

УДК 614.8

В. О. Дурсєв, к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0002-7981-6779)

В. В. Олійник, д.т.н., доцент, нач. каф. (ORCID 0000-0002-5193-1775)

С. М. Бондаренко, к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0002-4687-1763)

О. А. Антошкін, к.т.н., доцент, ст. викл. каф. (ORCID ID 0000-0003-2481-2030)

М. В. Маляров, к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID ID 0000-0002-4052-7128)

М. М. Мурін, к.т.н., доцент, викл. каф. (ORCID 0000-0002-9898-0128)

Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна

РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТЕПЛООВОГО ПОЖЕЖНОГО СПОВІЩУВАЧА З ТЕРМОПАРОЮ

Розроблено математичну модель теплового пожежного сповіщувача чутливим елементом якого є термопара, що ураховує залежність електрорушійної сили від температури. Отримані динамічні рівняння ураховують параметри конвекційного теплообміну, термоелектричні показники спаїв, залежність електропровідності та електрорушійної сили термопари від температури, склад, форму, структуру матеріалу чутливого елемента на параметри його роботи. Математичною моделлю є система рівнянь теплового балансу та рівняння залежності електрорушійної сили від температури. Характерною особливістю моделі є урахування впливу складу, форми та структури матеріалу чутливого елемента сповіщувача на параметри його роботи. Рівняння ідентифікуються як реальні пропорційні ланки. Електрорушійна сила та температура навколишнього середовища представлені у вигляді відносних змінних, а інерційність сповіщувача та його параметр посилення виступають постійними коефіцієнтами. Динамічні рівняння є зручними при проведенні досліджень роботи та параметричних розрахунків характеристик спрацювання теплових пожежних сповіщувачів з термопарою, з урахуванням залежності електрорушійної сили спаю термопари від температури. Результати отримані по представленій моделі роботи сповіщувача підтверджують справедливість прийнятої гіпотези, а розраховані параметри спрацювання сповіщувача мають якісне співпадіння з експериментальними даними. Обмеженням застосування моделі є використання при відомих даних температурних залежностей електропровідності спаю термопари, параметрів та умов температурного впливу та визначених характеристик складу, форми та структури чутливого елемента. Рекомендацією покращення характеристик спрацювання є збільшення площі та зменшення маси спаю термопари для покращення умов конвекційного теплообміну, для покращення інерційності, часу та температури спрацювання.

Ключові слова: сповіщувач, чутливий елемент, математична модель, термопара, постійна часу, параметри спрацювання, інерційність

1. Вступ

Застосування теплових пожежних сповіщувачів, чутливим елементом яких є термопара обумовлено зручністю експлуатації, високою швидкодією та надійністю. Не останню роль є низька вартість в комбінації з високими динамічними властивостями.

Чутливим елементом сповіщувача виступає термопара з принципом залежності електрорушійної сили від температури навколишнього середовища. Хімічні компоненти, що входять до матеріалу спаїв напівпровідників термопари, їх концентрація, структура сплаву, конструктивне виконання, варіанти застосування та діапазони роботи істотно впливають на показання та параметри спрацювання термопар. Слід відмітити, що технічна документація пожежних сповіщувачів практично не містить інформації щодо технічних даних чутливих елементів. Відсутність чисельних зна-

чень динамічних параметрів вносить складність в процес дослідження роботи сповіщувачів, особливо в умовах швидкої зміни температури навколишнього середовища. Для покращення якості застосування сповіщувачів потрібно моделювати їх роботу та проводити дослідження параметрів спрацювання та динамічних характеристик термопари в умовах зміни температури та особливостей їх застосування. Тобто, важливим є дослідження параметрів спрацювання таких пожежних сповіщувачів.

Тому актуальним є проведення досліджень направлених на розробку математичної моделі пожежних сповіщувачів, чутливим елементом яких є термопара з урахуванням залежності електрорушійної сили від температури, та впливу складу, форми і структури матеріалу чутливого елемента на параметри спрацювання сповіщувача.

2. Аналіз літератури та постановка проблеми

В [1] наведені результати досліджень електропровідності та електрорушійної сили для сплавів системи AlCoCrCuFeNi в діапазонах робочих температур 1350–1500 °С. Наведені рівняння залежності електропровідності та електрорушійної сили від температури в лінійній постановці. Показані графічні залежності даних параметрів від температури. Проте, в роботі не розглядалась можливість застосування досліджувальних речовин в якості чутливих елементів в пристроях контролю температури. Рівняння динаміки також не розглядалися в якості результатів досліджень.

В [2] наведено метод виміру термоелектрорушійної сили для матеріалів на основі титану. Визначено та наведено результати аналізу впливу методів обробки матеріалів на їх термоелектричні властивості. Визначено основні показники впливу на електрорушійну силу при зміні напруженого стану зразків досліджень. Наведені графічні результати досліджень залежності електрорушійної сили від температури. Проте математичних залежностей електрорушійної сили від температури не наведено.

В [3] розглянуто новий тип багатошарової тонкоплівкової термопари з широкими перспективами застосування. Наведено результати температурних досліджень представлених зразків та змодульовано залежності термоелектричних властивостей. Рівнянь динаміки для дослідження параметрів роботи термопари не наведено.

