

## Обґрунтування імпульсного методу визначення часового параметра пожежних сповіщувачів із терморезистивним чутливим елементом

Я. Я. Козак, Ю. О. Абрамов, О. Є. Басманов

*Стосовно до пожежних сповіщувачів із терморезистивним чутливим елементом здійснено обґрунтування імпульсного методу визначення їх часового параметра – постійної часу. Такий метод базується на використанні ефекту Джоуля-Ленца, який має прояв при протіканні імпульсу електричного струму через терморезистивний чутливий елемент пожежних сповіщувачів. Теплові процеси в такому чутливому елементі описуються математичною моделлю, яка належить до класу рівнянь математичної фізики. Рішення диференціального рівняння такого класу одержано із використанням інтегрального перетворення Ханкеля і представлено у вигляді ряду відносно функцій Бесселя. Одержане рішення використовується для побудови математичної моделі терморезистивного чутливого елемента у вигляді передаточної функції, яка має вигляд передаточні функції інерційної ланки. Для активації терморезистивного чутливого елемента пожежних сповіщувачів використовується одиночний імпульс електричного струму у формі прямокутного трикутника. Із використанням інтегрального перетворення Лапласа одержано математичний опис реакції терморезистивного чутливого елемента на теплову дію такого тест-впливу. Для одержання інформації стосовно часового параметра пожежних сповіщувачів із терморезистивним чутливим елементом використовується відношення його вихідних сигналів, які вимірюються в апіорі задані моменти часу. Одержано двопараметричний вираз для визначення часового параметра пожежних сповіщувачів та надано словесну інтерпретацію імпульсного методу для його визначення. При реалізації цього методу забезпечується інваріантність часового параметра пожежних сповіщувачів із терморезистивним чутливим елементом відносно амплітуди одиночного імпульсу електричного струму, а також відносно параметра, який входить до його коефіцієнта передачі.*

*Ключові слова: пожежний сповіщувач, терморезистивний чутливий елемент, ефект Джоуля-Ленца, часовий параметр.*

### 1. Вступ

Одним із радикальних шляхів по забезпеченню зменшення збитків від пожеж є ідентифікація небезпечних чинників пожежі на її початковій стадії. Найбільший ефект при виявленні таких чинників може бути одержаний тільки за допомогою автоматичних систем. Ефективність таких системах в першу чергу визначається ступенем досконалості технічних характеристик датчиків первинної інформації – пожежних сповіщувачів, а також ефективністю їх системи експлуатації [1]. Одним із різновидів пожежних сповіщувачів є теплові пожежні сповіщувачі. Система експлуатації таких сповіщувачів передбачає реалізацію

двох класів їх випробувань – стаціонарні або автономні випробування і оперативні або об'єктові випробування. Особливістю першого класу випробувань є те, що вони не розповсюджуються на пожежні сповіщувачі, які розміщені на об'єктах охорони. Для другого класу випробувань характерним є те, що при їх реалізації не визначаються оцінки їх параметрів і характеристик. Особливістю обох класів випробування теплових пожежних сповіщувачів є те, що вони не передбачають визначення такого часового параметра, як постійна часу. При цьому необхідно відмітити, що євростандартом EN-54 величина постійної часу теплових пожежних сповіщувачів нормується. Ці обставини обумовлюють необхідність створення теоретичних основ об'єктових випробувань теплових пожежних сповіщувачів, що забезпечують при їх реалізації одержання оцінок основних характеристик сповіщувачів.

Таким чином, актуальним є створення теоретичних основ із використанням можливостей, які витікають із принципів побудови теплових пожежних сповіщувачів. З цієї точки зору інтерес представляє використання ефекту Джоуля-Ленца стосовно до пожежних сповіщувачів із терморезистивним чутливим елементом.

## **2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми**

Серед фізичних концепцій, які використовуються для побудови теплових пожежних сповіщувачів, терморезистивний ефект займає одну із провідних позицій. Це обумовлено простотою реалізації та високою чутливістю [2] таких пристроїв.

Досконалість технічних характеристик пожежних сповіщувачів залежить від якості математичного забезпечення всіх етапів їх життєвого циклу. В [3] наведені результати дослідження в технологічному інституті ВПС Польщі (AFIT) по моделюванню динамічних властивостей пожежних сповіщувачів, які використовуються в системі пожежогасіння літаків. Але поза межами досліджень залишилось розв'язання задачі щодо ідентифікації параметрів пожежних сповіщувачів при їх роботі в різних режимах. Зокрема, на можливість варіації часу спрацьовування пожежних сповіщувачів вказується в [4]. Для послаблення цього ефекту автори пропонують збільшувати кількість пожежних сповіщувачів, але обґрунтування стосовно кількості таких пожежних сповіщувачів в роботі відсутнє. Крім того, в [5] відмічається, що такий підхід не є ефективним і веде до підвищення фінансових витрат. В [6] звертається увага на те, що час спрацьовування пожежних сповіщувачів визначається як характером і параметрами вхідного впливу, так і властивостями пожежного сповіщувача. Слід зазначити, що динамічні властивості теплових пожежних сповіщувачів повністю визначаються таким часовим параметром, як постійна часу. В переважній більшості робіт розглядається перша складова часу спрацьовування. Саме такий підхід використано в [7], де запропонована математична модель для опису динаміки температури навколишнього середовища в початковій стадії пожежі. Одержано рішення диференціального рівняння теплопередачі від середовища до датчика в типових температурних умовах. Результати досліджень використані для розрахунків часу спрацьовування декількох зрошувальних систем пожежогасіння. Але при цьому не розглядався вплив динамічних властивостей датчиків на час

