

## УДК 614.8

*В. О. Дурсєв, к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0002-7981-6779)*  
*В. В. Христич, к.т.н., доцент, заст. нач. каф. (ORCID 0000-0002-5900-7042)*  
*С. М. Бондаренко, к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0002-4687-1763)*  
*М. В. Малярєв, к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0002-4052-7128)*  
*Р. В. Корнієнко, к.т.н., н.с. відділу (ORCID 0000-0003-4854-283X)*  
*Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна*

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ МАГНІТНОКОНТАКТНОГО ТЕПЛООВОГО ПОЖЕЖНОГО СПОВІЩУВАЧА

Розроблено математичну модель теплового магнітноконтактного сповіщувача пожежного з урахуванням типу і структури матеріалу чутливого елемента. Визначено залежності для розрахунку динамічних параметрів пожежного сповіщувача та проведено параметричні дослідження параметрів спрацювання. Виконаний аналіз літератури по моделюванню роботи сповіщувачів пожежних довів необхідність створення математичної моделі теплового магнітноконтактного сповіщувача з метою отримання його динамічних параметрів і покращення технічних даних. Модель являє систему диференціальних рівнянь, що описують залежність намагніченості контактів різної структури в чутливому елементі магнітноконтактного теплового сповіщувача пожежного від температури при нестационарному конвективному нагріві. Рішенням математичних моделей є рівняння динаміки сповіщувачів у відносних змінних з урахуванням структури контактів чутливого елемента: однодомений феромагніт, суперпарамагнітні частки при слабкому та сильному магнітних полях, суперпарамагнітні частки з комплексним урахуванням намагніченості від зовнішнього магнітного поля і температури. Отримані рівняння динаміки являють собою стандартну інерційну динамічну ланку та зручні для дослідження роботи і визначення динамічних параметрів магнітноконтактних теплових сповіщувачів пожежних. Отриманні рівняння дозволяють проводити дослідження та визначати динамічні параметри сповіщувачів, з урахуванням структури матеріалу магнітноконтактного чутливого елемента та швидкості зміни температури. Порівняння отриманих результатів з експериментальними даними показує розбіжності не більше 5 %. Розроблена математична модель та отримані динамічні рівняння дозволяють наводити рекомендації щодо вибору технічних даних магнітноконтактних сповіщувачів та шляхів покращення їх динамічних параметрів.

**Ключові слова:** сповіщувач пожежний, математична модель, магнітні контакти, інерційність, час спрацювання, температура спрацювання

### 1. Вступ

Значна кількість сучасних теплових максимальних сповіщувачів пожежних (СП), що застосовуються в Україні, працюють за принципом залежності магнітної індукції від температури. В якості чутливого елемента (ЧЕ) в таких СП задіяний геркон, в який впаяні контакти. Під дією магнітного впливу постійного кільцевого магніту, контакти намагнічуються, притягуються один до одного і замикаються. При зростанні температури навколишнього середовища, намагніченість контактів починає зменшуватися. Таким чином, при досягненні максимальної порогової температури спрацювання, що наближається до температури Кюрі, намагніченість контактів ЧЕ послабляється настільки, що контакти розмикаються, формуючи в СП сигнал пожежної тривоги. В якості контактів ЧЕ виступають провідники, магнітні властивості яких залежать від їх температури. Ураховуючи велику кількість видів матеріалів контактів, їх технічні характеристики можуть значною мірою відрізнятись, в залежності від їх структури і складу. Технічна документація СП, як правило не містить повний перелік динамічних параметрів, потрібних для проведення дослідження їх спрацювання. Тим більше, в документації СП не вказується тип та склад матеріалів контактної групи ЧЕ, необхідних для визначення

ефективності спрацювання СП та системи пожежної сигналізації в цілому. Для дослідження ефективності роботи пожежної сигналізації, потрібна інформація про технічні дані її складових, зокрема знання динамічних параметрів магнітно-контактних СП та їх чутливих елементів. Динамічні параметри СП можна визначити використовуючи математичну модель, яка враховує діапазон робочих температур, тип та структуру матеріалу контактів ЧЕ.

Таким чином, розробка сповіщувачів пожежних з покращеними динамічними параметрами є актуальною науковою проблемою.

## 2. Аналіз літератури та постановка проблеми

В [1] проведено дослідження температури поверхні в залежності від умов протікання пожежі та відстані від високо інтенсивного теплового джерела. Отримані динамічні параметри СП мають високе співпадіння з паспортними даними, що дозволяє застосовувати наведений метод для визначення технічних даних перспективних СП. Проте, в роботі відсутні залежності, що дозволяють моделювати роботу магнітноконтактних СП з урахуванням матеріалу контактів геркону.

В [2] показано дослідження магнітних властивостей матерії та магнітних характеристик матеріалів, коли індуктивні елементи відіграють велику роль. Показано, що однією з найбільш важливих груп матеріалів, що використовується в даній галузі, є ферити, які використовуються як матеріали для виготовлення магнітних сердечників індукційних елементів, таких як котушки індуктивності, дроселі, фільтри та трансформатори. Математичні моделі магнітних контактів не досліджувалися.

В [3] проведено аналіз магнітноконтактних матеріалів та показано, що ферити являють собою керамічні матеріали, які містять оксид заліза  $Fe_2O_3$ , хімічно пов'язаний з одним або більше атомами металевих елементів. Визначено розподіл феритів за магнітними властивостями як магнітом'які та магнітотверді ферити. Наведено області їх застосування та типи найбільш розповсюджених матеріалів. Рівнянь для застосування в якості математичної моделі магнітноконтактного теплового сповіщувача в роботі не наведено.

