

УДК 681.3

DOI: <http://dx.doi.org/10.20535/0203-3771342017130269>

О. В. Козир¹, асистент

ВІДНОВЛЕННЯ ФОРМИ ТЕМПЕРАТУРНОГО ІМПУЛЬСУ ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТОДУ ДЕКОНВОЛЮЦІЇ

En

The technique to restore temperature impulse shape from thermocouple measurements is proposed.

In most cases to measure temperature the contact techniques are used. Thermocouples are one of the most widely used temperature measurement devices due to their robustness, ease of manufacturing and low cost. However, thermocouple using in harsh environment requires the increasing of wire diameters and consequently the measurement bandwidth is reduced. In many applications signal restoration techniques are needed to recover the true temperature from the attenuated measurements. Also, many applications require the availability of fast response temperature sensors.

To remove the thermocouple effect on the measurement results the compensation method is proposed. Compensation involves two stages: thermocouple identification is followed by the temperature reconstruction. Reconstruction is a process of restoring the unknown temperature from thermocouple outputs using deconvolution technique. Deconvolution is made in time domain.

This paper describes compensation technique based on deconvolution to address loss of high-frequency signal components using the measurements from thermocouple. In particular, filtration of thermocouple output signal and restored signal is proposed. The result clearly shows that the inclusion of signal filtration increases signal to noise ratio. This technique does require a priori knowledge of the thermocouple impulse response function.

The quality estimation of the thermocouple input signal reconstruction is obtained.

The effectiveness of deconvolution method in time domain for solving the inverse problem of determining the temperature impulse shape is demonstrated.

Ru

В статье рассмотрено использование метода восстановления температурного импульса при измерении температуры термопарой. Инерционность термопарных преобразователей ограничивает их применение для измерения динамической температуры. Влияние термопары на измерительный сигнал моделируется сверткой температурного импульса и импульсной характери-

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

стики термопары. Для восстановления формы искаженного сигнала температуры применяется фильтр с импульсной характеристикой обратной к характеристике термопары. Процесс восстановления определяется сверткой импульсной характеристики фильтра и сигнала термопары. Для этого использован метод деконволюции во временной области. Поскольку восстановление сигнала по измеренным данным является некорректно поставленной задачей, дополнительно применяются методы повышения отношения сигнал-шум.

Вступ

Згідно із [1], частка вимірювання температури у промисловості складає 40 % усіх вимірювань. Це пояснюється як впливом температури на якість виходу багатьох технологічних процесів, на процеси горіння і детонації, а з іншого боку температура є одним із основних факторів, який впливає на точність вимірювання інших фізичних величин.

Вимірювання миттєвих значень температури високотемпературних газових потоків потребує використання не інерційних первинних перетворювачів. Проте, найчастіше, температуру газових потоків вимірюють за допомогою термопар. Дані перетворювачі характеризуються значною тепловою інерцією. Це обмежує роздільну здатність перетворювача. Єдиним рішенням для покращення роздільної здатності є вимірювання температури термопарою у перехідному режимі її роботи, із наступним розрахунком дійсної температури. Для цього потрібно наперед мати динамічну модель термопари. Динамічні моделі реальних об'єктів отримують використовуючи методи ідентифікації систем. Наявні методи ідентифікації термопар мають значні недоліки, які викликані труднощами створення вхідних температурних сигналів стандартної форми.

Звідси впливає необхідність дослідження динамічних характеристик термопар і розробки методики відновлення значення температури за значенням термоелектрорушійної сили (термоЕРС) термопари у перехідному режимі її роботи, у разі відносно невисоких значень температури чутливого елемента термопари.

