

УДК 614.8

- В. О. Дурєєв, 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., ст. викл. каф. (ORCID 0000-0003-2481-2030)
С. С. Якухін, ст. викл. каф. (ORCID 0009-0001-0224-0513)
О. А. Дерев'янюк, к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0002-3602-2055)
Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ТЕПЛООВОГО ПОЖЕЖНОГО СПОВІЩУВАЧА З ЗАЛЕЖНІСТЮ МАГНІТНОЇ ІНДУКЦІЇ ВІД ТЕМПЕРАТУРИ

Представлена математична модель пожежного сповіщувача з принципом залежності магнітної індукції від температури. Наведені рівняння динаміки сповіщувача з урахуванням магнітних властивостей феритових контактів чутливого елемента, умов теплообміну з оточуючим середовищем, параметрів намагніченості, магнітної індукції, типу та структури речовини контактів, що впливають на роботу сповіщувача. Характерною особливістю математичної моделі сповіщувача є комплексне урахування впливу магнітних властивостей та характеристик феритового матеріалу контактів на параметри спрацювання сповіщувача. Рівняння динаміки, отримані з математичної моделі сповіщувача описують його роботу на перехідних режимах та являють собою інерційні ланки першого порядку, записані у відносних змінних з постійними коефіцієнтами. Магнітна індукція та намагніченість контактів представлені відносними змінними, інерційність та коефіцієнт посилення ураховані постійними величинами. Рівняння динаміки дозволяють зручним чином досліджувати роботу пожежного сповіщувача та проводити параметричні розрахунки його параметрів спрацювання з урахуванням залежності магнітних властивостей контактів чутливого елемента від температури та структури феритового матеріалу контактів. Отримані результати розрахунків параметрів спрацювання сповіщувача підтверджують правильність прийнятої гіпотези. Відмінність отриманих в розрахунках температури та часу спрацювання не перевищує 5 % від експериментальних даних. В якості обмеження використання представленої моделі є застосування в розрахунках заданих параметрів магнітного поля постійного магніту, характеристик речовини феритових контактів, визначених залежностей магнітної індукції контактів від температури та умов конвективного теплообміну сповіщувача з оточуючим середовищем. В якості конструктивних шляхів покращення параметрів спрацювання сповіщувача наведено рекомендації по будові чутливого елемента, а саме збільшення загальної площі теплового контакту для покращення умов конвекційного теплообміну, зменшення маси контактів чутливого елемента для зменшення інерційності, часу та температури спрацювання сповіщувача.

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

1. Вступ

Сучасні системи пожежної сигналізації застосовують теплові пожежні сповіщувачі, чутливий елемент яких виявляє теплову ознаку пожежі за принципом залежності магнітної індукції від температури. Зміна температури оточувального середовища призводить до зміни магнітних властивостей феритових контактів чутливого елемента. Коли температура контактів досягає точки Кюрі, яка фактично є ідентифікацією стану пожежі, контакти з фериту втрачають магнітні властивості і розмикаються, формуючи таким чином сигнал пожежної тривоги. Чутливий елемент сповіщувача розташовано в герметично запаяній капсулі – герконі, що забезпечує стабільність технічних характеристик в нормальних умовах експлуатації.

Дослідження роботи означених сповіщувачів дозволяє підібрати оптимальні параметри їх роботи, що забезпечує підвищення якості виявлення пожежі систе-

мою пожежної сигналізації та роботи системи протипожежного захисту в цілому. Такі дослідження ґрунтуються на урахуванні параметрів спрацювання чутливого елемента при відомих технічних даних, геометричних характеристик, складу та структури речовини контактної групи.

Відомо, що технічна документація пожежних сповіщувачів не містить інформацію про технічні дані чутливих елементів, їх динамічні параметри роботи та характеристики спрацювання. Крім того, документація сповіщувача не надає відомості про структуру, склад та геометричні характеристики контактів чутливого елемента, що в свою чергу ще сильніше ускладнює процес дослідження параметрів роботи пожежного сповіщувача.