В [4] наведено результати дослідження впливу температури на феритовий сердечник з додаванням в його структуру різних складових та компонентів. Показано зміни магнітних властивостей феритів при додаванні оксиду кремня  $SiO_2$  при виготовленні феритів. Математичне моделювання залежності магнітних властивостей фериту від температури не розглядалося.

В [5] приводяться результати досліджень по створенню магнітом'якого аморфного сплаву з надзвичайно високою початковою проникністю та дослідження впливу температури на магнітні властивості цього сплаву. Показано залежність впливу температури на магнітні властивості аморфного сплаву при змінній концентрації добавок бору. Визначено, що індукція магнітного насичення і температура Кюрі змінюються від структури та складу матеріалів, зокрема від вмісту бору. Висока початкова проникність аморфного сплаву пояснювалася відсутністю в сплаві кристалічної, магнітопружної та індукованої магнітної анізотропії. Також показано перевагу зниження температури Кюрі на параметри матеріалів магнітноконтактних датчиків. Проте, досліджень залежності намагніченості речовини від температури для математичних моделей магнітноконтактних датчиків в роботі не проводилося.

В [6] представлена можливість моделювання впливу температури на магніт-

ні властивості феромагнітних матеріалів. Показано, що рівень магнітопружного ефекту матеріалу пов'язаний зі зміною магнітних характеристик магнітм'якого матеріалу, що піддається напруженням від зовнішніх сил. Доведено, що за рахунок структури магнітноконтального матеріалу магнітопружний ефект дозволяє визначити напругу в матеріалі по її магнітним характеристикам, за рахунок зручності методу. Відзначено, що практичне застосування методу потребує модель зв'язку магнітних властивостей з напругою. Наведено типи моделей, що дозволяють моделювати магнітні властивості для різних типів структури матеріалів, та пов'язують магнітні характеристики матеріалу з його фізичним станом. Проте, наведенні в статті графічні результати досліджень не дозволяють застосувати їх для побудови аналітичної моделі магнітноконтальных датчиків.

В [7] представлено результати виміру теплових впливів на магнітний гістерезис м'яких феритових сердечників, які зазвичай використовуються у високочастотних індукторах і трансформаторах. Запропоновано підхід для моделювання теплового впливу на магнітні властивості феритів. Показано, що в діапазоні робочих температур (20–100 °C) зміну магнітних властивостей матеріалу від температури можна вважати лінійною. Пропонується застосування методу визначення магнітних властивостей від температури для широкого кола матеріалів, якщо їх параметри схожі з матеріалами випробувань. Але, моделювання застосування магнітноконтальных матеріалів в якості чутливих елементів сповіщувачів в роботі не проводилося.

В [8] виконано дослідження впливу температури на магнітні властивості матеріалів, виконаних з марганець-цинкових феритів. Дослідження виконано на чотирьох сердечниках, які були виготовлені з різним процентним співвідношенням в сплаві марганцю і цинку. Підвищення температури призводило до зниження значень усіх параметрів петлі гістерезису: коерцитивного поля, індукції залишкової намагніченості та максимальної індукції. Показано графічно, що при низьких температурах (нижче 0 °C) індукція досягала максимальних значень. Підвищення температури приводила до зниження індукції. Таким чином, результати досліджень показали значну залежність між температурою марганець-цинкового фериту і його магнітними властивостями, що може бути використано, наприклад, для побудови датчиків температури. Проте в статті відсутні математичні залежності індукції та намагніченості контактів від температури.

В [9] показані залежності намагніченості матеріалів різної структури від температури. Наведені залежності, що дозволяють урахувати вплив структури матеріалів різних типів на їх магнітні властивості. Наведено метод отримання матеріалів з заданими магнітними характеристиками. Приведені типи магнітноконтальных матеріалів, в залежності від їх структури та складу. Виявлено та пояснено зв'язок між індукцією та намагніченістю зі структурою та складом магнітних матеріалів різних типів. Розробка математичних моделей залежності намагніченості контактів чутливих елементів в умовах нестационарного конвективного теплообміну в роботі не розглядалася.

В [10] наведено метод експериментального визначення динамічних параметрів теплового терморезисторного сповіщувача пожежного, при відомій швидкості зміни температури. Показано, що відмінність розрахункових значень динамічних параметрів від експериментальних даних не перевищує 5 %. Але моделюванням роботи теплових сповіщувачів пожежних, автори в статті не займалися.

Моделювання роботи теплових СП проводилося з використанням пакетів Fire safety. DOI: 10.52363/2524-0226-2023-37-3

математичних програм VisSim та Maple [11]. Проте, наведені програми дозволяють проводити дослідження динамічних параметрів сповіщувачів по математичним моделям користувача і не містять готових моделей.

Отже, важливою та невирішеною частиною проблеми покращення ефективності роботи системи пожежної сигналізації є розробка математичної моделі теплового магнітноконтактного сповіщувача пожежного з урахуванням стану роботи, структури і типу матеріалів контактів його чутливого елемента.

### 3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи є розробка математичної моделі теплового магнітноконтактного сповіщувача пожежного для дослідження його динамічних параметрів в залежності від структури контактів чутливого елемента.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- розробити математичну модель магнітноконтактного сповіщувача з урахуванням структури чутливого елемента;
- отримати математичні та розрахункові залежності параметрів роботи магнітноконтактного сповіщувача.