Вирішенням задач динамічних вимірювань займалися багато вітчизняних вчених. У [2] розглянуто використання методу наближеного розв'язання оберненої задачі вимірювання для відновлення вхідного сигналу датчика тиску за даними про вихідний сигнал та інформації про вид моделі вхідного сигналу та датчика, у вигляді його імпульсної характеристики. Сутність методу полягає у застосуванні методів глобального випадкового пошуку екстремуму для мінімізації функціоналу середньоквадратичного відхилення реального сигналу на виході датчика від розрахункового сигналу, отриманого згорткою моделей вхідного сигналу та імпульсної характеристики датчика. Якщо інформація про форму вхідного сигналу відсутня, то не можливо оцінити параметри моделей вхідного сигналу та імпульсної характеристики з достатньою для вимірювань точністю. Тому для

правильного використання цього методу потрібно провести ідентифікацію вимірювального перетворювача.

Постановка задачі

Метою статті є дослідження використання методів вирішення зворотної задачі вимірювання для визначення миттєвих значень температури під час динамічних вимірювань.

У разі вимірювання температури термопарою, відомими є значення термоЕРС, що отримані під час вимірювання температури та статична характеристика термопари у вигляді апроксимаційного поліному залежності термоЕРС від температури у статичному режимі роботи термопари. Оскільки для вимірювання високих температур (близько 2000°C) і значного тиску чутливий елемент термопари має значну масу, то постійна часу таких термопар становить декілька секунд. Для урахування теплової інерційності термопари потрібно провести її ідентифікацію. Створення еталонних вхідних сигналів на вході термопари є надзвичайно складним завданням. У роботах [3-4] запропоновані методи ідентифікації термопар за рахунок використання радіоімпульсу струму та лазерного випромінювання. Дані методи дозволяють провести ідентифікацію термопар на основі визначення їх перехідної характеристики. На вибір методу вирішенні зворотної задачі вимірювання впливає вид математичної моделі термопари та умови вимірювань.

Відновлення форми температурного імпульсу

Відновлення форми вхідного імпульсу температури за значеннями термоЕРС та даними про імпульсну характеристику термопари є розповсюдженою задачею під час динамічних вимірювань. Схема відновлення зображена на рис. 1. Вхідний температурний імпульс, $\theta(t)$ вимірюється термопарою із імпульсною характеристикою $h(t)$. Результатом вимірювання є термоЕРС $e(t)$. Цей сигнал складається із інформативної частини $y(t)$, яка є реакцією термопари на вхідну дію температури та не інформативної частини — шуму $n(t)$. Застосовуючи методи ідентифікації систем [3-4] отримується оцінка імпульсної характеристики термопари $\hat{h}(t)$. Задача відновлення вхідного сигналу належить до категорії розв'язання обернених задач вимірювання. Для відновлення форми температурного імпульсу існують різні методи вирішення обернених задач. Використання кожного методу залежить від конкретної задачі вимірювання. Застосовувавши алгоритм відновлення отримують оцінку вхідного температурного імпульсу $\hat{\theta}(t)$.

У випадку, коли постійна часу термопарі менша за час зміни значення температури, тобто коли термопара знаходиться у термодинамічній рівновазі з об'єктом вимірювання, відновлення форми температурного імпульсу є досить простою задачею. Для цього використовують статичну характеристику термопарі, яка є поліноміальним рівнянням. Підставляючи значення термоЕРС у рівняння отримують оцінку температури на вході термоперетворювача із певною статичною похибкою.

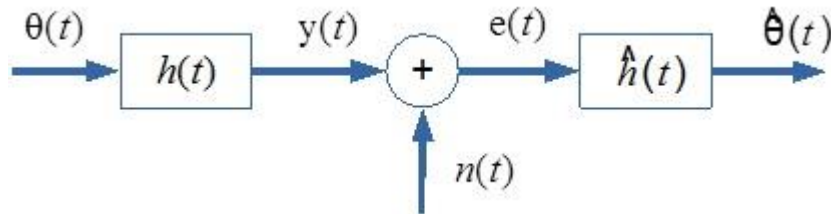


Рис. 1. Схема динамічного вимірювання температури термопарою

Динамічні вимірювання температури вносять додаткову динамічну похибку у результат вимірювання. Дана похибка виникає через теплову інерційність термопарі. У випадку динамічних вимірювань термопара знаходиться в перехідному режимі і не досягає термодинамічної рівноваги. Тому для отримання оцінки значення температури потрібно використовувати динамічну модель термопарі.