спрацьовування таких систем. В [8] здійснювалось чисельне моделювання пожежі у вантажному відсіку літака DC-10 (США) із різною інтенсивністю вентиляції. Дослідження спрямовані на виявлення впливу параметрів умов пожежі на активацію пожежних сповіщувачів. Але динамічні властивості пожежних сповіщувачів при цих дослідженнях в явному вигляді не розглядалися. Автори [9] відмічають, що на час спрацьовування пожежного сповіщувача впливає тепловий потік від двигуна внутрішнього згоряння. Запропонований алгоритм роботи теплових пожежних сповіщувачів, в основі якого лежить вимірювання мінімальної статичної температури спрацьовування сповіщувача, а також величини швидкості зростання температури. Обґрунтованість такого підходу наведена в [10]. Слід зазначити, що загальним недоліком цих робіт є те, що в них не розглядається складова часу спрацьовування пожежних сповіщувачів, яка обумовлена його динамічними властивостями. Це стосується такого їх часового параметра, як постійна часу сповіщувачів. Аналогічний підхід має місце в [11], де розглядається інтелектуальна система виявлення пожежі на її початковій стадії. Така система була впроваджена в ботанічному парку Фарук Ялчин в Дариджа (Туреччина). Алгоритм роботи системи включає аналіз пожежі в реальному часі (швидкість розповсюдження вогню, напрямок розповсюдження), але при цьому не враховуються властивості детекторів. Це стосується і [12], в якій для одержання прогнозової оцінки часу спрацьовування пожежних сповіщувачів розроблена модель пожежі для її стійкої та квазістаціонарної фази. Для одержання оцінки часу спрацьовування сповіщувачів припускалось, що його часовий параметр не відрізняється в межах допуску від номінального значення. В [13] відмічається, що час спрацьовування пожежних сповіщувачів окрім параметрів та характеристик пожежі залежить від відстані до неї. На вугільній шахті NIOSH Safety Research Coal Mine, Брюсетон, Пенсільванія [14] проведена серія випробувань із використанням різних розмірів пожежі при різних швидкостях вентиляційного потоку і місцях загоряння. В результаті цих випробувань були одержані оцінки часу спрацьовування датчиків небезпечних чинників пожежі. В підсумку були визначені місця розташування таких датчиків. Зроблено висновок, що за результатами цих досліджень можуть бути обрані відповідні датчики пожежі. Але слід зазначити, що такий висновок може бути розповсюджений лише на тип датчиків, а не на їх параметри та характеристики. Зокрема, це стосується їх часових параметрів. В ряді робіт по проблематиці пожежних сповіщувачів звертається увага на їх хибне спрацьовування. В [15] вказується, що за два роки у Великобританії було зафіксовано понад 300 тисяч хибних спрацьовувань. Такі хибні спрацьовування є результатом неправильної установки, недбалого відношення до обслуговування, а також впливу навколишнього середовища та антропогенних факторів. Одним із варіантів по зменшенню числа хибних спрацьовувань є використання датчиків замість сповіщувачів [16] спільно із адаптивним методом обробки результатів вимірювань в багатосенсорній системі на базі багаточарового перцептрона. Недоліком такого підходу є те, що не передбачається діагностика датчиків первинної інформації. Інший варіант по зменшенню хибних спрацьовувань полягає в використанні нейронних мереж [17] або нечіткої логіки [18]. В першому випадку зменшення хибних спрацьовувань

забезпечується програмним шляхом за рахунок збільшення тривалості навчання. В другому випадку виявлення пожежі здійснюється шляхом прогнозування із використанням нечіткої логіки. Слід зазначити, що недоліком таких варіантів є те, що в ньому не враховується технічний стан датчиків первинної інформації. Перспективним є варіант, який передбачає визначення технічного стану пожежних сповіщувачів. Для цього доцільно проводити їх випробування, результатом яких повинно бути одержання оцінок їх основних характеристик [19]. В [19], а також [20] наводяться результати випробувань пожежних сповіщувачів, в ході яких були одержані оцінки одного з їх часових параметрів – часу спрацьовування. В [21] наведені результати одержання оцінок часу спрацьовування та індексу часу спрацьовування (RTI) для теплових пожежних сповіщувачів максимального типу. Всі ці випробування мають спільний недолік – при їх проведенні не визначається такий часовий параметр пожежного сповіщувача, як його постійна часу. Крім того, ці випробування належать до випробувань лабораторного типу, а їх реалізація в системі експлуатації пожежних сповіщувачів є проблематичною. Особливо це стосується випробувань пожежних сповіщувачів безпосередньо на об'єктах, що охороняються. Аналіз методів та засобів випробувань теплових пожежних сповіщувачів, який проведений в [22], свідчить про те, що:

- при проведенні стаціонарних або автономних випробувань визначається величина часу спрацьовування пожежних сповіщувачів (за допомогою теплових камер) і не визначається часовий параметр – постійна часу (але цей параметр нормується євростандартом EN-54);

- при проведенні оперативних або об'єктових випробувань в переважній більшості випадків не визначаються часові параметри пожежних сповіщувачів. Результатом таких випробувань, наприклад, згідно стандарту APSAD R7 (Франція) або стандарту BS 5839 1:2002 Clause 45.4 (Великобританія) є наявність факту спрацьовування сповіщувача.

Наведені дані свідчать про наявність проблеми, яка полягає в підвищенні ефективності системи експлуатації теплових пожежних сповіщувачів за рахунок вдосконалення методів та засобів їх випробувань. Одним із напрямків вирішення цієї проблеми є використання потенційних можливостей, які закладені в принципі побудови пожежних сповіщувачів. Зокрема, це стосується пожежних сповіщувачів, принцип дії яких оснований на використанні терморезистивного ефекту. Стосовно до такого типу пожежних сповіщувачів тепловий вплив на їх чутливий елемент при випробуваннях можливо здійснювати із використанням ефекту Джоуля-Ленца. Це відкриває можливості для проведення випробувань пожежних сповіщувачів такого типу безпосередньо на об'єктах, що охороняються.