### 4. Матеріали та методи досліджень

Об'єктом дослідження є процес зміни намагніченості контактів чутливого елемента сповіщувача пожежного при зміні температури. Предметом дослідження обрано моделювання роботи сповіщувачів пожежних у вигляді динамічних ланок для дослідження динамічних параметрів їх роботи. У якості гіпотези прийняті залежності намагніченості контактів магнітноконтактного геркону в умовах нестационарного теплообміну з рівномірним розподілом температури в чутливому елементі.

Структурно-динамічне моделювання роботи теплового магнітноконтактного сповіщувача пожежного виконано з використанням математичного пакета прикладних програм VisSim. Дослідження впливу температури на намагніченість контактів чутливого елемента та розрахунки динамічних параметрів магнітноконтактного сповіщувача пожежного проводилося з використанням математичної програми Maple. Визначення параметрів спрацювання сповіщувача пожежного проводилося на основі параметричних досліджень інерційності, динамічної температури та часу спрацювання сповіщувача при заданій швидкості зміни температури.

### 5. Розробка математичної моделі теплового магнітноконтактного сповіщувача

В переважній кількості теплових СП, що застосовуються в Україні, у якості ЧЕ застосовується магнітноконтактний геркон (СПТМ-62, СПТМ-70). Прийmemo наступну розрахункову схему для такого СП (рис. 1).

Математичну модель ЧЕ у якості стандартної динамічної ланки, можливо отримати з рівнянь намагніченості контактів магнітноконтактного геркону та рівняння для нестационарного теплообміну (критерій Біо < 0,1, що відповідає рівномірному розподілу температури в ЧЕ).

В силу великого різноманіття типу матеріалів контактів, їх структури та станів роботи, розглянемо залежність їх намагніченості для типових випадків в діапазоні робочих температур (293÷363 К). Так залежність намагніченості однодоменних феромагнітних матеріалів від температури:

$$M_{\text{одн.}} = M_0 \left( \frac{A\alpha}{k_B T} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

де  $M_{\text{одн.}}$  – намагніченість однодоменого феромагнітного ЧУ при поточній температурі, А/м;  $M_0$  – намагніченість однодоменого феромагнітного матеріалу ЧУ при  $T=0$  К, А/м;  $A$  – ефективна константа обмінної взаємодії;  $a$  – параметр решітки (структури) матеріалу контактів, м;  $k_B$  – постійна Больцмана, Дж/К;  $T$  – поточна температура, К.

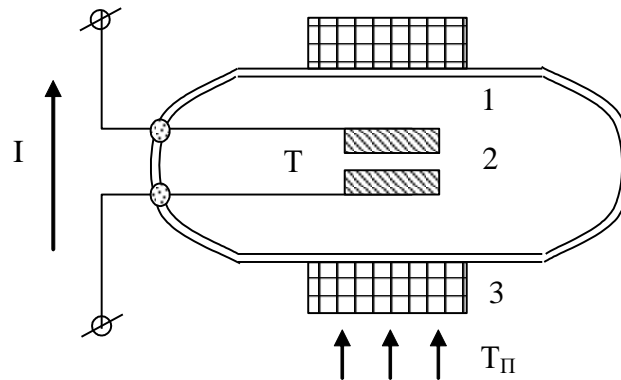


Рис. 1. Розрахункова схема магнітноконтактного чутливого елементу: 1 – геркон; 2 – контакти; 3 – кільцевий постійний магніт

Залежність намагніченості від зовнішнього магнітного поля і температури для матеріалів, що складаються з суперпарамагнітних часток, при слабкому та сильному магнітних полях:

$$M_{\text{сл.}} = \frac{nm^2 H}{3k_B T}; \quad (2)$$

$$M_{\text{сильн.}} = nm \left( 1 - \frac{k_B T}{mH} \right), \quad (3)$$

де  $n$  – кількість суперпарамагнітних часток в одиниці об'єму матеріалу контакту;  $m$  – магнітний момент, Ам<sup>2</sup>;  $H$  – зовнішнє магнітне поле, А/м.

З комплексним урахуванням намагніченості від зовнішнього магнітного поля і температури для загальних умов:

$$M_{\text{компл.}} = nm \left[ \text{cth} \left( \frac{mH}{k_B T} \right) - \frac{k_B T}{mH} \right]. \quad (4)$$

Для переходу до лінійної форми рівнянь (1÷4), дорівнюємо їх диференціали лівої та правої частин.

$$\frac{dM_{\text{одн.}}}{dT} = \frac{k_{\text{одн.}}}{T^{\frac{3}{2}}}; \quad k_{\text{одн.}} = -\frac{1}{2} M_0 \left( \frac{A\alpha}{k_B} \right)^{\frac{1}{2}}; \quad (5)$$

$$\frac{dM_{\text{сл.}}}{dT} = \frac{k_{\text{сл.}}}{T^2}; k_{\text{сл.}} = -\frac{nm^2H}{3k_B}; \quad (6)$$

$$\frac{dM_{\text{сильн.}}}{dT} = k_{\text{сильн.}}; k_{\text{сильн.}} = -\frac{nk_B}{H}; \quad (7)$$

$$\frac{dM_{\text{компл.}}}{dT} = nm \left[ \frac{1}{\text{sh}^2\left(\frac{mH}{k_B T}\right)} \frac{1}{T^2} - \frac{k_B}{mH} \right] = \frac{k_1}{\text{sh}^2\left(\frac{k_2}{T}\right)} \cdot \frac{1}{T^2} + k_3; \quad (8)$$

$$k_1 = nm; k_2 = \frac{mH}{k_B}; k_3 = -\frac{nk_B}{H}. \quad (9)$$

Тепло, що передане та поглинене магнітноконтактним герконом

$$m \cdot C \cdot d \frac{dT}{d\tau} + \alpha F dT = \alpha F dT_{\text{НП}}, \quad (10)$$

де  $m$  – маса контактів, кг;  $C$  – теплоємність матеріалу контактів, Дж·кг<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>;  $\tau$  – час, сек;  $T$  – температура контактів, К;  $F$  – площа поверхні контактів, м<sup>2</sup>;  $\alpha$  – коефіцієнт конвекційного теплообміну, Вт·м<sup>-2</sup>·К<sup>-1</sup>;  $T_{\text{НП}}$  – температура навколишнього повітря, К.