В [4] наведено результати дослідження надійності роботи тонкоплівкових термопар, що працюють в умовах високих температур. Досліджувалися процеси термічного навантаження термопар та зміни їх показань при зміні температури середовища в діапазоні більше 1000 °С. Показано залежність надійності термопар від матеріалів та умов експлуатації. Залежностей електрорушійної сили від температури в роботі не наведено.

В [5] представлено результати досліджень тонкоплівкових багатошарових термопар. Наведено результати термічних властивостей термопар при зміні умов експлуатації в умовах температур вище 1000 °С. Досліджувалися параметри надійності термопар в умовах напруженого стану. Наведено залежності термоелектрорушійної сили в залежності від стану напруги. Проте в роботі відсутні результати, щодо застосування параметрів електрорушійної сили при зміні температур без урахування механічних дефектів.

В [6] представлено результати дисертаційних досліджень з підвищення точності виміру температури при застосуванні термопар. Розглянуто шляхи та напрями, щодо вдосконалення математичних моделей термопар для визначення ди-

намічних параметрів їх роботи. Досліджувалися та визначалися напрями покращення математичних і динамічних моделей термопар та застосування типових сигналів для визначення динамічних характеристик термопар та оцінки похибок їх показань. Наведено експериментальні результати визначення динамічних характеристик термопар при застосуванні частотних методів аналізу. Проте відсутні рівняння, що дозволяють проводити дослідження динамічних параметрів термопар.

В [7] розглянуто вихідні сигнали термопар в умовах розігріву струмом синусної форми. Проводилося визначення динамічних параметрів термопар. Наведено результати з дослідження температури термопар при зміні умов нагріву. Наведено рекомендації, щодо зменшення погрішностей вимірів. Проте в роботі не приводяться моделі термопар та рівняння динаміки їх роботи.

В [8] наведено спосіб визначення динамічних параметрів роботи термопар з застосуванням частотних характеристик при зміні температури електричним струмом синусної форми. В роботі відмічається, що отримана таким чином електрорушійна сила являє собою комбінацію постійної величини та гармонік відповідного порядку. Показано структурну модель, що моделює процеси в термопарі при проходженні в ній електричного струму. Приведений метод дослідження та визначення сталих часу термопар. Але рівняння динаміки, що дозволяють проводити параметричні дослідження сталих часу, коефіцієнтів посилення та параметрів спрацювання термопар не наведено.

В [9] представлено результати моделювання та отримані перехідні характеристики при різних значеннях інерційності термопар. Показано шляхи підвищення точності показань термопар. Показано результати впливу значень інерційності на параметри роботи термопар. Проте серед результатів досліджень роботи термопар відсутні рівняння динамік, що дозволяють аналізувати їх роботу.

В [10] розглянуто та представлено результати тестування термопар з різною інерційністю спрацювання. Розроблено методику визначення інерційності термопар в залежності від величини та умов зміни температури. Представлені результати з визначення інерційності термопар дозволяють проводити вибір оптимальних параметрів спрацювання термопар. Показано, що результати розрахунків мають задовільну точність при розрахунках інерційності термопар в різних діапазонах робочих температур. Рівнянь динаміки для дослідження параметра інерційності не наведено.

В [11] виконана оцінка впливу умов нагріву на похибку показань термопар. Оцінювався вплив на параметри виміру способів підключення термопар. Представлено методи корекції інерційності термопар. Розглянуто варіанти розміщення термопар в різних умовах зміни температури. Проте рівнянь динаміки для оцінки параметрів спрацювання термопар не наведено.

В [12] представлено метод дослідження та визначення параметрів спрацювання теплових пожежних сповіщувачів при відомих рівняннях динаміки та динамічних параметрах чутливого елемента. Сповіщувачі з термопарою в якості чутливого елемента в роботі не розглядалися.

Моделювання роботи пожежних сповіщувачів, параметричні дослідження динамічних характеристик та параметрів спрацювання, проводилося з застосуванням програм VisSim та Maple [13]. Слід відмітити, що наведені програми не містять в собі готових рішень щодо моделей пожежних сповіщувачів з різними чутливими елементами. Тому застосування наведених програм проводиться коли моделі сповіщувача вже сформовані.

Отже, невирішеною частиною проблеми покращення ефективності роботи системи автоматичного контролю і спостереження та автоматики раннього виявлення надзвичайних ситуацій, є розробка математичної моделі пожежних сповіщувачів, чутливим елементом яких є термопара з урахуванням залежності електрорушійної сили від температури, та впливу складу, форми і структури матеріалу чутливого елемента на параметри спрацювання сповіщувача.

3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи є покращення параметрів спрацювання систем протипожежного захисту за рахунок моделювання роботи теплового пожежного сповіщувача з принципом залежності електрорушійної сили від температури, при дослідженні залежності параметрів спрацювання від динамічних характеристик чутливого елемента.

Для досягнення означеної мети потрібно вирішити наступні завдання:

- скласти математичну модель сповіщувача з урахуванням параметрів чутливого елемента;
- отримати динамічне рівняння сповіщувача та провести дослідження параметрів спрацювання.