### **3. Мета і завдання дослідження**

Метою роботи є обґрунтування методу визначення часового параметра пожежних сповіщувачів із терморезистивним чутливим елементом, в основі якого лежить використання ефекту Джоуля-Ленца при формуванні тестового впливу. Це дасть можливість проводити випробування пожежних сповіщувачів

такого типу безпосередньо на об'єктах, які охороняються, і повністю в автоматичному режимі.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити наступні задачі:

- одержати математичний опис теплових процесів, які мають місце в терморезистивному чутливому елементі пожежного сповіщувача при наявності внутрішнього джерела тепла внаслідок прояву ефекту Джоуля-Ленца;
- обґрунтувати структуру та параметри моделі терморезистивного чутливого елемента пожежних сповіщувачів в класі передаточних функцій;
- формалізувати за допомогою операторних математичних моделей терморезистивного чутливого елемента пожежного сповіщувача процедуру для реалізації методу визначення його часового параметра.

#### **4. Матеріали та методи дослідження**

При обґрунтуванні методу визначення часового параметра пожежних сповіщувачів із терморезистивним чутливим елементом використовуються математичні моделі в класі рівнянь математичної фізики та в операторній формі. Для розв'язання рівняння математичної фізики використовується інтегральне перетворення Ханкеля. При побудові моделі терморезистивного чутливого елемента пожежного сповіщувача в операторній формі, а також для математичного опису його реакції на теплову дію електричного струму використовується інтегральне перетворення Лапласа.

#### **5. Результати досліджень по обґрунтуванню метода визначення часового параметра пожежних сповіщувачів**

##### **5. 1. Математичний опис теплових процесів в терморезистивному чутливому елементі пожежного сповіщувача**

При протіканні електричного струму  $i(t)$  через терморезистивний чутливий елемент пожежного сповіщувача згідно із законом Джоуля-Ленца буде мати місце тепловий ефект. Внаслідок цього температура терморезистивного чутливого елемента буде змінюватись. Опис теплових процесів в такому чутливому елементі пожежного сповіщувача можна представити у вигляді диференціального рівняння:

$$\frac{\partial \theta(r, t)}{\partial t} = a \left[ \frac{\partial^2 \theta(r, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta(r, t)}{\partial r} \right] + \phi(r, t), \quad (1)$$

із початковими та граничними умовами

$$\theta(r, 0) = 0; \quad \frac{\partial \theta(0, t)}{\partial t} = 0; \quad \frac{\partial \theta(R, t)}{\partial r} = -h\theta(R, t), \quad (2)$$

де  $a$  – коефіцієнт температуропровідності терморезистивного чутливого елемента;  $h$  – відносний коефіцієнт теплообміну;  $R$  – радіус терморезистивного

чутливого елемента;  $\varphi(t)$  – функція, яка описує внутрішнє джерело тепла, що обумовлено тепловою дією електричного струму  $i(t)$

$$\phi(r, t) = K i^2(t); \quad (3)$$

$K = \text{const}$  – параметр.

В виразах (1) та (2) враховано, що

$$\theta(r, t) = T(r, t) - T_0, \quad (4)$$

де  $T(r, t)$ ,  $T_0$  – температура терморезистивного елемента та його початкова температура відповідно.

Якщо примінити інтегральне перетворення Ханкеля до диференційного рівняння (1), то воно буде трансформовано наступним чином

$$\frac{d\bar{\theta}\left(\frac{\mu_n}{R}, t\right)}{dt} = aH \left[ \frac{\partial^2 \theta(r, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta(r, t)}{\partial r} \right] + \bar{\phi}\left(\frac{\mu_n}{R}, t\right), \quad (5)$$

де

$$\bar{\theta}\left(\frac{\mu_n}{R}, t\right) = H[\theta(r, t)] = \int_0^R r J_0\left(\frac{\mu_n r}{R}\right) \theta(r, t) dr; \quad (6)$$

$$\bar{\phi}\left(\frac{\mu_n}{R}, t\right) = H[\phi(r, t)] = \int_0^R r J_0\left(\frac{\mu_n r}{R}\right) \phi(r, t) dr; \quad (7)$$

$\mu_n$  –  $n$ -й корінь трансцендентного рівняння

$$hR J_0(\mu) - \mu J_1(\mu) = 0; \quad (8)$$

$J_0(\mu)$ ,  $J_1(\mu)$  – функції Бесселя першого роду нульового та першого порядків відповідно;  $H$  – оператор інтегрального перетворення Ханкеля.

Після дворазового інтегрування по частинах адитивної складової в (5), врахування диференціального рівняння Бесселя відносно функції  $J_0(\mu_n r/R)$ , а також граничних умов (2) диференціальне рівняння (5) буде трансформовано до вигляду

$$\frac{d\bar{\theta}\left(\frac{\mu_n}{R}, t\right)}{dt} + a \left(\frac{\mu_n}{R}\right)^2 \bar{\theta}\left(\frac{\mu_n}{R}, t\right) = \frac{K h R^3 J_0(\mu_n)}{\mu_n^2} i^2(t). \quad (9)$$

Рішенням цього диференціального рівняння є

$$\bar{\theta}\left(\frac{\mu_n}{R}, t\right) = \frac{K h R^3 J_0(\mu_n)}{\mu_n^2} \times \int_0^t i^2(\varepsilon) \exp\left[-a\left(\frac{\mu_n}{R}\right)^2 (t - \varepsilon)\right] d\varepsilon. \quad (10)$$

Це рішення пов'язане із рішенням  $\theta(r, t)$  диференціального рівняння (1) через зворотне перетворення Ханкеля  $H^{-1}$  (формулу звернення)

$$\begin{aligned} \theta(r, t) &= H^{-1}\left[\bar{\theta}\left(\frac{\mu_n}{R}, t\right)\right] = \frac{2}{R^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\mu_n^2 J_0\left(\frac{\mu_n r}{R}\right) \bar{\theta}\left(\frac{\mu_n}{R}, t\right)}{J_0^2(\mu_n) [(hR)^2 + \mu_n^2]} = \\ &= 2khR \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0\left(\frac{\mu_n r}{R}\right)}{J_0(\mu_n) [(hR)^2 + \mu_n^2]} \times \int_0^t i^2(\varepsilon) \exp\left[-a\left(\frac{\mu_n}{R}\right)^2 (t - \varepsilon)\right] d\varepsilon. \end{aligned} \quad (11)$$