Отже, математична модель магнітноконтактного сповіщувача складається з рівнянь, що описують залежність намагніченості контактної групи від температури (5÷8) та рівняння нестационарного теплообміну (10). Математична модель ураховує роботу магнітноконтактного сповіщувача з різними типами матеріалів контактної групи, їх структури та стану роботи.

## 6. Отримання математичних та розрахункових залежностей параметрів роботи магнітноконтактного сповіщувача

Для отримання математичних та розрахункових залежностей параметрів роботи магнітноконтактного сповіщувача, підставимо рівняння залежності намагніченості (5÷8) в формулу балансу тепла (10). Для магнітноконтактного ЧЕ, що складається з однодомених феромагнітних матеріалів:

$$m \cdot C \cdot \frac{T^{\frac{3}{2}}}{k_{\text{одн.}}} \cdot \frac{d}{d\tau} dM_{\text{одн.}} + \alpha \cdot F \cdot \frac{T^{\frac{3}{2}}}{k_{\text{одн.}}} \cdot dM_{\text{одн.}} = \alpha \cdot F \cdot dT_{\text{НП}}. \quad (11)$$

Виконаємо лінеаризацію (11):

$$m \cdot C \cdot \frac{T^{\frac{3}{2}}}{k_{\text{одн.}}} \cdot \frac{M_{\text{одн.0}}}{M_{\text{одн.0}}} \cdot \frac{d}{d\tau} \Delta M_{\text{одн.}} + \alpha \cdot F \cdot \frac{T^{\frac{3}{2}}}{k_{\text{одн.}}} \cdot \frac{M_{\text{одн.0}}}{M_{\text{одн.0}}} \cdot \Delta M_{\text{одн.}} = \alpha \cdot F \cdot \frac{T_{\text{П0}}}{T_{\text{П0}}} \cdot \Delta T_{\text{НП}}; \quad (12)$$

$$\dot{m}_{\text{одн.}} = \frac{1}{M_{\text{одн.0}}} \cdot \frac{d}{d\tau} \Delta M_{\text{одн.}}; \overline{m}_{\text{одн.}} = \frac{\Delta M_{\text{одн.}}}{M_{\text{одн.0}}}; \overline{t}_{\text{НП}} = \frac{\Delta T_{\text{НП}}}{T_{\text{П0}}}; \quad (13)$$

$$T_{\text{одн.}} \cdot \dot{m}_{\text{одн.}} + \overline{m}_{\text{одн.}} = K_{\text{одн.}} \cdot \overline{t}_{\text{НП}}; \quad (14)$$

$$T_{\text{одн.}} = \frac{m \cdot C}{\alpha \cdot F}; K_{\text{одн.}} = \frac{k_{\text{одн.}}}{T^{\frac{3}{2}}} \cdot \frac{T_{\text{П0}}}{M_{\text{одн.0}}}, \quad (15)$$

де  $M_{\text{одн.0}}$  – намагніченість однодоменого феромагнітного матеріалу ЧУ у вихідній точці, А/м;  $T_{\text{П0}}$  – температура повітря у вихідній точці, К;  $T_{\text{одн.}}$  – інерційність, с;  $K_{\text{одн.}}$  – коефіцієнт посилення;  $\dot{m}_{\text{одн.}}$ ,  $\overline{t}_{\text{НП}}$  – відносні змінні.

Виконаємо аналогічні перетворення для математичних моделей магнітноконтактних СП, в яких матеріалами ЧЄ виступають суперпарамагнітні частки при слабкому та сильному магнітних полях і суперпарамагнітні частки з урахуванням намагніченості від зовнішнього магнітного поля і температури в загальних умовах.

Для ЧЄ з суперпарамагнітних часток при слабкому магнітному полі:

$$m \cdot C \cdot \frac{T^2}{k_{\text{сл.}}} \cdot \frac{d}{d\tau} \Delta M_{\text{сл.}} + \alpha \cdot F \cdot \frac{T^2}{k_{\text{сл.}}} \cdot \Delta M_{\text{сл.}} = \alpha \cdot F \cdot \Delta T_{\text{НП}}; \quad (16)$$

$$T_{\text{сл.}} \cdot \dot{m}_{\text{сл.}} + \overline{m}_{\text{сл.}} = K_{\text{сл.}} \cdot \overline{t}_{\text{НП}}; \quad (17)$$

$$T_{\text{сл.}} = \frac{m \cdot C}{\alpha \cdot F}; K_{\text{сл.}} = \frac{k_{\text{сл.}}}{T^2} \cdot \frac{T_{\text{П0}}}{M_{\text{сл.0}}}, \quad (18)$$

де  $M_{\text{сл.0}}$  – намагніченість суперпарамагнітних часток при слабкому магнітному полі у вихідній точці, А/м;  $T_{\text{сл.}}$  – інерційність, с;  $K_{\text{сл.}}$  – коефіцієнт посилення.