Таким чином, моделювання роботи пожежного сповіщувача з залежністю магнітної індукції від температури з урахуванням виду речовини, структури, складу та геометричних характеристик контактів чутливого елемента є важливим для визначення параметрів спрацювання пожежного сповіщувача і дозволяє покращити якість роботи автоматичної системи пожежної сигналізації. Тому актуальним напрямом є проведення досліджень направлених на розробку пожежних сповіщувачів з покращеними параметрами спрацювання.

2. Аналіз літератури та постановка проблеми

В [1] показано, що зміна структури кобальтового фериту (CoFe_2O_4) методами мокрого хімічного осадження значним чином змінює його фізичні та оптичні властивості при температурах характерних для роботи пожежних сповіщувачів (300 К). Наведено результати досліджень структурної стабільності кобальтових феритів на їх магнітні властивості. Проте в роботі не наведено формул для визначення залежності магнітної індукції від температури.

В [2] наведено результати досліджень залежності складу, мікроструктури та магнітних властивостей феритів кобальту, заміщених марганцем, з олеат-покритими структурами $\text{Mn}_x\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ при зміні співвідношення Co/Mn . Ураховувалися розмір кристалів та частинок, що визнають структуру фериту. Також проведено визначення залежності намагніченості фериту та його магнітного поля від температури з урахуванням структури речовини. Виявлено залежності магнітних властивостей від структури фериту.

В [3] розглянуто вплив структури MFe_2O_4 -феритів з наночастками, на їх магнітні та електричні властивості. Показано, що структура та методи утворення феритів значно впливають на їх магнітні та електричні характеристики. Наведені чисельні значення параметрів намагніченості насичення та залишкової намагніченості для MFe_2O_4 -феритів різної структури. Проте, залежностей для аналітичного визначення магнітних властивостей в роботі не наведено.

В [4] представлено результати дослідження магнітних властивостей CoZnFeO -наноферитів за кімнатної температури. Визначені параметри намагніченості насичення та залишкової намагніченості в залежності від структури та складу фериту. Приведено обґрунтування залежності магнітних властивостей Co-Zn феритів від їх структури, що узгоджено мікроструктурними спостереженнями. Температурний вплив на зміну намагніченості фериту в роботі не розглядався.

В [5] показано залежності магнітних властивостей MCEF -фериту для температури до 35°C . в умовах температур, характерних кімнатній температурі. Наведено механізми зміни магнітних властивостей від структури та складу феритного матеріалу. Наведено залежності намагніченості MCEF -фериту від величини магні-

тного полю. Показано вплив температури Кюрі на параметри намагніченості. При цьому застосування феритів та визначення динамічних параметрів спрацювання феритних матеріалів при зміні температури не проводилося.

В [6] проведена оцінка впливу структури та складу однофазних феритів на їх магнітні властивості. Ураховувався вплив структури матеріалу, фазового складу та розміру кристалітів на намагніченість насичення та магнітну анізотропію. Показана та описана залежність магнітних властивостей фериту від структури феритного матеріалу, параметрів пористості та наявності структурних дефектів. Однак рівнянь для визначення динамічних параметрів феритів не наведено.

В [7] наведено результати комплексного дослідження властивостей $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$ -фериту. Оцінено вплив мікроструктури фериту на його магнітні властивості. Виявлено залежності зміни магнітних властивостей фериту від температури, що обумовлено структурою матеріалу. Визначено вплив структурних особливостей фериту на його параметри намагніченості. При цьому рівняння динаміки, що ураховують залежність магнітних властивостей фериту від температури, в роботі не представлено.

В [8] представлено результати розробки $CoFe_2O_4$ -фериту. Наведено магнітні та електричні характеристики фериту в діапазоні температур від $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Виявлена суперпарамагнітна властивість фериту та досліджено зміну властивостей фериту при зміні його структури. Представлено графічні залежності намагніченості фериту від магнітного поля та його структури. Питання щодо отримання динамічних параметрів фериту в роботі не розглядалися.