Внаслідок малих розмірів терморезистивного чутливого елемента пожежного сповіщувача доцільно використовувати усереднену по його об'єму температуру, тобто

$$\begin{aligned} \theta(t) &= \frac{2}{R^2} \int_0^R r \theta(r, t) dr = 4K(hR)^2 \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \mu_n^2 [(hR)^2 + \mu_n^2] \right]^{-1} \times \\ &\times \int_0^t i^2(\varepsilon) \exp\left[-a\left(\frac{\mu_n}{R}\right)^2 (t - \varepsilon)\right] d\varepsilon. \end{aligned} \quad (12)$$

Цей вираз є загальним при визначенні реакції терморезистивного чутливого елемента на теплову дію електричного струму, що протікає через нього.

## 5.2. Структура та параметри моделі терморезистивного чутливого елемента в класі передаточних функцій

Маючи на увазі, що пожежний сповіщувач є динамічним елементом системи виявлення небезпечних чинників пожежі, доцільно представляти модель терморезистивного чутливого елемента у вигляді передаточної функції

$$W(p) = L[\theta(t)] [L[i^2(t)]]^{-1}, \quad (13)$$

де  $L$  – оператор інтегрального перетворення Лапласа;  $p$  – комплексна змінна.

Для визначення передаточної функції (13) скористуємося виразом (12) за умови, що

$$i(t) = I \cdot 1(t), \quad (14)$$

де  $I = \text{const}$ ,  $1(t)$  – функція Хевісайда.

Вираз (12) при умові (14) має вигляд

$$\theta(t) = 4KI^2(hR)^2 R^2 a^{-1} \times \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \mu_n^4 \left[ (hR)^2 + \mu_n^2 \right] \right]^{-1} \left[ 1 - \exp \left[ -a \left( \frac{\mu_n}{R} \right)^2 t \right] \right]. \quad (15)$$

Із виразів (14) та (15) витікає, що

$$L[\theta(t)] = 4KI^2(hR)^2 R^2 (ap)^{-1} \times \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \mu_n^4 \left[ (hR)^2 + \mu_n^2 \right] \left[ \left( R\mu_n^{-1} \right)^2 a^{-1} p + 1 \right] \right]^{-1}, \quad (16)$$

$$L[i^2(t)] = I^2 p^{-1}, \quad (17)$$

внаслідок чого для передаточної функції  $W(p)$  буде мати місце вираз

$$W(p) = 4K \sum_{n=1}^{\infty} A_n \tau_n (\tau_n p + 1)^{-1}, \quad (18)$$

де  $A_n$  –  $n$ -й приведений коефіцієнт передачі терморезистивного чутливого елемента

$$A_n = (Bi)^2 \left[ \mu_n^2 \left[ (Bi)^2 + \mu_n^2 \right] \right]^{-1}; \quad (19)$$

$\tau_n$  –  $n$ -та постійна часу терморезистивного чутливого елемента

$$\tau_n = \left( R\mu_n^{-1} \right)^2 a^{-1}; \quad (20)$$

$Bi = hR$  – число Біо.

В табл. 1 наведені значення коренів  $\mu_n$  для  $Bi \leq 1,0$  при  $n=1..3$ .

Дані табл. 1 свідчать, що ряд (19) швидко збігається. Так, наприклад, при  $Bi=1,0$  величина коефіцієнта  $A_2$  складає 1,2 % від величини коефіцієнта  $A_1$ . Внаслідок цього із похибкою, величина якої не перевищує 1,2 %, вираз для (18) буде мати вигляд

$$W(p) = 4KA\tau (\tau p + 1)^{-1}, \quad (21)$$

де  $\tau$  – постійна часу, часовий параметр, який має опис



$$\tau = \tau_1 = \left( R \mu_1^{-1} \right)^2 a^{-1}; \quad (22)$$

$A$  – приведений коефіцієнт передачі, який має опис

$$A = A_1 = (Bi)^2 \left[ \mu_1^2 \left[ (Bi)^2 + \mu_1^2 \right] \right]^{-1}. \quad (23)$$

Для кореня  $\mu_1$  згідно табл. 1 можна записати

$$\begin{aligned} \mu_1 = & 2094,356 Bi^9 - 10615,079 Bi^8 + 23082,011 Bi^7 - 28124,999 Bi^6 - \\ & - 21037,731 Bi^5 - 9946,458 Bi^4 + 2947,796 Bi^3 - 524,212 Bi^2 + \\ & + 51,745 Bi - 1,630. \end{aligned} \quad (24)$$

Таблиця 1  
Значення коренів  $\mu_n$

$Bi$	$\mu_1$	$\mu_2$	$\mu_3$
0	0,0000	3,8317	7,0156
0,1	0,4417	3,8577	7,0298
0,2	0,6170	3,8835	7,0440
0,3	0,7465	3,9091	7,0582
0,4	0,8516	3,9344	7,0723
0,5	0,9408	3,9594	7,0864
0,6	1,0184	3,9841	7,1004
0,7	1,0893	4,0085	7,1143
0,8	1,1490	4,0325	7,1282
0,9	1,2048	4,0562	7,1421
1,0	1,2558	4,0795	7,1558

Об'єднання (23) та (24) дозволяє зробити висновок, що на інтервалі  $0,2 \leq Bi \leq 1,0$  величину  $4A$  із похибкою, яка не перевищує 4,6 %, можна прийняти рівною одиниці. На рис. 1 наведений графік залежності модуля похибки  $\delta = 4A - 1,0$  від числа  $Bi$ .