Для ЧЄ з суперпарамагнітних часток при сильному магнітному полі:

$$m \cdot C \cdot \frac{1}{k_{\text{сильн.}}} \cdot \frac{d}{d\tau} \Delta M_{\text{сильн.}} + \alpha \cdot F \cdot \frac{1}{k_{\text{сильн.}}} \cdot \Delta M_{\text{сильн.}} = \alpha \cdot F \cdot \Delta T_{\text{НП}}; \quad (19)$$

$$T_{\text{сильн.}} \cdot \dot{m}_{\text{сильн.}} + \overline{m}_{\text{сильн.}} = K_{\text{сильн.}} \cdot \overline{t}_{\text{НП}}; \quad (20)$$

$$T_{\text{сильн.}} = \frac{m \cdot C}{\alpha \cdot F}; K_{\text{сильн.}} = k_{\text{сильн.}} \cdot \frac{T_{\text{П0}}}{M_{\text{сильн.0}}}, \quad (21)$$

де  $M_{\text{сильн.0}}$  – намагніченість суперпарамагнітних часток при сильному магнітному полі у вихідній точці, А/м;  $T_{\text{сильн.}}$  – інерційність, с;  $K_{\text{сильн.}}$  – коефіцієнт посилення.

Для ЧЄ з суперпарамагнітних часток з комплексним урахуванням намагніченості від зовнішнього магнітного поля і температури в загальних умовах:

$$m \cdot C \cdot \frac{\operatorname{sh}^2\left(\frac{k_2}{T}\right) T^2}{k_1 + \operatorname{sh}^2\left(\frac{k_2}{T}\right) T^2 k_3} \cdot \frac{d}{dt} \Delta M_{\text{КОМПЛ.}} + \alpha \cdot F \cdot \frac{\operatorname{sh}^2\left(\frac{k_2}{T}\right) T^2}{k_1 + \operatorname{sh}^2\left(\frac{k_2}{T}\right) T^2 k_3} \cdot \Delta M_{\text{КОМПЛ.}} = \alpha \cdot F \cdot \Delta T_{\text{НП}}; \quad (22)$$

$$T_{\Sigma} \dot{m}_{\Sigma} + \overline{m}_{\Sigma} = K_{\Sigma} \overline{t}_{\Pi}; \quad (23)$$

$$T_{\text{КОМПЛ.}} = \frac{m \cdot C}{\alpha \cdot F}; \quad K_{\text{КОМПЛ.}} = \frac{k_1 + \operatorname{sh}^2\left(\frac{k_2}{T}\right) T^2 k_3}{\operatorname{sh}^2\left(\frac{k_2}{T}\right) T^2} \cdot \frac{T_{\text{П}0}}{M_{\text{КОМПЛ.}0}}, \quad (24)$$

де  $M_{\text{КОМПЛ.}0}$  – намагніченість суперпарамагнітних часток при сильному магнітному полі у вихідній точці, А/м;  $T_{\text{КОМПЛ.}}$  – інерційність, с;  $K_{\text{КОМПЛ.}}$  – коефіцієнт посилення.

Для визначення залежності параметрів спрацювання теплового магнітноконттактного сповіщувача скористуємося підходом [10] з урахуванням динамічних параметрів отриманих по (15, 18, 21, 24). Інерційність ( $T_{\text{СП}}$ , сек), динамічна ( $T_{\text{ДИН}}$ , К) та статична ( $T_{\text{СТАТ}}$ , К) температури спрацювання магнітноконттактного СП, а також час його спрацювання при заданій швидкості ( $dT/dt$ , К/сек) зростання температури:

$$T_{\text{СП}} = \frac{60 \cdot (T_{\text{ДИН}} - T_{\text{СТАТ}})}{\frac{dT}{dt} \cdot K_{\text{СП}}}; \quad (25)$$

$$T_{\text{ДИН}} = \frac{60 T_{\text{СТАТ}} + K_{\text{СП}} T_{\text{СП}} \cdot \frac{dT}{dt}}{60}; \quad (26)$$

$$\tau_{\text{СПР}} = \frac{60 \cdot (T_{\text{СТАТ}} - T_0) + T_{\text{СП}} \frac{dT}{dt}}{\frac{dT}{dt}}. \quad (27)$$

В якості зразка теплового магнітноконттактного СП, динамічні параметри якого визначалися розрахунками та досліджувалися експериментально, був обраний тепловий, максимальний, точковий сповіщувач СПТМ-70. Визначалися експериментально: статична температура спрацювання  $T_{\text{СТ ЕКСП}}$ , динамічна температура спрацювання  $T_{\text{ДИН ЕКСП}}$ , час спрацювання  $\tau_{\text{СПР ЕКСП}}$  та інерційність СП  $T_{\text{СП ЕКСП}}$  (25). Розрахунками, при відомій інерційності  $T_{\text{СП}}$  та заданій швидкості зростання температури ( $dT/dt$ ) визначалися: динамічна температура спрацювання  $T_{\text{ДИН РОЗР}}$  (26), час спрацювання СП  $\tau_{\text{СПР РОЗР}}$  (27). Середні значення отриманих динамічних параметрів для СПТМ-70, за результатами 9-ти експериментів, наведені в табл. 1 та на рис. 2.