4. Матеріали та методи досліджень

Об'єктом дослідження є залежність електрорушійної сили на спаях термопари від температури. Предметом дослідження є моделювання роботи теплового пожежного сповіщувача в умовах залежності параметрів спрацювання від динамічних характеристик чутливого елемента. Гіпотезою процесу дослідження є припущення рівномірного прогріву спаїв термопари чутливого елемента при визначені електрорушійної сили.

Розробка структурно-динамічної моделі пожежного сповіщувача виконана з застосуванням пакету VisSim. Дослідження залежності електрорушійної сили при зміні температури з урахуванням структури матеріалу чутливого елемента, виконувалися з застосуванням додатку Maple. Параметричні дослідження спрацювання пожежного сповіщувача проводилося з урахуванням зміни електрорушійної сили при визначені інерційності, постійної часу, динамічної температури та часу спрацювання при визначених швидкостях росту температури з застосуванням пакетів програм Maple та VisSim.

5. Складання математичної моделі сповіщувача

Математичний опис у вигляді динамічної ланки для теплового пожежного сповіщувача чутливим елементом якого є термопара, можна отримати з системи рівнянь для нестационарного теплообміну.

Нестационарним вважаємо процес теплообміну, для якого відношення термічного опору тіла до термічного опору теплоносія, згідно з критерієм Біо: $Bi > 0,1$, де

$$Bi = \frac{\delta/\lambda}{1/\alpha}, \quad (1)$$

де δ – характерний розмір тіла, м; α – коефіцієнт тепловіддачі, $Вт \cdot м^{-2} \cdot К^{-1}$; λ – коефіцієнт теплопровідності тіла, $Вт \cdot м^{-1} \cdot К^{-1}$.

У випадку, коли $Bi < 0,1$, характерним буде рівномірний розподіл температури всередині тіла. Тоді у кожен момент часу температура для всіх точок тіла чутливого елемента однакова.

Графічна схема для розрахунків параметрів спрацьовування теплового пожежного сповіщувача з термопарою в якості чутливого елемента (ДПС-038), представлена на рис. 1.

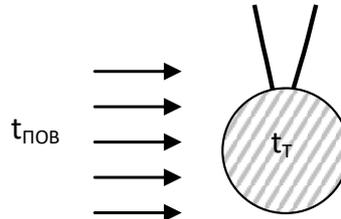


Рис. 1. Графічна модель теплового пожежного сповіщувача з термопарою

Модель роботи сповіщувача складається з рівняння теплового балансу, що ураховує кількість тепла, переданого та поглиненого його чутливим елементом. Також до моделі сповіщувача потрібно включити рівняння, що описує залежність електрорушійної сили чутливого елемента при зміні його температури.

За проміжок часу dt чутливому елементу передається кількість теплоти

$$dq = \alpha \cdot F \cdot (T - T_T) \cdot dt, \quad (2)$$

де q – теплота, Дж; F – площа поверхні, m^2 ; T – температура повітря, К; T_T – температура термопари, t – час, сек.

Кількість поглиненої енергії чутливим елементом

$$dq = C \cdot m \cdot dT_T, \quad (3)$$

де C – теплоємність термопари, $Дж \cdot кг^{-1} \cdot K^{-1}$; m – маса спаю термопари, кг.

Дорівнюємо праві частини рівнянь (1, 2)

$$C \cdot m \cdot dT_T = \alpha \cdot F \cdot (T - T_T) \cdot dt; \quad (4)$$

$$C \cdot m \cdot \frac{dT_{ТП}}{dt} = \alpha \cdot F \cdot (T - T_T). \quad (5)$$

В нескінченно малих відхиленнях

$$C \cdot m \cdot d \cdot \frac{dT_T}{dt} = \alpha F (dT - dT_T); \quad (6)$$

$$C \cdot m \cdot d \cdot \frac{dT_T}{dt} + \alpha F dT_T = \alpha F dT. \quad (7)$$

Лінеаризоване методом повного диференціалу (7) має вигляд

$$C \cdot m \cdot \Delta \dot{T}_T + \alpha \cdot F \cdot \Delta T_T = \alpha \cdot F \cdot \Delta T. \quad (8)$$

Для спаїв на основі AlCoCrCuFeNi в діапазоні робочих температур $20 \div 100^\circ\text{C}$, зміна електрорушійної сили чутливого елемента термопарі пропорційна зміні температури гарячого спаю

$$de = k \cdot dT_T, \quad (9)$$

де e – електрорушійна сила, В; где: k – коефіцієнт Зеєбека, $\text{В}\cdot\text{К}^{-1}$.

Лінеаризоване рівняння (9) має вигляд

$$\Delta e = k \Delta T_T. \quad (10)$$

Згідно з [1], для спаїв на основі AlCoCrCuFeNi в діапазоні робочих температур $>100^\circ\text{C}$, залежність електрорушійної сили від температури має лінійний вигляд

$$e = e_\sigma + \frac{de}{dT} (T - T_\sigma); \quad (11)$$

$$de = \frac{e - e_\sigma}{T - T_\sigma} dT, \quad (12)$$

де e_σ – величина електрорушійної сили при $T=T_\sigma$, В; T_σ – температура що визначається електропровідністю матеріалу, К; σ – величина електропровідності матеріалу спаю термопарі, $\text{Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$.