Внаслідок цього із похибкою, величина якої не перевищує 4,6 %, вираз для передаточної функції терморезистивного чутливого елемента пожежного сповіщувача буде мати вигляд

$$W(p) = K \tau (\tau p + 1)^{-1}. \quad (25)$$

Часовий параметр  $\tau$  повністю визначає динамічні властивості пожежного сповіщувача. Внаслідок цього в подальшому буде використовуватись термін

часовий параметр пожежного сповісчувача із терморезистивним чутливим елементом.

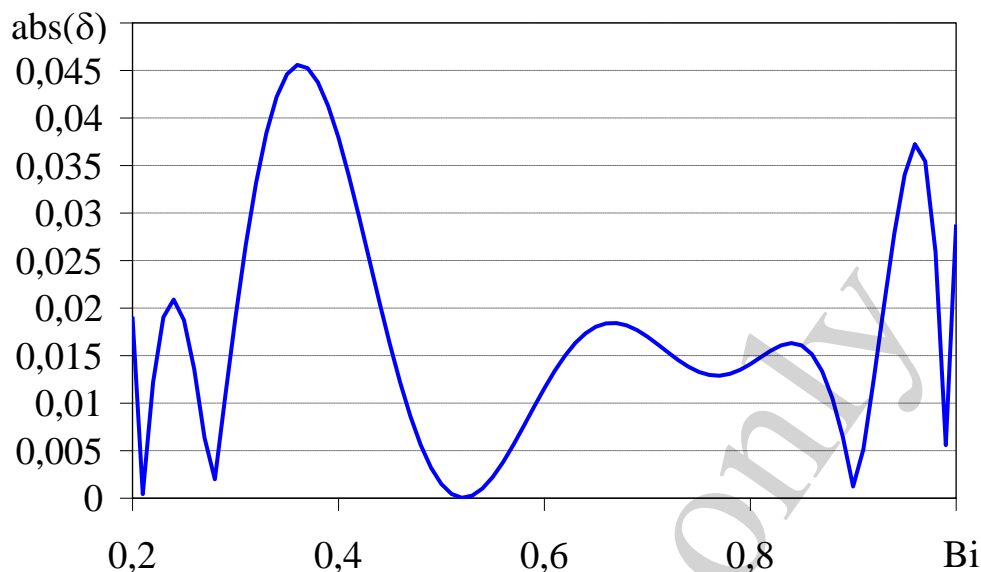


Рис. 1. Залежність модуля похибки розбіжності від числа  $Vi$

### 5. 3. Формалізація процедур для реалізації метода визначення часового параметра пожежних сповісчувачів

Для активізації пожежного сповісчувача в режимі його випробувань використовується тест-сигнал у вигляді імпульсу електричного струму

$$i(t) = I(1 - tt_0^{-1})[1(t) - 1(t - t_0)], \quad (26)$$

де  $I, t_0$  – амплітуда та тривалість імпульсу відповідно.

Реакція пожежного сповісчувача на теплову дію електричного струму у вигляді (26) описується виразом

$$\begin{aligned} \theta(t) &= K\tau L^{-1} \left[ (\tau p + 1)^{-1} L[i^2(t)] \right] = \\ &= K\tau (It_0^{-1})^2 \left[ \left[ \left( t_0^2 + 2t_0\tau + 2\tau^2 \right) \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right] + \right] 1(t) - \right. \\ &\quad \left. \left[ + t^2 - 2\tau t - 2t_0 t \right] \right] \\ &\quad - \left[ \left[ \left( t - t_0 \right)^2 - 2\tau(t - t_0) + \right] 1(t - t_0) - \right. \\ &\quad \left. \left[ + 2\tau^2 \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t - t_0}{\tau}\right) \right] \right] \right] \right]; \end{aligned} \quad (27)$$

де  $L^{-1}$  – оператор зворотного перетворення Лапласа.

На рис. 2 наведений приклад графічних залежностей  $i(t)\Gamma^1$ ,  $[i(t)\Gamma^1]^2$  та  $m\theta(t)\left[K\tau(I t_0^{-1})^2\right]^{-1}$ , де  $m$  – масштаб.

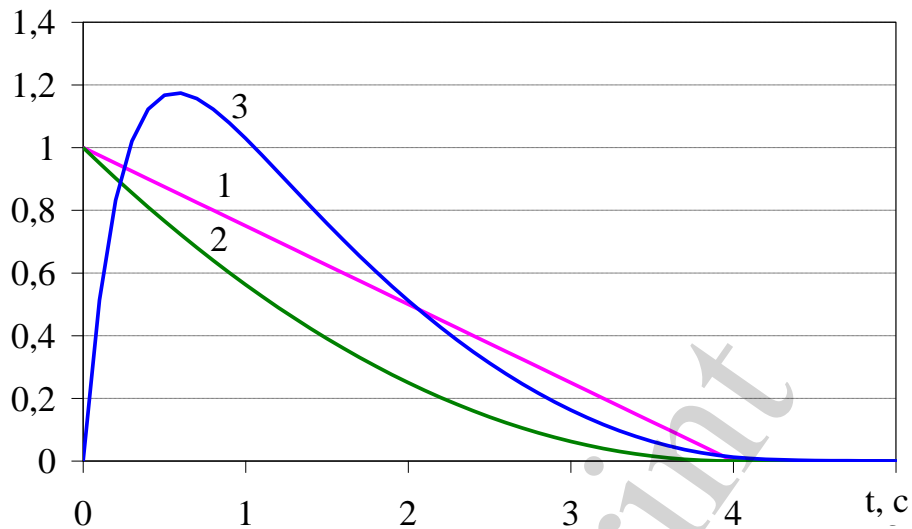


Рис. 2. Залежності: 1 –  $i(t)\Gamma^1$ ; 2 –  $[i(t)\Gamma^1]^2$ ; 3 –  $m\theta(t)\left[K\tau(I t_0^{-1})^2\right]^{-1}$  при  $m=0,25$ ;  $t_0=4,0$  с;  $\tau=0,5$  с