В [9] представлено результати досліджень магнітних властивостей $Co_xZn_xFe_2O_4$ -фериту легovanого Zn. Показано вплив параметрів структури фериту на магнітні властивості фериту, наведено залежності магнітних властивостей від температури. Обґрунтовано поведінку магнітних властивостей фериту як функції легування та температури під впливом зовнішнього магнітного поля. Моделювання взаємодії зразків фериту з зовнішнім середовищем з метою отримання динамічних рівнянь не виконувалось.

В [10] досліджувалися магнітні властивості кобальтового фериту в залежності від пористості його мікроструктур при температурах до 30°C . Наведені графічні результати досліджень та представлені аналітичні залежності, що описують залежність магнітних властивостей фериту від температури для кобальтового фериту з різними параметрами пористості. Показана можливість вибору параметрів намагніченості фериту при зміні його структури. Проте моделювання застосування кобальтового фериту з метою отримання динамічних рівнянь в роботі не проводилося.

В [11] представлені результати дослідження магнітних та екрануючих властивостей нанокompозитного Zn-Al фериту. Представлена структура фериту за показано вплив її зміни на параметри екрануючої здатності та магнітної насиченості. Представлені графічні результати залежності намагніченості насичення та залишкової намагніченості нанокompозитного Zn-Al фериту від зміни його структури та величини зовнішнього магнітного поля. Наведені аналітичні залежності параметрів екрануючої здатності фериту від структури та температури середовища. Співвідношення з визначення динамічних параметрів застосування фериту в якості чутливого елемента, в роботі не представлено.

В [12] наведено результати дослідження магнітних властивостей нанокристалічних феритів $MxFe_3-xO_4$ з M (Fe, Co, Zn). Проаналізовано вплив структури

феритів на показники намагніченості, показано механізм впливу структури на магнітні властивості феритів що досліджувалися. Наведено аналітичні співвідношення для визначення намагніченості в залежності від температури. Проте моделювання спрацювання та отримання динамічних рівнянь для контактів з означеними феритами в роботі не проводилося.

В [13] показано результати дослідження впливу структури Zn-фериту легovanого Mn на його магнітні властивості. Показано та пояснено характерні структурні зміни фериту та їх залежність від прикладеного магнітного поля. Досліджено вплив форми наночасток (стрижнів, голок, кластерів) і температури на структурні зміни. Магнітні властивості зразків фериту з різною структурою досліджувалися на підставі залежностей намагніченості та магнітного поля від температури. Динамічні параметри застосування Zn-фериту в роботі авторами не досліджувалися.

В [14] представлені результати дослідження впливу структури на магнітні властивості однодомених кристалічних наночастинок фериту міді. Виконано аналіз впливу колегуювання на структуру та магнітні властивості чистого мідного фериту $\text{CuFe}_2\text{-O}_4$. Виявлено закономірності будови структури фериту в залежності від його щільності. Виконано аналіз намагніченості фериту в залежності від температури, структури та наведеного магнітного поля. Моделювання рівнянь динаміки з застосуванням досліджуваного типу фериту не проводилося.

Для параметричних досліджень характеристик спрацювання теплового пожежного сповіщувача доцільно застосувати VisSim та Maple [12]. Використання наведених програм можливе лише на кінцевому етапі досліджень, коли сформульована математична модель сповіщувача та отримане рівняння динаміки його роботи.

Отже, невирішеною частиною проблеми покращення ефективності роботи системи раннього виявлення пожежі, є розробка математичної моделі сповіщувача з чутливим елементом, що ураховує залежність магнітної індукції від температури та вплив складу, форми і структури матеріалу чутливого елемента на параметри його роботи.

3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи є покращення параметрів роботи системи пожежної сигналізації за рахунок моделювання роботи пожежного сповіщувача з принципом залежності магнітної індукції від температури, при дослідженні залежності параметрів спрацювання від динамічних характеристик чутливого елемента.