Існують різні динамічні моделі систем. Для цілей чисельного оцінювання значення вхідного сигналу часто використовують імпульсну характеристику.

У першому наближенні, термопару можна описати лінійною стаціонарною системою. Процес вимірювання температури, у цьому випадку, описується рівнянням згортки:

$$e(t) = \int_0^t \theta(\tau) h(t - \tau) d\tau. \quad (1)$$

Оскільки, вихідний сигнал термопарі (термоЕРС), представлений у дискретній формі, то для цілей моделювання використовують лінійне дискретне рівняння згортки:

$$e[i] = \sum_{k=0}^i \theta[k] h[i - k]. \quad (2)$$

Пряма задача — знаходження реакції термопарі на відомий вхідний сигнал, за відомої імпульсної характеристики системи. У часовій області можна замінити рівняння (2) використовуючи оператор згортки:

$$e(t) = \theta(t) \cdot h(t). \quad (3)$$

Для виконання оберненої задачі знаходження температури $\theta(t)$, за відомого значення термоЕРС $e(t)$ та імпульсної характеристики $h(t)$ термопар, потрібно розробити фільтр, імпульсна характеристика якого є оберненою до імпульсної характеристики термопар $h^{-1}(t)$. Застосовуючи цей фільтр до значень термоЕРС можна знайти значення температури. Цю процедуру описує рівняння:

$$e(t) \cdot h^{-1}(t) = \theta(t) \cdot h(t) \cdot h^{-1}(t) = \theta(t). \quad (4)$$

Оскільки зворотна задача є, в загальному випадку, некоректно поставленою, то вираз $h(t) \cdot h^{-1}(t)$ не завжди буде дорівнювати одиниці. Будь-які похибки в оцінці імпульсної характеристики фільтру $h^{-1}(t)$ приведуть до значних похибок у відновленому сигналі.

У реальних вимірюваннях будь-який сигнал на виході термопар буде містити похибки, які, в загальному випадку, можна описати як шум. Тоді рівняння (3) міститиме адитивний шум

$$e(t) = \theta(t) \cdot h(t) + n(t). \quad (5)$$

У цьому випадку $h^{-1}(t)$ фільтру повинен не тільки коригувати вплив термопар на вхідний сигнал, але також враховувати шум який міститься у термоЕРС.

$$e(t) \cdot h^{-1}(t) = (\theta(t) \cdot h(t) + n(t)) \cdot h^{-1}(t) = \hat{\theta}(t). \quad (6)$$

Наявний шум у сигналі термоЕРС багаторазово підсилиться у разі виконання згортки із фільтром і результатний сигнал $\hat{\theta}(t)$ буде повністю спотворений і не відповідатиме вхідному сигналу $\theta(t)$.

Застосування цього методу для відновлення динамічної температури потребує знання імпульсної характеристики термопар із найменшою похибкою. Сигнал термоЕРС потрібно відфільтрувати для зменшення шуму або апроксимувати із використанням методу найменших квадратів. Також після відновлення сигналу температури його потрібно обробити для позбавлення від похибок, які виникли під час використання даної процедури.

Результати математичного моделювання

Проведемо відновлення сигналу температури з використанням викладеного методу. В якості вхідного імпульсу температури виберемо модифіковане рівняння Гауса (7).

$$\theta(t) = \theta_0 e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (7)$$

де θ_0 – амплітуда температурного імпульсу. Для зручності розрахунків приймемо $\theta_0 = 1$. Сам імпульс є частиною досить великої вибірки (рис. 2). Для цього до і після імпульсу додано нулі. Величина вибірки $n = 10000$ точок. Тривалість вимірювання — 3 с. Частота дискретизації — 0,001 с.