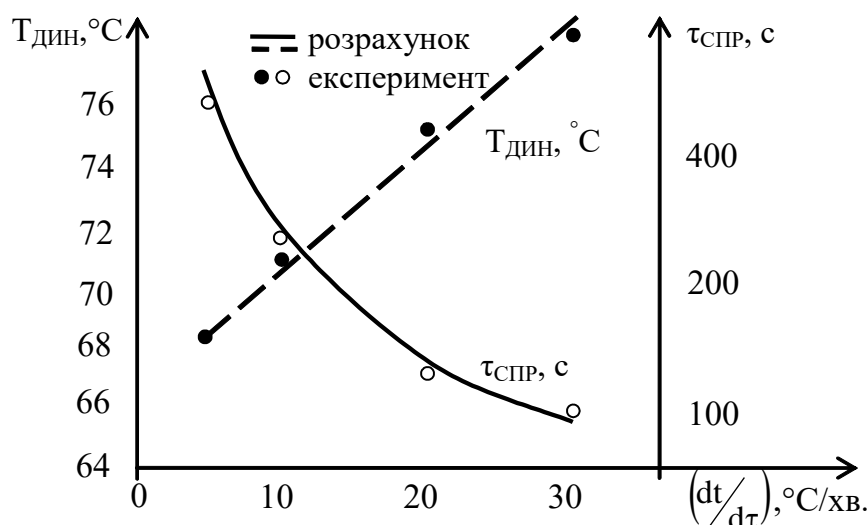
Отже, отримані рівняння динаміки магнітноконттактного сповіщувача у відносних змінних, з урахуванням структури чутливого елемента: однодомений



ферромагніт (14), суперпарамагнітні частки при слабкому (17) та сильному (20) магнітних полях, суперпарамагнітні частки з урахуванням намагніченості від зовнішнього магнітного поля і температури в загальних умовах (23).

**Табл. 1. Динамічні параметри магнітноконтактного теплового СП**

$(dT/d\tau)$ , К/хв	0,2	5	10	20	30
$T_{\text{СТАТ ЕКСП}}$ , °С	66				
$T_{\text{ДИН ЕКСП}}$ , °С		68,2	71,1	75,1	76,8
$T_{\text{ДИН РОЗР}}$ , °С		68	70	74	78
$\tau_{\text{СПР ЕКСП}}$ , с		437	236	124	
$\tau_{\text{СПР РОЗР}}$ , с		456	240	132	
$T_{\text{СП ЕКСП}}$ , с		24			



**Рис. 2. Залежність динамічних параметрів СПТМ-70 від швидкості зростання температури**

Рівняння динаміки являють собою стандартну інерційну ланку та зручні для дослідження роботи і визначення динамічних параметрів магнітноконтактного сповіщувача. Чисельні значення параметрів спрацювання магнітноконтактного сповіщувача відповідають експериментальним даним з відхиленням не більше 5 %.

## 7. Обговорення результатів дослідження впливу чутливого елемента на динамічні параметри сповіщувача

Таким чином, розроблена математична модель магнітноконтактного сповіщувача. Особливість розробленої моделі полягає в сукупності рівнянь залежності намагніченості контактів від температури в діапазоні робочих температур (293÷363 К) з урахуванням типу і структури матеріалу контактів чутливого елемента та формули балансу тепла.

Так для контактів з однодоменого ферромагніту ураховуються: намагніченість однодоменого ферромагнітного ЧУ при поточній температурі  $M_{\text{Одн}}$ , намагніченість однодоменого ферромагнітного матеріалу при початковій температурі  $M_0$ , ефективна константа обмінної взаємодії  $A$ , задається параметр решітки (структури) матеріалу контактів  $a$ , м; постійна Больцмана  $k_B$ , поточна температура  $T$ . Для суперпарамагнітних часток при слабкому та сильному магнітних полях ураховуються: кількість суперпарамагнітних часток в одиниці об'єму матеріалу контакту  $n$ , магнітний момент матеріалу контакту  $m$ , зовнішнє магнітне поле, що створюється постійним магнітом  $H$ , постійна Больцмана  $k_B$ , поточна температура  $T$ . Ок-

ремо розроблена математична модель для суперпарамагнітних часток з сукупним урахуванням намагніченості від зовнішнього магнітного поля і температури в загальних умовах, де ураховуються: кількість суперпарамагнітних часток в одиниці об'єму матеріалу контакту  $n$ , магнітний момент матеріалу контакту  $m$ , зовнішнє магнітне поле, що створюється постійним магнітом  $H$ , постійна Больцмана  $k_B$ , точна температура  $T$ , гармонійна зміна зовнішнього магнітного поля і магнітного моменту при зміні температури  $sth(mH/k_B T)$ . Відомі з літератури моделі магнітноконтактних сповіщувачів не ураховують наведені данні при визначенні намагніченості контактів.

Визначені залежності параметрів магнітноконтактного сповіщувача представлені у вигляді стандартних інерційних ланок у відносних змінних та можуть застосовуватися при визначенні динамічних характеристик сповіщувача. В формулах ураховано вплив структури типових матеріалів магнітноконтактних чутливих елементів та швидкість зміни температури навколишнього середовища на їх магнітні властивості. Розбіжність визначених характеристик спрацювання СПТМ-70 з даними експерименту до 5%. При заданій зміні температури намагніченість контактів залежать від структури їх матеріалу та сукупного урахування намагніченості від зовнішнього магнітного поля і температури навколишнього середовища. Це впливає на інерційність сповіщувача за рахунок впливу наведених факторів на параметри роботи сповіщувача.