Для моментів часу  $t_1, t_2$  за умови, що  $t \geq 3\tau$ , можна записати співвідношення

$$\begin{aligned} \theta(t_1)[\theta(t_2)]^{-1} &= \left[2\tau^2 - 2(t_1 - t_2)\tau - (t_1 - t_0)^2\right] \times \\ &\times \left[2\tau^2 - 2(t_2 - t_0)\tau - (t_2 - t_0)^2\right]^{-1} = \alpha, \end{aligned} \quad (28)$$

із якого витікає алгебраїчне рівняння відносно часового параметра  $\tau$

$$2(\alpha - 1)\tau^2 - 2[\alpha(t_2 - t_0) - (t_1 - t_0)]\tau + \alpha(t_2 - t_0)^2 - (t_1 - t_0)^2 = 0. \quad (29)$$

Якщо для простоти технічної реалізації покласти  $t_1=0,5t_0$  та  $t_2=0,75t_0$ , то вираз для визначення часового параметра пожежного сповіщувача буде мати вигляд:

$$\tau t_0^{-1} = \left[8(\alpha - 1)\right]^{-1} \left[2 - \alpha + (6\alpha - \alpha^2 - 4)^{0,5}\right]. \quad (30)$$

На рис. 3 наведена графічна інтерпретація цієї залежності.

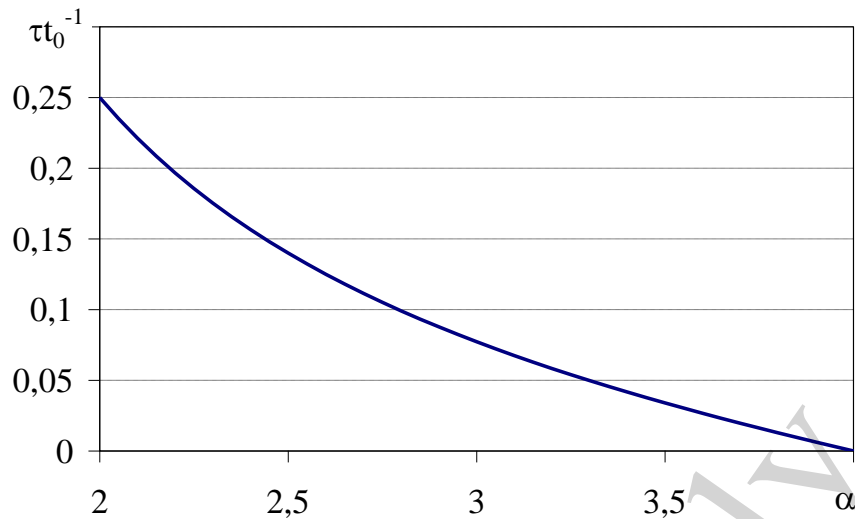


Рис. 3. Залежність  $\tau t_0^{-1} = f(x)$

Із залежності (30) витікає, що вона є індиферентною відносно амплітуди  $I$  імпульсу електричного струму, а також параметра  $K$ , який залежить від фізичних параметрів терморезистивного чутливого елемента пожежного сповіщувача. Крім того, ця залежність визначається лише двома параметрами (із можливих чотирьох) – тривалістю  $t_0$  імпульсу електричного струму та відношенням значення реакції пожежного сповіщувача  $\alpha$  в моменти часу  $t_1$  та  $t_2$ .

Словесна інтерпретація методу визначення часових параметрів пожежного сповіщувача із терморезистивним чутливим елементом зводиться до виконання послідовності наступних процедур:

- через терморезистивний чутливий елемент пожежного сповіщувача пропускають імпульс електричного струму, форма якого описується виразом (26) і параметри якого  $I$  та  $t_0$ ;

- в моменти часу  $t_1, t_2$  вимірюють значення реакції терморезистивного чутливого елемента пожежного сповіщувача  $\theta(t_1)$  та  $\theta(t_2)$  на тест-сигнал (26) та визначають їх відношення  $\alpha$ ;

- за допомогою виразу (29) або графічної залежності, яка наведена на рис. 3, по величинах  $\alpha$  та  $t_0$  визначають значення часового параметра  $\tau$  пожежного сповіщувача.

## 6. Обговорення результатів обґрунтування методу визначення часового параметра пожежних сповіщувачів

Отримані результати по обґрунтуванню імпульсного методу визначення часового параметра пожежних сповіщувачів із терморезистивним чутливим елементом базуються на створенні математичного опису теплових процесів в такому чутливому елементі та їх використанні у вигляді відношення його вихідних сигналів у два апіорі заданих моменти часу.

Особливістю імпульсного методу визначення часового параметра пожежних сповіщувачів із терморезистивним чутливим елементом є те, що при його реалізації відпадає необхідність у використанні зовнішніх джерел тепла.