Термопару опишемо використовуючи імпульсну характеристику. У якості моделі візьмемо експонентне рівняння із однією постійною часу, яка дорівнює $\tau = 0,5$. Нормалізуємо рівняння прийнявши, що $\frac{h_0}{\tau} = 1$.

$$h(t) = \frac{h_0}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (8)$$

Із метою моделювання візьмемо вибірку імпульсної характеристики, що дорівнює вибірці температурного сигналу.

Комп'ютерне моделювання проведемо із використанням мови програмування *Python* [5] і бібліотек для наукових розрахунків та візуалізації *SciPy*, *Numpy* [6] та *Matplotlib* [7].

Процес вимірювання температури термопарою моделюємо використовуючи лінійне дискретне рівняння згортки (2). Дана процедура реалізована у модулі *signal* бібліотеки *SciPy* функцією *convolve*. На рис. 2 зображено сигнал термоЕРС $e(t)$ після виконання функції *convolve*. Оскільки ми розглядаємо ідеальний випадок, то термоЕРС не містить шуму і цей сигнал ми використовуємо для відновлення значення температури. Для цього використаємо функцію *deconvolve*. Дана функція використовується у якості операції зворотної до операції згортки для відновлення вхідного сигналу у разі відомої імпульсної характеристики системи.

На рис. 2 зображено приклад відновлення вхідного сигналу у разі використання методу деконволюції, для випадку сигналу термоЕРС без шуму. На рис. 2 θ – вхідний температурний імпульс; e – виміряний сигнал термоЕРС; $\hat{\theta}$ – відновлений вхідний сигнал, δ_θ – приведена похибка відновлення сигналу, що розраховується за формулою:

$$\delta_\theta = \frac{|\theta - \hat{\theta}|}{|\theta_{amp}|},$$

де θ_{amp} – амплітуда вхідного сигналу. Відповідно до прийнятих параметрів моделі імпульсу температури $\theta_{amp} = 1$.

Наведена похибка відновлення температурного імпульсу без урахування шуму у сигналі термоЕРС відповідає похибці числових розрахунків.

Для відтворення умов реального вимірювання використаємо рівняння (5, 6). Сигнал термоЕРС об'єднується із шумом за нормальним законом розподілу. Параметри розподілу, $\mu = 0$, $\sigma = 0,001\theta_{amp}$ (рис. 3).