Відмітимо, що розроблена математична модель магнітноконтактного сповіщувача застосовується при наявності даних про початкову намагніченість, величину зовнішнього магнітного поля та характеристик матеріалу контактів. Крім того, в моделі магнітноконтактного СП для однодомених феромагнітних матеріалів та суперпарамагнітних часток при слабкому та сильному магнітних полях не ураховується гармонійна зміна зовнішнього магнітного поля і магнітного моменту при зміні температури. Отже, застосування в подальшому наведеного в роботі способу розробки математичної моделі магнітноконтактного сповіщувача пов'язано з визначенням намагніченості, зовнішнього магнітного поля, гармонійної зміни зовнішнього магнітного поля з магнітним моментом в діапазоні робочих температур та даних про матеріал контактів геркону. Проте, отримані з такої моделі залежності параметрів роботи сповіщувача будуть мати складніший вигляд, та ускладнять визначення їх технічних характеристик.

Таким чином, наведені результати свідчать про справедливість прийнятої гіпотези, а отримані чисельні значення параметрів спрацювання відповідають дійсності. Таким чином, мета дослідження вважається досягнутою. Отримані результати розрахунків дозволяють навести рекомендації щодо вибору технічних даних перспективних магнітноконтактних СП. Це дозволить покращити динамічні параметри сповіщувача, а саме інерційність, статичну і динамічну температури та час спрацювання.

## 8. Висновки

1. Отримана математична модель магнітноконтактного сповіщувача для контактів з однодоменого феромагніту, суперпарамагнітних часток в умовах слабого та сильного зовнішнього магнітного поля, суперпарамагнітних часток з сукупним урахуванням намагніченості від зовнішнього магнітного поля і температури в загальних умовах. Визначено, що для урахування впливу характеристик магнітних контактів на параметри роботи сповіщувача, разом з даними намагні-

ченості і величини зовнішнього магнітного поля модель повинна містити параметри структури та матеріалу магнітних контактів. В рівняння моделі магнітноконтактного сповіщувача з контактами із однодоменого феромагніту входять 4 величини: намагніченість однодоменого феромагнітного матеріалу при початковій температурі, ефективна константа обмінної взаємодії, параметр решітки (структури) матеріалу контактів, постійна Больцмана, поточна температура. Для сповіщувачів з контактами із суперпарамагнітних часток при слабкому та сильному магнітних полях урахуються по 5 факторів: кількість суперпарамагнітних часток в одиниці об'єму матеріалу контакту, магнітний момент матеріалу контакту, зовнішнє магнітне поле, що створюється постійним магнітом, постійна Больцмана, поточна температура. В сповіщувачі з контактами із суперпарамагнітних часток з сукупним урахуванням намагніченості від зовнішнього магнітного поля і температури в загальних умовах, рівняння містять 7 характеристик: кількість суперпарамагнітних часток в одиниці об'єму матеріалу контакту, магнітний момент матеріалу контакту, зовнішнє магнітне поле, що створюється постійним магнітом, постійна Больцмана, поточна температура, гармонійна зміна зовнішнього магнітного поля і магнітного моменту при зміні температури.

2. Отримані математичні та розрахункові залежності для дослідження параметрів роботи магнітноконтактного сповіщувача, які урахують тип, структуру та стан роботи контактів в чутливому елементі. Відхилення визначених характеристик спрацювання сповіщувача з даними експерименту до 5 %. Для покращення динамічних параметрів роботи магнітноконтактного сповіщувача, доцільно поліпшити умови конвективного теплообміну між чутливим елементом та середовищем. В подальшому доцільно урахувати початкову намагніченість контактів, зовнішнє магнітне поле, гармонійні зміни зовнішнього магнітного поля з магнітним моментом та дані про матеріал магнітних контактів.

### Література

1. Abramov Y., Basmanov O., Salamov J., Mikhayluk A. Model of thermal effect of fire within a dike on the oil tank. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2018. Vol. 2. P. 95–100. doi:10.29202/nvngu/2018-2/12
2. O'Handley R. *Modern Magnetic Materials: Principles and Applications*. John Wiley & Sons, 2000. 786 p. doi: 10.1109/MEI.2005.1490004
3. Carter C. B. *Ceramic Materials: Science and Engineering*. Springer, 2007. 716 p. doi: 10.1007/978-0-387-46271-4
4. Mahmoudi M., Kavanlouei M. Temperature and frequency dependence of electromagnetic properties of sintering Li–Zn ferrites with nano SiO<sub>2</sub> additive. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2015. Vol. 384. P. 276–283. doi: 10.1016/j.jmmm.2015.02.053
5. Tsepelev V., Starodubtsev Y., Zelenin V., Belozеров V., Konashkov V. Temperature affecting the magnetic properties of the Co<sub>79-x</sub>Fe<sub>3</sub>Cr<sub>3</sub>Si<sub>15</sub>B<sub>x</sub> amorphous alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2015. Vol. 643. P. 280–282. doi: 10.1016/j.jallcom.2014.12.236
6. Jackiewicz D., Szewczyk R., Salach J. Modelling the magnetic characteristics and temperature influence on constructional steels. *Solid State Phenomena*. 2013. Vol. 199. P. 466–471. doi: 10.4028/www.scientific.net/ssp.199.466
7. Lu H., Zhu Y., Hui J. G. Measurement and modeling of thermal effects on magnetic hysteresis of soft ferrites. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2007. Fire Safety. DOI: 10.52363/2524-0226-2023-37-3

