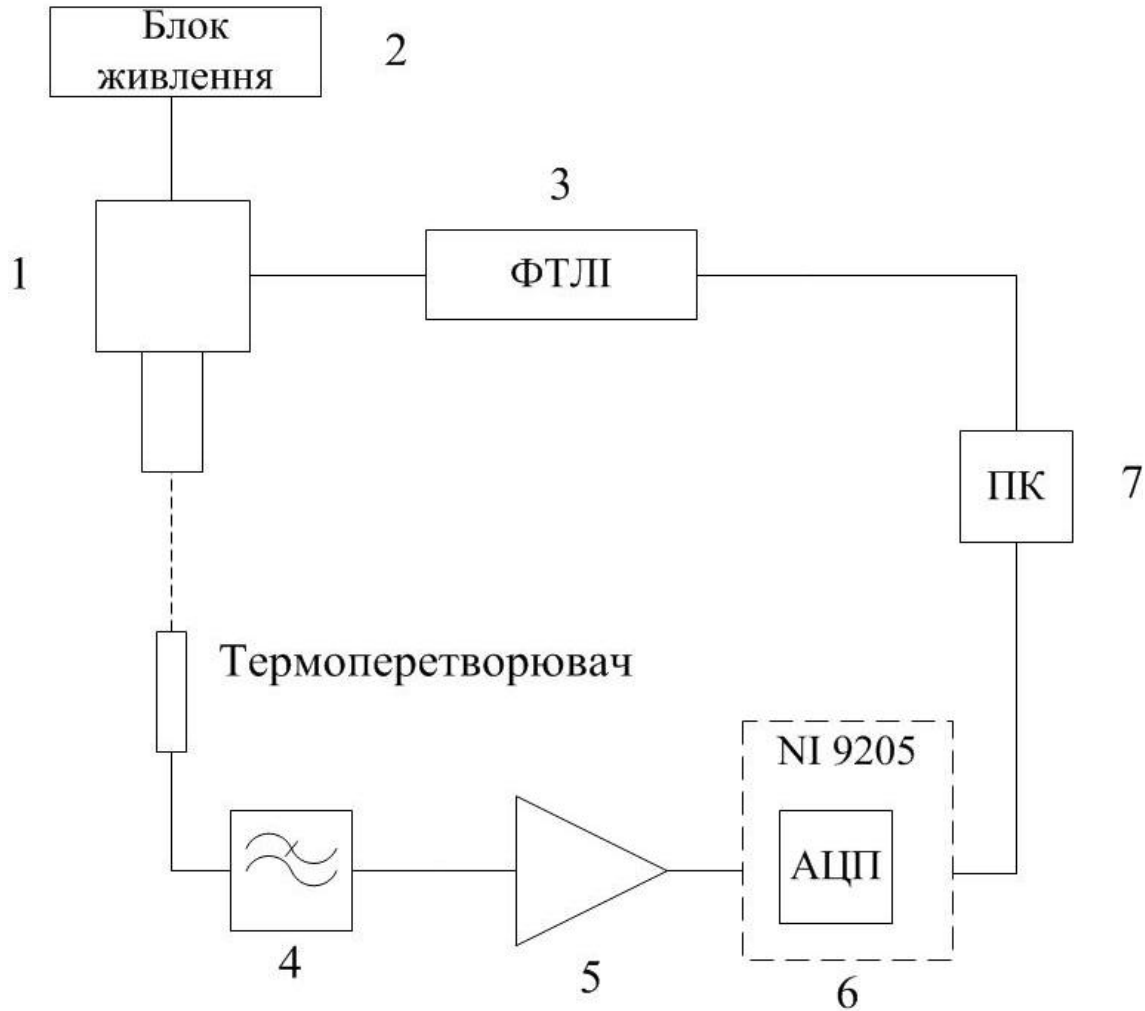


Рис. 1. Схема експериментального стенду. 1 – генератор оптичного випромінювання; 2 – блок живлення; 3 – формувач тривалості лазерного імпульсу (ФТЛІ); 4 – фільтр нижніх частот; 5 – підсилювач; 6 – модуль збору даних NI-9205; 7 – персональний комп'ютер (ПК)

Управління стендом, а також збір та опрацювання отриманих даним проводились за допомогою програмного забезпечення написаного на мові програмування *LabVIEW* [11].

Для досліджень була використана термопара типу *C* (вольфрам/реній-5, вольфрам/реній-26), з діапазоном температури – 0 – 2320°C. На рис. 3 наведено одну з реалізацій перехідної характеристики термопари в нормованому вигляді.