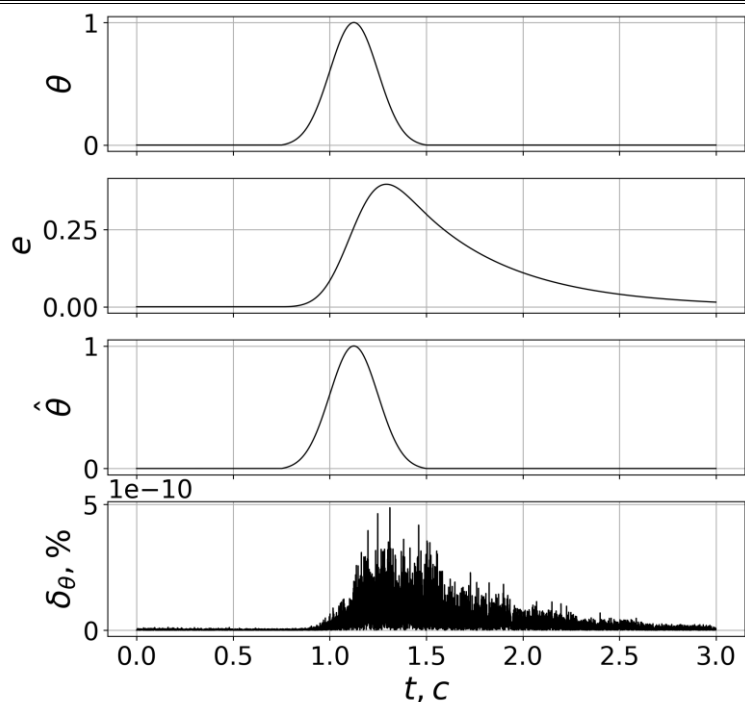


Рис. 2. Моделювання відновлення імпульсу температури методом деконволюції

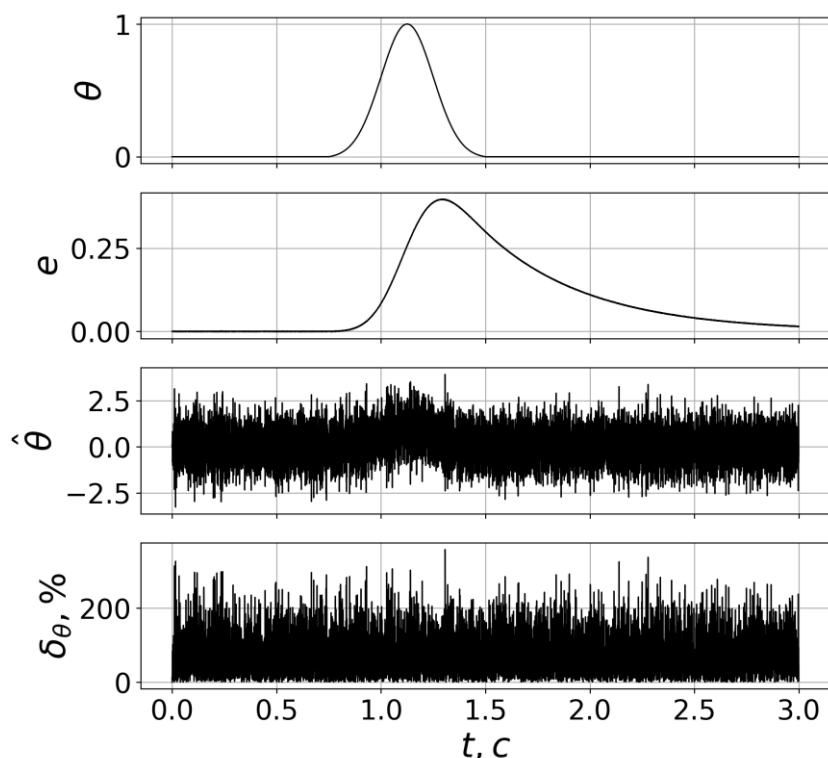


Рис. 3. Відновлення імпульсу температури за наявності незначного шуму у сигналі термоЕРС

Як бачимо із рис. 3 наявність навіть незначних похибок у сигналі термоЕРС не дозволяє відновити вхідний температурний імпульс, навіть у разі точно відомої імпульсної характеристики термопар. Для рішення цієї

задачі позбавимось від шуму у сигналі термоЕРС. Можливі два підходи до вирішення задачі. Перший полягає у фільтруванні сигналу. Другий, у використанні методів апроксимації. Скористаємось першим підходом. Для цього використаємо фільтр Савіцького-Голея [7-8]. Даний фільтр є різновидом методів згладжування сигналів. Згладжування відбувається шляхом побудови апроксимаційних поліномів для послідовних наборів сусідніх точок. Для побудови поліномів використовується метод найменших квадратів.

На рис. 4 зображено результат відновлення сигналу температурного імпульсу. Після використання фільтру і проведення деконволюції відновлений сигнал містить шум. Для збільшення відношення сигнал-шум застосуємо фільтр Савіцького-Голея до відновленого сигналу. У результаті, приведена похибка відновлення імпульсу температури склала 5 % (рис. 4).