Vol. 43(11). P. 3953–3960. doi: 10.1109/tmag.2007.904942

8. Kachniarz M., Salach J., Szewczyk R., Bieńkowski A., Korobiichuk I. Investigation of temperature effect on magnetic characteristics of manganese-zinc ferrites. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2015. 6/5(78). P. 17–21. doi: 10.15587/1729-4061.2015.55410

9. Бушкова В. С. Низкотемпературные магнитные свойства ферритов. *Low Temperature Physics*. 2017. Vol. 43(12) P. 1724–1732. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/176281/04-Bushkova.pdf?sequence=1>

10. Дурєєв В. О. Визначення динамічних параметрів сповіщувачів за даними експерименту. *Проблеми пожежної безпеки*. 2019. 46. С. 54–56. URL: <https://nuczu.edu.ua/images/topmenu/science/zbirky-naukovykh-prats-ppb/ppb46/Dureev.pdf>

11. 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. Khrystych, PhD, Associate Professor, Deputy Head of the Department*

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

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

*R. Kornienko, PhD, Researcher of the Department*

*National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine*

#### MATHEMATICAL MODEL OF THE MAGNETIC-CONTACT THERMAL FIRE DETECTOR

A mathematical model of a fireman's thermal magnetic contact detector was developed, taking into account the type and structure of the material of the sensitive element. Dependencies for the calculation of the dynamic parameters of the fire detector were determined and parametric studies of the tripping parameters were carried out. The analysis of the literature on the modeling of fire detectors proved the need to create a mathematical model of a thermal magnetic contact detector in order to obtain its dynamic parameters and improve technical data. The model represents a system of differential equations describing the dependence of the magnetization of contacts of various structures in the sensitive element of the magnetic contact heat detector of the firefighter on the temperature during non-stationary convective heating. The solution of mathematical models is the equation of detector dynamics in relative variables, taking into account the contact structure of the sensitive element: single-domain ferromagnet, superparamagnetic particles in weak and strong magnetic fields, superparamagnetic particles with comprehensive consideration of magnetization from the external magnetic field and temperature. The obtained dynamics equations represent a standard inertial dynamic link and are convenient for researching the operation and determining the dynamic parameters of magnetic contact heat detectors for firefighters. The obtained equations allow conducting research and determining the dynamic parameters of the detectors, taking into account the structure of the material of the magnetic contact sensitive element and the rate of temperature change. Comparison of the obtained results with experimental data shows differences of no more than 5 %. The developed mathematical model and the obtained dynamic equations make it possible to make recommendations regarding the selection of technical data of magnetic contact detectors and ways to improve their dynamic parameters.

Key words: fire detector, mathematical model, magnetic contacts, inertia, activation time, activation temperature

#### References

1. Abramov, Y., Basmanov, O., Salamov, J., Mikhayluk, A. (2018). Model of thermal effect of fire within a dike on the oil tank. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2, 95–100. doi: 10.29202/nvngu/2018-2/12

2. O'Handley, R. (2000). *Modern Magnetic Materials: Principles and Applications*. John Wiley & Sons, 786. doi: 10.1109/MEI.2005.1490004

3. Carter, C. B. (2007). *Ceramic Materials: Science and Engineering*. Springer, 716. doi: 10.1007/978-0-387-46271-4
4. Mahmoudi, M., Kavanlouei, M. (2015). Temperature and frequency dependence of electromagnetic properties of sintering Li–Zn ferrites with nano SiO<sub>2</sub> additive. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 384, 276–283 doi: 10.1016/j.jmmm.2015.02.053
5. Tsepelev, V., Starodubtsev, Y., Zelenin, V., Belozerov, V., Konashkov, V. (2015). Temperature affecting the magnetic properties of the Co<sub>79-x</sub>Fe<sub>3</sub>Cr<sub>3</sub>Si<sub>15</sub>B<sub>x</sub> amorphous alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 643, 280–282. doi: 10.1016/j.jallcom.2014.12.236
6. Jackiewicz, D., Szewczyk, R., Salach, J. (2013). Modelling the magnetic characteristics and temperature influence on constructional steels. *Solid State Phenomena*, 199, 466–471. doi: 10.4028/www.scientific.net/ssp.199.466
7. Lu, H., Zhu, Y., Hui, J. G. (2007). Measurement and modeling of thermal effects on magnetic hysteresis of soft ferrites. *IEEE Transactions on Magnetics*, 43(11), 3953–3960. doi: 10.1109/tmag.2007.904942
8. Kachniarz, M., Salach, J., Szewczyk, R., Bieńkowski, A., Korobiichuk, I. (2015). Investigation of temperature effect on magnetic characteristics of manganese-zinc ferrites. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6/5(78), 17–21. doi: 10.15587/1729-4061.2015.55410
9. Bushkova, V. S. (2017). Nyzkotemperaturnie mahnytnie svoistva ferrytov. *Low Temperature Physics*, 43(12), 1724–1732. Available at: <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/176281/04Bushkova.pdf?sequence=1>
10. Durieiev, V. O. (2019) Vyznachennia dynamichnykh parametriv spovishchuvachiv za danymy eksperymentu. *Problemy pozhezhnoi bezpeky*, 46, 54–56. Available at: <https://nuczu.edu.ua/images/topmenu/science/zbirky-naukovykh-prats-ppb/ppb46/Dureev.pdf>
11. Zabara, S. *Modelyuvannya sistem u seredovishchi MATLAB*. (2015). Universitet Ukraïna, 137. Available at: <https://www.yakaboo.ua/modeljuvannja-sistem-u-seredovishchi-matlab.html>

Надійшла до редколегії: 03.03.2023

Прийнята до друку: 11.04.2023