Для досягнення мети потрібно вирішити наступні завдання:

- скласти математичну модель сповіщувача з урахуванням параметрів чутливого елемента;
- отримати рівняння динаміки сповіщувача та дослідити параметри його роботи.

4. Матеріали та методи досліджень

В якості об'єкту дослідження прийнято залежність магнітної індукції контактів чутливого елемента від температури. Предметом дослідження є моделювання роботи пожежного сповіщувача для дослідження його параметрів спрацювання. Прийнятою гіпотезою є припущення рівномірності прогріву контактів чутливого елемента сповіщувача при визначені їх намагніченості.

Структурно-динамічне моделювання сповіщувача виконано за допомогою Fire safety. DOI: 10.52363/2524-0226-2026-43-10

VisSim. Дослідження залежності магнітної індукції контактів чутливого елемента від температури з урахуванням їх структури та параметричні дослідження характеристик спрацювання сповіщувачів, визначення інерційності, температури та часу спрацювання при заданій швидкості зміни температури, проводилося з застосуванням Maple.

5. Розробка математичної моделі сповіщувача

Значна кількість сучасних теплових пожежних сповіщувачів виявляють теплову ознаку пожежі за допомогою чутливого елемента, що працює за принципом залежності магнітної індукції контактів від температури (СПТМ-62, СПТМ-70).

Математична модель такого сповіщувача буде складатися з рівняння, що описує залежність його магнітних властивостей від температури та рівняння теплового балансу, що ураховує поглинуту чутливим елементом сповіщувача енергію нагріву від оточувального середовища.

В силу великого різноманіття типу матеріалів контактів, їх структури та станів роботи, розглянемо залежність їх магнітних властивостей для типових матеріалів в діапазоні робочих температур (293÷363 К). Так для феритів кобальту зі структурами $Mn_xCo_{1-x}Fe_2O_4$ залежність намагніченості від температури [2]:

$$M_{Co} = 0,96 \frac{K}{H_C} \left(1 - \frac{a}{H} - \frac{b}{H^2} \right) \left(1 - \frac{T}{T_B} \right)^{0,77}, \quad (1)$$

де K – константа анізотропії; H_C – коерцитова сила, $A \cdot m^{-1}$; H – зовнішнє магнітне поле, $A \cdot m^{-1}$; a – параметр комірки кристалу фериту; b – стандартне відхилення розподілу розмірів частинок фериту, %; T_B – температура блокування, К; T – поточна температура, К.

Для Mn-Cu феритів магнітні властивості мають вигляд [5]:

$$M_{MnCu} = M_S \left(1 - \frac{a}{H} - \frac{b}{H^2} \right) + K_1 \frac{H_C M_S}{0,96}, \quad (2)$$

а з урахуванням [2]:

$$M_{MnCu} = 0,96 \frac{K}{H_C} \left(1 - \frac{a}{H} - \frac{b}{H^2} + \frac{H_C}{0,96} \right) \left(1 - \frac{T}{T_B} \right)^{0,77}, \quad (3)$$

де M_S – намагніченість насичення Mn-Cu фериту, $A \cdot m^{-1}$; K_1 – ефективна константа анізотропії.

Для феритів що утворені з $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$ -наночасток, залежність намагніченості від температури має вигляд [7]:

$$M_{HЧ} = M_A - M_B = \left[N_A \mu_B g_A J_A B \frac{g_A J_A H_A}{k_B} \mu_B - N_B \mu_B g_B J_B B \frac{g_B J_B H_B}{k_B} \mu_B \right] \frac{1}{T}, \quad (4)$$

де M_A, M_B – середні магнітні моменти позицій А та Б фериту, $A \cdot m^{-1}$; N_A, N_B – кількість атомів відповідної позиції на одиницю об'єму; μ_B – магнетон Бора, Дж·Тл⁻¹; g_A, g_B – фактор Ланде відповідної позиції наночастки фериту – безрозмірний мно-

жник, що характеризує зв'язок між магнітним та механічним моментами атомів/іонів у кристалічній решітці фериту; J_A, J_B – загальні кутові моменти позиції фериту; B – функція Бріллюена; H_A, H_B – магнітне поле, що діє на відповідну позицію фериту, $A \cdot m^{-1}$; k_B – постійна Больцмана, $Dж \cdot K^{-1}$.