Таким чином, математична модель теплового пожежного сповіщувача, чутливим елементом якого є термопара зі спаїв на основі AlCoCrCuFeNi, являє собою систему рівнянь (7, 9), та (7, 12) для різних діапазонів робочих температур. В моделі ураховано баланс тепла на чутливому елементі та залежність електрорушійної сили контакту термопарі від його температури.

6. Отримання динамічного рівняння сповіщувача та проведення дослідження параметрів спрацювання

Для отримання динамічного рівняння теплового пожежного сповіщувача з термопарою, об'єднаємо рівняння математичної моделі.

Для системи рівнянь (7, 9)

$$\frac{C \cdot m}{k} \cdot d \cdot \frac{de}{dt} + \frac{\alpha \cdot F}{k} de = \alpha \cdot F \cdot dT. \quad (13)$$

Замінімо диференціали малими відхиленнями та перейдемо до відносних змінних

$$\frac{C \cdot m}{k} \cdot \Delta e + \frac{\alpha \cdot F}{k} \Delta e = \alpha \cdot F \cdot \Delta T; \quad (14)$$

$$\bar{e} = \frac{\Delta e}{e_0}; \dot{\bar{e}} = \frac{\dot{\Delta e}}{e_0}; \bar{T} = \frac{\Delta T}{t_0}, \quad (15)$$

де \bar{e} , $\dot{\bar{e}}$, \bar{T} – відносні змінні; e_0 – значення електрорушійної сили термопари у вихідній точці, В; T_0 – значення температури повітря у вихідній точці, К.

В стандартному вигляді рівняння динаміки термопари (14) має вид

$$T_{\text{ТП}} \dot{\bar{e}} + \bar{e} = K_{\text{ТП}} \bar{T}, \quad (16)$$

де:

$$T_{\text{ТП}} = \frac{C \cdot m}{\alpha \cdot F}; K_{\text{Т}} = k \cdot \frac{T_0}{e_0}, \quad (17)$$

де $T_{\text{ТП}}$ – постійна часу термопари, с; $K_{\text{ТП}}$ – коефіцієнт посилення термопари.

Для системи рівнянь (7, 12)

$$Cm \frac{T - T_{\sigma}}{e - e_{\sigma}} \cdot d \frac{de}{dt} + \alpha F \frac{T - T_{\sigma}}{e - e_{\sigma}} \cdot de = \alpha F \cdot dT; \quad (18)$$

$$Cm \frac{T - T_{\sigma}}{e - e_{\sigma}} \cdot \Delta \dot{e} + \alpha F \frac{T - T_{\sigma}}{e - e_{\sigma}} \cdot \Delta e = \alpha F \cdot \Delta T. \quad (19)$$

В стандартному вигляді рівняння динаміки термопари (19) має вид

$$T_{\text{ТП}} \dot{\bar{e}} + \bar{e} = K_{\text{ТП}} \bar{T}, \quad (20)$$

де:

$$T_{\text{ТП}} = \frac{C \cdot m}{\alpha \cdot F}; K_{\text{ТП}} = k \cdot \frac{e - e_{\sigma}}{T - T_{\sigma}}, \quad (21)$$

де $T_{\text{ТП}}$ – постійна часу термопари, с; $K_{\text{ТП}}$ – коефіцієнт посилення термопари.

Таким чином, отримані динамічні рівняння (16, 20) описують роботу теплового пожежного сповіщувача, чутливим елементом якого є термопара, з урахуванням залежності величини електрорушійної сили чутливого елемента від температури. Рівняння являють собою реальну позиційну ланку, що стикується з результатами досліджень [6] та сприяє зручності досліджень роботи пожежного сповіщувача. Рівняння ураховують теплоємність, масу, площу поверхні матеріалу чутливого елемента термопари, умови теплообміну, якість поглинання тепла на поверхні термопари, діапазон робочих температур.

Використовуючи динамічні параметри роботи сповіщувача (17, 21) визначимо параметри спрацювання теплового пожежного сповіщувача, застосовуючи метод [12]

$$T_{\text{СП}} = \frac{60 \cdot (T_{\text{ДИН}} - T_{\text{СТАТ}})}{\frac{dT}{d\tau} \cdot K_{\text{СП}}}; \quad (22)$$

$$T_{\text{ДИН}} = \frac{60 T_{\text{СТАТ}} + K_{\text{СП}} T_{\text{СП}} \cdot \frac{dT}{d\tau}}{60}; \quad (23)$$

$$\tau_{\text{СПР}} = \frac{60 \cdot (T_{\text{СТАТ}} - T_0) + T_{\text{СП}} \frac{dT}{dt}}{\frac{dT}{dt}}, \quad (24)$$

де $T_{\text{СП}}$ – постійна часу (інерційність) пожежного сповіщувача, сек; $T_{\text{ДИН}}$ та $T_{\text{СТАТ}}$ – динамічна і статична температури спрацювання сповіщувача, К; $\tau_{\text{СПР}}$ – час спрацювання сповіщувача, сек; dT/dt – швидкість зростання температури, К·сек⁻¹.

Результати розрахунків параметрів спрацювання пожежного сповіщувача, а саме інерційності, часу та динамічної температури спрацювання, виконаних для (17) та (21), представлено в табл.1 та рис. 2.