В основі математичного опису теплових процесів в терморезистивному чутливому елементі пожежного сповіщувача лежить використання неоднорідного рівняння нестационарної теплопровідності (1). Неоднорідність рівняння обумовлена врахуванням внутрішнього джерела тепла, яке є проявом ефекту Джоуля-Ленца внаслідок протікання електричного струму через терморезистивний чутливий елемент пожежного сповіщувача. Для розв'язання такого диференціального рівняння використовується інтегральне перетворення Ханкеля, що забезпечує, на відміну від методу Фур'є, швидку збіжність одержаного рішення у вигляді ряду. Рішення рівняння нестационарної теплопровідності одержано у загальній формі і без обмежень стосовно функції, яка описує електричний струм. Це відкриває можливості для переходу до іншого класу математичних моделей терморезистивного чутливого елемента пожежного сповіщувача. Внаслідок того, що пожежний сповіщувач є динамічним елементом системи виявлення небезпечних чинників пожежі, доцільним є визначення моделі його чутливого елемента в класі передаточних функцій. Для одержання такої моделі використовується інтегральне перетворення Лапласа. Модель представляє собою передаточну функцію інерційної ланки у вигляді (25). Коефіцієнт передачі такої ланки включає дві мультиплікативні складові, одна з яких є часовим параметром пожежного сповіщувача. Такий підхід до побудови моделі терморезистивного чутливого елемента пожежного сповіщувача характеризується похибкою, величина якої не перевищує 4,6 % для значення числа Біо менше одиниці. Використання такого класу моделей для терморезистивного чутливого елемента пожежного сповіщувача дозволяє розповсюдити методи класичної теорії автоматичного управління для вирішення задачі стосовно систем виявлення пожеж. Крім того, наявність таких математичних моделей відкриває можливості для використання технологій Drag-and-Drop при дослідженні як систем виявлення пожеж, так і її елементів.

Активация пожежного сповіщувача при визначенні його часового параметра здійснюється імпульсом електричного струму трикутної форми амплітуди  $I$  і тривалістю  $t_0$  (26). Використання інтегрального перетворення Лапласа дозволяє представити реакцію терморезистивного чутливого елемента пожежного сповіщувача на тест-сигнал (26) у вигляді (27). Ця реакція описується двома адитивними складовими у вигляді функцій Хевісайда, параметри яких включають часовий параметр пожежного сповіщувача. Вираз (27) використовуються для одержання відношення реакції терморезистивного елемента пожежного сповіщувача на тест-сигнал (26) для двох моментів часу. Особливістю цього відношення є те, що воно є індиферентним відносно амплітуди  $I$  імпульсу електричного струму, а також параметра  $K$ , який характеризує внутрішнє джерело тепла (3). Відношення (28) є чотирьохпараметричним і із нього витікає алгебраїчне рівняння другого порядку (29) для визначення часового параметра пожежного сповіщувача. Встановлення функціонального зв'язку між моментами часу, в які визначається відношення (28), та тривалістю  $t_0$  імпульсу електричного струму,

забезпечує мінімум числа параметрів у виразі для визначення часового параметра пожежного сповіщувача.

Метод визначення часового параметра пожежного сповіщувача із терморезистивним чутливим елементом зводиться до:

- пропускання імпульсу електричного струму виду (26) через чутливий елемент;
- вимірювання сигналів  $\theta(t_1)$  та  $\theta(t_2)$  в моменти часу  $t_1$  та  $t_2$ ;
- визначення параметра  $\alpha$  згідно виразу (28);
- використання виразу (30) або залежності, наведеної на рис. 3.

Реалізація такого методу визначення часового параметра пожежного сповіщувача дозволяє забезпечити:

- повну автоматизацію цього процесу безпосередньо на об'єктах, що охороняються;
- підвищення достовірності результату контролю теплових пожежних сповіщувачів;
- одержання прогнозних оцінок стосовно як цього параметра, так і показників надійності пожежного сповіщувача.

До обмежень імпульсного методу визначення часового параметра пожежних сповіщувачів із терморезистивним чутливим елементом слід віднести залежність від форми імпульсу електричного струму. Але загальний підхід до визначення часового параметра при цьому не змінюється.

Слід зазначити, що результати визначення часового параметра теплових пожежних сповіщувачів з терморезистивним чутливим елементом залежать від зміни температури на інтервалі вимірювання його вихідних сигналів.

Для подальшого розвитку цього методу необхідно провести дослідження по оцінці впливу зміни температури навколишнього середовища між моментами часу, в які здійснюється вимірювання вихідних сигналів чутливого елемента пожежного сповіщувача.

## 7. Висновки

1. Одержано математичний опис теплових процесів, які мають місце в терморезистивному чутливому елементі пожежного сповіщувача внаслідок прояву ефекту Джоуля-Ленца. Такий математичний опис належить до класу рівнянь математичної фізики, а його рішення одержано за допомогою інтегрального перетворення Ханкеля. Цей опис дозволяє отримати динаміку зміни розподілу температур в чутливому елементі. Особливістю такого математичного опису є те, що на параметри електричного струму, який протікає через терморезистивний чутливий елемент, не накладаються обмеження. При використанні математичного опису мають бути враховані фізичні і геометричні параметри терморезистивного чутливого елемента, а також характер зміни електричного струму.

2. Обґрунтовано структуру та параметри моделі терморезистивного чутливого елемента пожежного сповіщувача в класі передаточних функцій. Показано, що в якості такої передаточної функції із похибкою, величина якої не перевищує 4,6 %, може бути використана передаточна функція інерційної ланки. Особливістю передаточної функції терморезистивного елемента пожежного

сповіщувача є те, що її коефіцієнт передачі включає в якості мультиплікативної складової його постійну часу.

3. Показано, що відношення реакцій терморезистивного чутливого елемента пожежного сповіщувача, що визначаються в апіорі задані моменти часу, на тест-вплив у вигляді імпульсу електричного струму трикутної форми є індиферентним стосовно параметрів імпульсу та характеристик чутливого елемента. Величина цього відношення використовуються для формалізації процедур, виконання послідовності яких забезпечує реалізацію методу визначення часового параметра – постійної часу пожежних сповіщувачів із терморезистивним чутливим елементом.