Використовуючи мову програмування *Python* [12] та створені на її основі програмні модулі для наукових розрахунків та візуалізації:

SciPy [13], *NumPy* [14], *Matplotlib* [15] була проведена нелінійна апроксимація отриманих даних відповідно до методу викладеного вище.

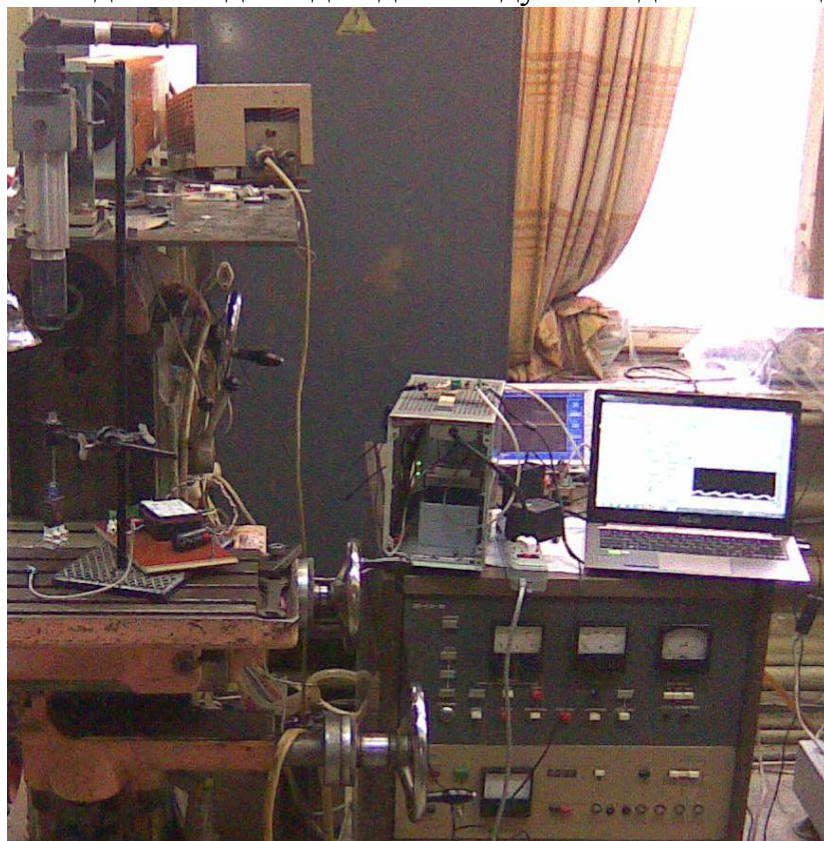


Рис. 2. Експериментальний стенд

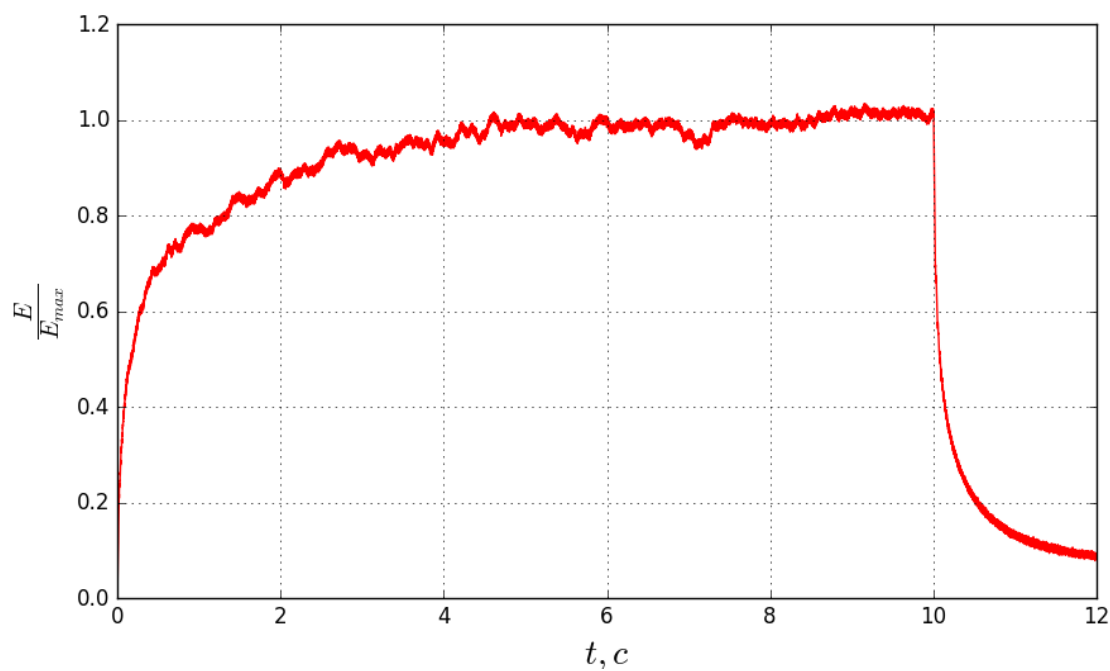


Рис. 3. Нормована перехідна характеристика термопарі типу С

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

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

Підставляючи значення τ в рівняння (5) і прийнявши $k=1$ отримаємо передавальну функцію термопари типу С:

$$W(p) = \frac{1}{(1,630p + 1)(0,136p + 1)(0,012p + 1)(0,004p + 1)}.$$

Висновки

Запропонований в даній статті метод має практичне значення при ідентифікації динамічних характеристик термоперетворювачів різних типів, в широкому діапазоні температур і значень постійних часу термоперетворювачів. Отримані перехідні характеристики містять всю необхідну інформацію для ідентифікації динамічних характеристик термоперетворювачів. Моделі передавальних функцій, отримані даним методом, можна використати для вирішення зворотної задачі вимірювання – знаходження поточної температури вхідного імпульсу за поточним значенням вихідної термоЕРС в перехідному режимі. Даний метод дозволяє підвищити точність вимірювання швидкозмінних високотемпературних процесів.

Список використаної літератури

1. *Hashemian H. M.* Maintenance of process instrumentation in nuclear power plants / H. M. Hashemian. – Springer, 2006. – 308 p.
2. Ідентифікація статичних та динамічних характеристик термоперетворювачів : автореф. дис ... канд. техн. наук : 05.11.04 / Володимир Петрович Столярчук . – Львів : Б.в., 2012 . – 19 с.
3. *Park S. J.* A new method in varying flow Experiments in Fluids for measuring time constants of a thermocouple wire states / S. J. Park, S. T. Ro // Experiments in Fluids. – 1996, - № 21. – P. 380-386.
4. *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.
5. *Carroll R. M.* Measurement of the transient response of thermocouples and resistance thermometers using an in situ method / R. M. Carroll, R. L. Shepard // ORNL/TM-4573. – 2007. – 52 p.
 6. А.с. 909592 СССР, МКИЗ G 01 K 15/00. Устройство для определения динамических и статических характеристик непогружаемых термоприемников [Текст] / В. Т. Стадник, Е. И. Фандеев, Г. А. Луцаев (СССР). - № 2970522/18 10; заявл. 30.07.80; опубл. 28.02.82, Бюл. № 8. – 4 с.
 7. Пат. 95326 UA, МПК G01P 21/00 (2015.01) Спосіб прямого визначення динамічних характеристик термоперетворювачів [Текст] / Болонов М. І., Чупіс Д. А., Кузнецов Д. М. ; заявник Донецький національний університет. - № u 2014 05589 ; заявл. 26.05.2014 ; опубл. 25.12.2014, Бюл. № 24, 2014.
 8. Research on measuring time constant of NANMAC thermocouple / Feng Hao [et al.] / Journal of Measurement Science and Instrumentation. – China: 2014. – 5(4). – P. 1-4.
 9. Туз. Ю. М. Автоматизація аналізу вимірювальних пристроїв [Текст]: Монографія / Ю. М. Туз, Ю. С. Шумков, О. В. Козир // За заг. ред. Ю. М. Туза. – К.: «Корнійчук», 2014. – 172 с.
 10. *Балакирев В. С.* Экспериментальное определение динамических характеристик промышленных объектов управления / В. С. Балакирев и др. – М.: «Энергия», 1967. – 232 с.
 11. *Sumathi S.* LabVIEW based advanced instrumentation systems/ S. Sumathi, P. Surekha. – Springer, 2007. – 741 p.
 12. *G. Van Rossum*, Python tutorial, Technical Report CS-R9526, Centrum voor Wiskunde en Informatica (CWI), Amsterdam, May 1995.
 13. *Jones E, Oliphant E, Peterson P, et al.* SciPy: Open Source Scientific Tools for Python, 2001-, <http://www.scipy.org/>.
 14. *Stéfan van der Walt, S. Chris Colbert and Gaël Varoquaux.* The NumPy Array: A Structure for Efficient Numerical Computation, Computing in Science & Engineering, 13, 22-30 (2011), DOI:10.1109/MCSE.2011.37.
 15. *John D. Hunter.* Matplotlib: A 2D Graphics Environment, Computing in Science & Engineering, 9, 90-95 (2007), DOI:10.1109/MCSE.2007.55.