Табл. 1. Параметри спрацювання пожежного сповіщувача

(dT/dt) , °C/хв	0,2	5	10	20	30
$T_{\text{СТАТ ЕКСП}}$ [12], °C	63				
$T_{\text{ДИН}}$ для моделі (7, 9) рівняння (17), °C		66,1	69,4	72,3	74,6
$T_{\text{ДИН}}$ для моделі (7, 12) рівняння (21), °C		65,8	67,4	71,3	75,7
$\tau_{\text{СПР}}$ для моделі (7, 9) рівняння (17), сек		307	205	101	75
$\tau_{\text{СПР}}$ для моделі (7, 12) рівняння (21), сек		290	195	88	55
$T_{\text{СП}}$, сек		15			

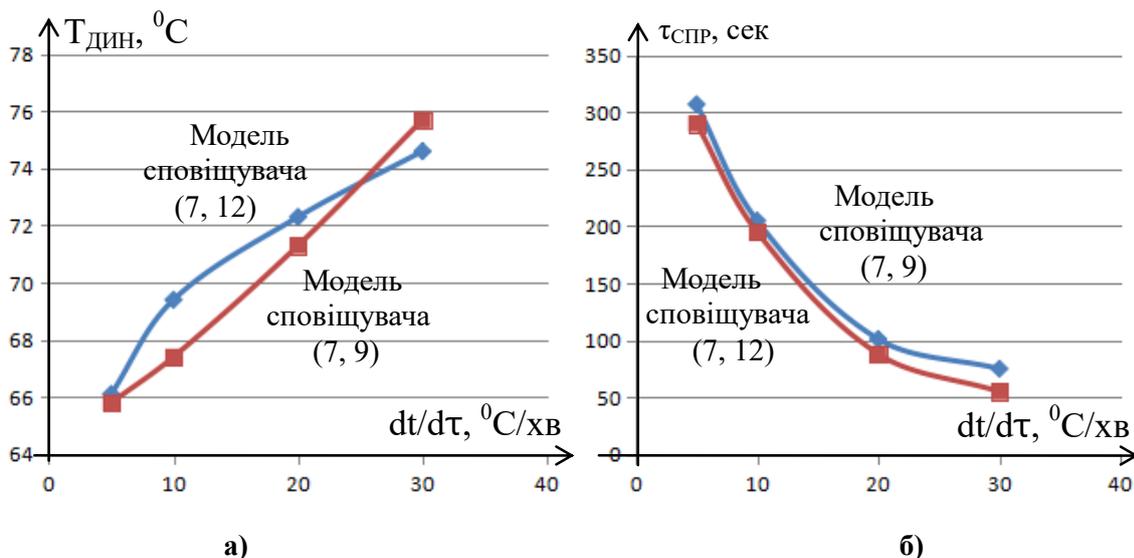


Рис. 2. Параметри спрацювання пожежного сповіщувача: а – динамічна температура спрацювання; б – час спрацювання

Отже, в результаті моделювання роботи теплового пожежного сповіщувача чутливим елементом якого є термопара, отримано динамічне рівняння і виконано параметричне дослідження характеристик спрацювання сповіщувача. Рівняння має вигляд інерційної позиційної ланки першого порядку, записане у відносних змінних з постійними коефіцієнтами.

В отриманих динамічних рівняннях ураховано залежність електрорушійної сили від температури для діапазонів робочих температур термопари $20 \div 100$ °C (16, 17) та > 100 °C (20, 21). Також отримані динамічні рівняння ураховують склад, форму та структуру матеріалу чутливого елемента сповіщувача.

Рівняння динаміки відповідають [6] та є зручними при проведенні досліджень

роботи та параметричних розрахунків характеристик спрацювання теплових пожежних сповіщувачів з термопарою. Отримані в розрахунках величини динамічної температури та часу спрацювання відрізняється від значень отриманих в експериментах на величину менше 5 %.

7. Обговорення результатів дослідження впливу матеріалу контактів на параметри спрацювання сповіщувача

В якості математичної моделі роботи теплового пожежного сповіщувача чутливим елементом якого є термопара, розроблено систему рівнянь, що урахує залежність електрорушійної сили від температури. Характерною особливістю розробленої моделі є урахування впливу складу, форми та структури матеріалу чутливого елемента сповіщувача на параметри його роботи.