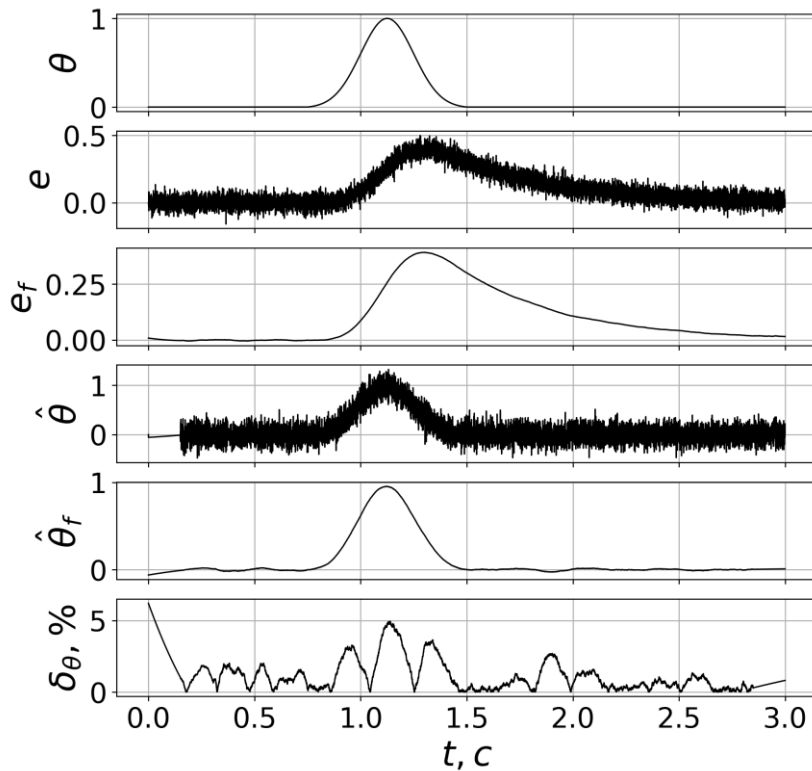


Рис. 4. Відновлення імпульсу температури з використанням фільтру Савіцького-Голея

Даний метод є ефективним у разі відомої імпульсної характеристики терморпарі. Для зменшення похибки відновлення температурного імпульсу можна використовувати метод нелінійної апроксимації. У якості моделі сигналу термоЕРС потрібно використовувати експонентне рівняння. У статі імпульсна характеристика терморпарі мала одну сталу часу. Але для реальних терморпар модель системи може містити декілька сталих часу у залежності від конструктивних особливостей терморпарі. Тому рівняння терморпарі міститиме декілька експонент.

Висновки

Розглянуто метод відновлення вхідного температурного імпульсу під час вимірювання температури термопарою. Дана методика є простою у використанні та базується на застосуванні відомих алгоритмів, які реалізовані програмно у відкритих бібліотеках, таких як *NumPy* та *SciPy*. У основі цієї методики покладено метод деконволюції сигналу термоЕРС та імпульсної характеристики термопари. Метод деконволюції можна застосовувати тільки для ідеального сигналу без шуму. Тому у даному методі відновлення вхідного сигналу додатково застосовувався фільтр Савицького-Голя.

Список використаної літератури

1. Луцик Я. Т. Вимірювання температури: теорія і практика. / Я. Т. Луцик, О. П. Гук, О. . Лах, Б. . Стадник. – Львів: Видавництво «БескидБіт», 2006. – 560 с.
2. 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.
3. 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.
4. 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>.
5. Travis E. Oliphant. Python for Scientific Computing, Computing in Science & Engineering, **9**, 10-20 (2007), DOI:10.1109/MCSE.2007.58 .
6. 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.
7. John D. Hunter Matplotlib: A 2D Graphics Environment, Computing in Science & Engineering, **9**, 90-95 (2007), DOI:10.1109/MCSE.2007.55.
8. Savitzky A. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures / A. Savitzky, M. J. Golay // Anal. Chem. - 1964. Vol. 36. 1627–1639 pp.
9. Madden H. Comments on the Savitzky-Golay convolution method for least squares fit smoothing and differentiation digital data / H. Madden // Anal. Chem. 1978. Vol. 50. 1383–1386 pp.