### Література

1. Wadoud, A. A., El Eissawi, H. M., Saleh, A. A. (2017). Protection of High Ceiling Nuclear Facilities Using Photoelectric Sensors and Infrared Fire Detectors. *Arab Journal of Nuclear Science and Applications*, 50 (1), 194–203. URL: [http://www.esnsa-eg.com/download/researchFiles/\(19\)%20%20%20%20%2020123-15.pdf](http://www.esnsa-eg.com/download/researchFiles/(19)%20%20%20%20%2020123-15.pdf)
2. Dinh, T., Phan, H.-P., Qamar, A., Woodfield, P., Nguyen, N.-T., Dao, D. V. (2017). Thermoresistive Effect for Advanced Thermal Sensors: Fundamentals, Design Considerations, and Applications. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 26 (5), 966–986. doi: <https://doi.org/10.1109/jmems.2017.2710354>
3. Szelmanowski, A., Zieja, M., Pazur, A., Głyda, K. (2019). Studying the Dynamic Properties of Thermoelectric Fire Detectors in Terms of False Tripping of an Air Fire Suppression System. *Engineer of the XXI Century*, 103–120. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-13321-4\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-030-13321-4_10)
4. Choi, M.-S., Lee, K.-O. (2018). Study on Influence of Air Flow of Ceiling Type Air Conditioner on Fire Detector Response. *Fire Science and Engineering*, 32 (5), 40–45. doi: <https://doi.org/10.7731/kifse.2018.32.5.040>
5. Jevtić, R., Blagojević, M. (2017). Smoke and heat detectors arrangement in hallways. *Safety Engineering*, 7 (2). doi: <https://doi.org/10.7562/se2017.7.02.04>
6. Кальченко, Я. Ю., Абрамов, Ю. А. (2018). Способи контролю технічного стану теплових пожежних сповіщувачів. Проблеми пожежної безпеки, 44, 44–48. URL: <https://nuczu.edu.ua/sciencearchive/ProblemsOfFireSafety/vol44/Kalchenko.pdf>
7. Lugovkin, V. V., Zhuravlev, S. Y., Bulatova, V. V. (2019). Mathematic Simulation of Thermal Sensor Operation at Various Temperature Conditions of Controlled Media. 2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). doi: <https://doi.org/10.1109/rusautocon.2019.8867603>
8. Lu, K. H., Mao, S. H., Wang, J., Lu, S. (2017). Numerical simulation of the ventilation effect on fire characteristics and detections in an aircraft cargo compartment. *Applied Thermal Engineering*, 124, 1441–1446. doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.06.128>
9. Kushnir, A., Kopchak, B., Gavryliuk, A. (2021). Operational algorithm for a heat detector used in motor vehicles. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (10 (111)), 6–18. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.231894>

10. Kushnir, A., Kopchak, B., Gavryliuk, A. (2020). The Development of Operation Algorithm of Heat Detector with Variable Response Parameters. 2020 IEEE XVth International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH). doi: <https://doi.org/10.1109/memstech49584.2020.9109436>
11. Güllüce, Y., Çelik, R. N. (2020). FireAnalyst: An effective system for detecting fire geolocation and fire behavior in forests using mathematical modeling. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 44 (2), 127–139. doi: <https://doi.org/10.3906/tar-1907-11>
12. Wang, J., Li, G., Shi, L., Xie, Q., Zhang, S. (2018). A mathematical model for heat detector activation time under ship fire in a long-narrow space. *Ocean Engineering*, 159, 305–314. doi: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.04.012>
13. Sharma, S., Sharma, A., Vishwakarma, P., Sharma, M. (2021). A theoretical framework representing seminal fire detection system design using shape memory polymer embedded with carbon nanotubes sponge. *Materials Today: Proceedings*, 44, 1617–1620. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.816>
14. Yuan, L., Thomas, R. A., Rowland, J. H., Zhou, L. (2018). Early fire detection for underground diesel fuel storage areas. *Process Safety and Environmental Protection*, 119, 69–74. doi: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.07.022>
15. Sharma, V., Varma, A. S., Singh, A., Singh, D., Yadav, B. P. (2018). A Critical Review on the Application and Problems Caused by False Alarms. *Intelligent Communication, Control and Devices*, 371–380. doi: [https://doi.org/10.1007/978-981-10-5903-2\\_38](https://doi.org/10.1007/978-981-10-5903-2_38)
16. Malykhina, G. F., Guseva, A. I., Militsyn, A. V. (2017). Early fire prevention in the plant. 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). doi: <https://doi.org/10.1109/icieam.2017.8076375>
17. Saeed, F., Paul, A., Karthigaikumar, P., Nayyar, A. (2019). Convolutional neural network based early fire detection. *Multimedia Tools and Applications*, 79 (13-14), 9083–9099. doi: <https://doi.org/10.1007/s11042-019-07785-w>
18. Sowah, R., Ampadu, K. O., Ofoli, A. R., Koumadi, K., Mills, G. A., Nortey, J. (2019). A Fire-Detection and Control System in Automobiles: Implementing a Design That Uses Fuzzy Logic to Anticipate and Respond. *IEEE Industry Applications Magazine*, 25 (2), 57–67. doi: <https://doi.org/10.1109/mias.2018.2875189>
19. Jang, H.-Y., Hwang, C.-H. (2020). Test Method Using Shield-cup for Evaluating Response Characteristics of Fire Detectors. *Fire Science and Engineering*, 34 (4), 36–44. doi: <https://doi.org/10.7731/kifse.8696ecf9>
20. Hong, S. H., Kim, D. S., Choi, K. O. (2017). A Study on the Classification of Domestic Fire Detector using Response Time Index. *Journal of the Korean Society of Safety*, 32 (2), 46–51. doi: <https://doi.org/10.14346/JKOSOS.2017.32.2.46>
21. Yoon, G.-Y., Han, H.-S., Mun, S.-Y., Park, C.-H., Hwang, C.-H. (2020). DB Construction of Activation Temperature and Response Time Index for Domestic Fixed-temperature Heat Detectors in Ceiling Jet Flow. *Fire Science and Engineering*, 34 (3), 35–42. doi: <https://doi.org/10.7731/kifse.103eea8f>
22. Абрамов, Ю. О., Кальченко, Я. Ю. (2016). Теплові пожежні сповіщувачі та їх випробування. Харків: НУЦЗУ, 120.