Відмінною ознакою представленої математичної моделі є урахування властивостей чутливого елемента, що раніше не досліджувались, а саме склад, форму та структуру матеріалу для спаїв на основі AlCoCrCuFeNi в діапазоні робочих температур $20 \div 100$ °C та більше 100 °C. При порівнянні розробленої математичної моделі теплового пожежного сповіщувача з термопарою з відомими моделями, що ураховують залежність електрорушійної сили від температури, представлена модель сповіщувача урахує склад, форму та структуру спаїв термопари, та температурний діапазон роботи сповіщувача. Для спаїв на основі AlCoCrCuFeNi в діапазоні робочих температур $20 \div 100$ °C, математична модель роботи сповіщувача урахує: площу поверхні гарячого спаю термопари F ; теплоємність C , яка характеризується відсотковим складом AlCoCrCuFeNi-компонентів гарячого спаю термопари; температуру середовища T ; коефіцієнт тепловіддачі α ; характерний розмір тіла δ ; коефіцієнт теплопровідності λ ; масу спаю термопари m ; температуру термопари T_T ; електрорушійну силу e ; коефіцієнт Зеєбека k ; кількість теплоти, що поглинута з навколишнього середовища термопарою q ; час впливу теплоти t . Для спаїв на основі AlCoCrCuFeNi в діапазоні робочих температур >100 °C, математична модель роботи сповіщувача урахує: площу поверхні гарячого спаю термопари F ; теплоємність C , яка характеризується відсотковим складом AlCoCrCuFeNi-компонентів гарячого спаю термопари; температуру середовища T ; коефіцієнт тепловіддачі α ; характерний розмір тіла δ ; коефіцієнт теплопровідності λ ; масу спаю термопари m ; температуру термопари T_T ; електрорушійну силу e ; коефіцієнт Зеєбека k ; кількість теплоти, що поглинута з навколишнього середовища термопарою q ; час впливу теплоти t ; величину електрорушійної сили, що залежить від електропровідності матеріалу спаю термопари e_σ ; температуру що визначається електропровідністю матеріалу спаю термопари T_σ ; величину електропровідності матеріалу спаю термопари σ .

Визначені динамічні рівняння пожежного сповіщувача дозволяють урахувати властивості матеріалу спаїв термопари та залежність їх електрорушійної сили від температури. Рівняння ідентифікуються як реальні пропорційні ланки. Електрорушійна сила та температура навколишнього середовища представлені у вигляді відносних змінних, а інерційність сповіщувача та його параметр посилення виступають постійними коефіцієнтами. Динамічні рівняння є зручними при проведенні досліджень роботи та параметричних розрахунків характеристик спрацювання теплових пожежних сповіщувачів з термопарою, з урахуванням залежності електрорушійної сили спаю термопари від температури. Результати моделювання мають якісне співпадіння з результатами експериментальних даних.

Отримані результати підтверджують, що електрорушійна сила спаїв термопари визначається комплексним урахуванням впливу складу, форми, структури та величини електропровідності матеріалу спаю термопари при зміні температури середовища.

Обмеженням для застосування розроблених моделей є можливість їх використання виключно при відомих значеннях температурних залежностей електропровідності спаю термопари, параметрів та умов температурного впливу та визначених характеристик складу, форми та структури чутливого елемента. У якості недоліку представленої моделі, вважаємо також відсутність можливості урахувати гармонійні складові величини електрорушійної сили при зміні параметрів струму на спаї термопари, та низький рівень зміни електрорушійної сили при зміні температури на одиниці градусів, що є системним недоліком даного принципу визначення температури.

Подальшим розвитком представленого методу розробки моделі пожежного сповіщувача з термопарою є визначення електричних параметрів спаю при початковій температурі, рівня електрорушійної сили та її зміни в більш широкому діапазоні робочих температур. Це дозволить підвищити універсальність математичної моделі сповіщувача і зручність в дослідженні параметрів його спрацювання. Проте, такий підхід веде до значного ускладнення моделі сповіщувача через потребу урахування більшої кількості нелінійних величин, перехід до лінійної форми яких являє собою окрему складну задачу. В той же час, це дозволить моделювати роботу теплового сповіщувача для більш широкого набору умов теплового впливу, а отримані результати покращать методи аналізу роботи елементів пожежної сигналізації. Погрішності таких результатів можуть зрости, що в свою чергу негативно вплине на якість досліджень.

Таким чином результати, отримані по представленій моделі роботи сповіщувача, підтверджують справедливість прийнятої гіпотези, а розраховані параметри спрацювання сповіщувача відрізняється від значень отриманих в експериментах на величину менше 5 %. Отже, поставлена в роботі мета вважається досягнутою, а отримані результати досліджень доцільно застосувати для вибору оптимальних динамічних характеристик та параметрів спрацювання перспективних пожежних сповіщувачів.

8. Висновки

1. Розроблено математичну модель теплового пожежного сповіщувача з чутливим елементом якого є термопара, що урахує залежність електрорушійної сили від температури. Спаї термопари складаються з AlCoCrCuFeNi-компонентів. Теоретичними розрахунками визначено, а експериментальними даними підтверджено, що при дослідженні умов теплового впливу на характеристики спрацювання теплового сповіщувача, наряду з параметрами конвекційного теплообміну, термоелектричними показниками контактів чутливого елемента, залежністю електропровідності та електрорушійної сили термопари від температури, модель сповіщувача повинна урахувати вплив складу, форми та структури матеріалу чутливого елемента на параметри його роботи.

Модель роботи сповіщувача зі спаями на основі AlCoCrCuFeNi в діапазоні робочих температур $20 \div 100$ °C урахує 12 факторів: площу поверхні гарячого спаю; теплоємність що характеризується відсотковим складом AlCoCrCuFeNi-компонентів гарячого спаю; температуру середовища; коефіцієнт тепловіддачі;

характерний розмір тіла; коефіцієнт теплопровідності; масу спаїв; температуру термопари; коефіцієнт Зеєбека; кількість поглинутої теплоти; час теплового впливу; електрорушійну силу. Для спаїв на основі AlCoCrCuFeNi в діапазоні робочих температур >100 °C, модель сповіщувача ураховує 15 факторів: площу поверхні гарячого спаю; теплоємність що характеризується відсотковим складом AlCoCrCuFeNi-компонентів гарячого спаю; температуру середовища; коефіцієнт тепловіддачі; характерний розмір тіла; коефіцієнт теплопровідності; масу спаїв; температуру термопари; електрорушійну силу; коефіцієнт Зеєбека; кількість поглинутої теплоти; час теплового впливу; температуру характерної електропровідності спаю; величину електрорушійної сили, що залежить від електропровідності спаю; електропровідність спаю.

2. Отримано динамічне рівняння пожежного сповіщувача, проведено досліджено параметрів його спрацювання. Рівняння ураховують вплив параметрів конвекційного теплообміну, електропровідності, електрорушійної сили, склад, форму та структуру матеріалу чутливого елемента на характеристики спрацювання теплового пожежного сповіщувача. Результати моделювання мають якісне співпадіння з результатами експериментальних даних. Рекомендацією покращення характеристик спрацювання сповіщувача є потреба збільшення площі та зменшення маси гарячого спаю термопари для покращення умов конвекційного теплообміну. Доцільне ураховання електричних параметрів спаю при початковій температурі, рівня електрорушійної сили та її зміни в діапазоні $100\div 150$ °C робочих температур.

Література

1. Дуфанець М., Плевачук Ю., Склярчук В. Електропровідність і термоерс високоентропійних сплавів системи AlCoCrCuFeNi у рідкому стані. *Journal of physics studies*. 2021. Vol. 25(3). P. 36011–36017. doi: 10.30970/jps.25.3601
2. Loskutov S. V., Mishchenko V. H., Hreshta V. L., Seidametov S. V., Kharchenko A. O. Dependence of Thermoelectric Characteristics on the Structural Parameters of Metals, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2024. Vol. 46(12). P. 1149–1161. doi: 10.15407/mfint.46.12.1149
3. Xue Y., Wang Y., Lei D., Sun Y. A Study on the Interface Diffusion of In₂O₃/ITO Multilayer Thin-Film Thermocouple. *Key Engineering Materials Submitted*. 2021. Vol. 905. P. 174–183. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.905.174
4. Hu T., Wang J., Xi Y., Sun Y. Research on Failure Mechanism and Thermal Stress of Thin-Film Thermocouple at High Temperature. *Key Engineering Materials Submitted*. 2021. Vol. 905. P. 184–191. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.905.184
5. Xi Y., Sun Y., Hu T., Zhao G. Thermal and Vibration Mechanical Reliability of Multicoat Compound Thin-Film Thermocouple. *Key Engineering Materials Submitted*. 2021. Vol. 881. P. 57–63. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.881.57
6. Козир О. В. Підвищення точності вимірювання температури коротких теплових імпульсів: дис. ... кандидата техн. наук: 05.01.02 / Козир Олег Васильович, 2021. 164 с. Url: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/8888af1f-34d3-4cb4-87ac-18ee3865f298/content>
7. Tuz Y., Kozyr O. Voltage spectral structure of the thermocouple with temperature dependent wires. *Український метрологічний журнал*. 2021. № 2. С. 73–76. doi: 10.24027/2306-7039.2.2021.236102
8. Tuz Y., Kozyr O., Samartsev Y. Features of temperature measurement of short thermal pulses. *Український метрологічний журнал*. 2021. № 1. С. 46–52. doi: 10.24027/2306-7039.1.2021.228237

9. Козир О. В., Туз Ю. М. Дослідження моделей перехідної характеристики термопари. Інформаційні системи, механіка та керування. 2019. № 20. С. 13–22. doi: 10.20535/2219-3804202019194307

10. Xu C., Hao X., Pei P., Wei T., Feng S. Research on Time Constant Test of Thermocouples Based on QNN-PID Controller. Sensors. 2025. Vol. 25. P. 3819. doi: 10.3390/s25123819

11. Kou Z., Wu R., Wang Q., Li B., Li C., Xunyan Y. Heat transfer error analysis of high-temperature wall temperature measurement using thermocouple Case Studies in Thermal Engineering. Vol. 59. 2024. P. 104518. doi: 10.1016/j.csite.2024.104518

12. Дурєєв В. О., Христич В. В., Бондаренко С. М., Маляров М. В., Корнієнко Р. В. Математична модель магнітоконтактного теплового пожежного сповіщувача. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2023. № 1(37). С. 31–43. doi: 10.52363/2524-0226-2023-37-3

13. Забара С. Моделювання систем у середовищі MATLAB. Університет «Україна», 2015. 137 с. Url: <https://www.yakaboo.ua/modeljuvannja-sistem-u-seredovischi-matlab.html>

V. Durieiev, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department

V. Oliinyk, PhD, Associate Professor, Head of the Department

S. Bondarenko, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department

O. Antoshkin, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department

M. Maliarov, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department

M. Murin, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department

National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine

DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL OF A THERMAL FIRE DETECTOR FROM A THERMOCOUPLE

A mathematical model of a thermal fire detector with a thermocouple as a sensitive element has been developed, which takes into account the dependence of the electromotive force on temperature. The obtained dynamic equations take into account the parameters of convection heat transfer, thermoelectric characteristics of the junctions, the dependence of the electrical conductivity and electromotive force of the thermocouple on temperature, the composition, shape, and structure of the material of the sensitive element on its operating parameters. The mathematical model is a system of heat balance equations and equations of the dependence of the electromotive force on temperature. A characteristic feature of the model is the consideration of the influence of the composition, shape, and structure of the material of the detector's sensitive element on its operating parameters. The equations are identified as real proportional links. The electromotive force and ambient temperature are presented in terms of relative variables, and the detector inertia and its gain parameter are constant coefficients. Dynamic equations are convenient when conducting studies of the operation and parametric calculations of the characteristics of the operation of thermal fire detectors with a thermocouple, taking into account the dependence of the electromotive force of the thermocouple junction on temperature. The results obtained from the presented model of the detector operation confirm the validity of the accepted hypothesis, and the calculated parameters of the detector operation have a qualitative coincidence with the experimental data. The limitation of the model is the use of known data of the temperature dependences of the electrical conductivity of the thermocouple junction, parameters and conditions of temperature influence and certain characteristics of the composition, shape and structure of the sensitive element. The recommendation for improving the operation characteristics is to increase the area and reduce the mass of the thermocouple junction to improve the conditions of convection heat transfer, to improve the inertia, time and temperature of operation.

Keywords: detector, sensitive element, mathematical model, thermocouple, time constant, operation parameters, inertia

References

1. Dufanets, M., Plevachuk, Yu., Skliarchuk, V. (2021). Elektroprovodnist i termoers vysokoentropiinykh splaviv systemy AlCoCrCuFeNi u rikdomu stani. *Journal of phisicfl studies*, 25(3), 36011–36017. doi.org/10.30970/jps.25.3601
2. Loskutov, S. V., Mishchenko, V. H , Hreshta, V. L., Seidametov, S. V., Kharchenko, A. O. (2024). Dependence of Thermoelectric Characteristics on the Structural Parameters of Metals, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol*, 46(12), 1149–1161. doi: 10.15407/mfint.46.12.1149
3. Xue, Y., Wang, Y., Lei, D., Sun, Y. (2021). A Study on the Interface Diffusion of In2O3/ITO Multilayer Thin-Film Thermocouple. *Key Engineering Materials Submitted*, 905, 174–183. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.905.174
4. Hu, T., Wang, J., Xi, Y., Sun, Y. (2021). Research on Failure Mechanism and Thermal Stress of Thin-Film. Thermocouple at High Temperature. *Key Engineering Materials Submitted*, 905, 184–191. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.905.184
5. Xi, Y., Sun, Y., Hu, T., Zhao, G. (2021). Thermal and Vibration Mechanical Reliability of Multicoat Compound Thin-Film Thermocouple. *Key Engineering Materials Submitted*, 881, 57–63. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.881.57
6. Kozyr, O. V. (2021). Pidvyshchennia tochnosti vymiriuvannia temperatury korotkykh teplovykh impulsiv: dys. ... kandydata tekhn. nauk: 05.01.02 / Kozyr Oleh Vasylovych, 164. Available at: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/8888af1f-34d3-4cb4-87ac-18ee3865f298/content>
7. Tuz, Y., Kozyr, O. (2021). Voltage spectral structure of the thermocouple with temperature dependent wires. *Ukrainskyi metrolohichnyi zhurnal*, 2, 73–76. doi: 10.24027/2306-7039.2.2021.236102
8. Tuz, Y., Kozyr, O., Samartsev, Y. (2021). Features of temperature measurement of short thermal pulses. *Ukrainskyi metrolohichnyi zhurnal*, 1, 46–52. doi: 10.24027/2306-7039.1.2021.228237
9. Kozyr, O., Tuz, Yu. (2019). Doslidzhennia modelei perekhidnoi kharakterystyky termopary. *Informatsiini systemy, mekhanika ta keruvannia*, 20, 13–22. doi: 10.20535/2219-3804202019194307
10. Xu, C., Hao, X., Pei, P., Wei, T., Feng, S. (2025). Research on Time Constant Test of Thermocouples Based on QNN-PID Controller. *Sensors*, 25, 3819. doi: 10.3390/s25123819
11. Kou, Z., Wu, R., Wang, Q., Li, B., Li, C., Xunyan, Y. (2024). Heat transfer error analysis of high-temperature wall temperature measurement using thermocouple Case Studies in Thermal Engineering, 59, 104518. doi: 10.1016/j.csite.2024.104518
12. Durieiev, V. O., Khrystych, V. V., Bondarenko, S. M., Maliarov, M. V., Korniienko, R. V. (2023). Matematychna model mahnitnokontaktneho teplovoho pozhezhnoho spovishchuvacha. *Problemy nadzvychnykh sytuatsii*, 1(37), 31–43. Available at: <http://pes.nuczu.edu.ua/images/arhiv/37/3.pdf> ISSN 2524-0226
13. Zabara, S. (2015). Modelyuvannya sistem u seredovishchi MATLAB. *Universitet Ukraïna*, 137. Available at: <https://www.yakaboo.ua/modeljuvannja-sistem-u-seredovischi-matlab.html>

Надійшла до редколегії: 16.09.2025

Прийнята до друку: 17.10.2025