Для фериту що складається з наночасток кобальту, синтезованих методом спільного осадження, магнітні властивості визначаються [8]:

$$M_{HCo} = M_S \mu L_\Phi \frac{H}{k_B T}, \quad (5)$$

де μ – магнітний момент наночастки фериту; L_Φ – параметр намагніченості фериту. Для $Co-xZnxFer_2O_4$ -фериту легованого Zn намагніченість визначається [9]

$$M_{CoZn} = M_S - \frac{M_S}{N} \left(e^{\frac{-E_1}{k_B N}} + e^{\frac{-E_2}{k_B N}} \right), \quad (6)$$

де N – число Авогадро, $моль^{-1}$; E_1, E_2 – енергетичні рівні структури фериту.

Диференційне рівняння залежності магнітної індукції кобальтового фериту від температури [10]

$$B_{Co\Phi} = B_0 \left(1 - \frac{k_B T}{KV} \right), \quad (7)$$

де $B_{Co\Phi}$ – магнітна індукція кобальтового фериту, $мА \cdot c^{-2}$; B_0 – екстрапольоване значення магнітної індукції кобальтового фериту при $0K$, $мА \cdot c^{-2}$; K – константа магнітної анізотропії $Dж \cdot m^{-3}$; V – об'єм наночастинки кобальтового фериту, m^3 .

Кількість поглинутого тепла чутливим елементом сповіщувача визначається рівнянням теплового балансу

$$C \cdot m \cdot d \frac{dT}{d\tau} + \alpha F dT = \alpha F dT_{\Pi}, \quad (8)$$

де C – теплоємність матеріалу контактів, $Dж \cdot кг^{-1} \cdot K^{-1}$; m – маса контактів, $кг$; τ – час, $сек$; T – температура контактів, K ; F – площа поверхні контактів, m^2 ; α – коефіцієнт конвекційного теплообміну, $Вт \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$; T_{Π} – температура навколишнього повітря, K .

Таким чином, математична модель пожежного сповіщувача складаються з рівнянь залежності магнітних властивостей феритових контактів (1, 3÷7) від температури навколишнього середовища та кількості тепла, поглинутого чутливим елементом (8). Розроблена модель сповіщувача ураховує тип феритових контактів чутливого елементу, їх структуру та стан роботи.

6. Отримання рівняння динаміки сповіщувача та дослідження параметрів його роботи

Для отримання динамічного рівняння роботи пожежного сповіщувача, потрібно підставити значення його магнітних властивостей в рівняння теплового балансу. Для цього дорівнюємо в рівняннях (1, 3÷7) диференціали лівої та правої частин.

Для феритів кобальту зі структурами $MnxCo_{1-x}Fe_2O_4$

$$\frac{dM_{Co}}{dT} = \frac{K_{Co1}}{\left(1 - \frac{1}{T_B} T\right)^{0.23}}, \quad (9)$$

де

$$K_{Co1} = 0,7392 \frac{K}{H_C T_B} \left(\frac{a}{H} + \frac{b}{H^2} - 1 \right). \quad (10)$$

Для Mn-Cu феритів

$$\frac{dM_{MnCu}}{dT} = \frac{K_{MnCu1}}{\left(1 - \frac{1}{T_B} T\right)^{0.23}}, \quad (11)$$

де

$$K_{MnCu1} = 0,7392 \frac{K}{H_C T_B} \left(\frac{a}{H} + \frac{b}{H^2} - \frac{H_C}{0,96} - 1 \right). \quad (12)$$

Для феритів з Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe₂O₄-наночасток

$$\frac{dM_{HЧ}}{dT} = (K_1 K_3 \mu_B - K_2 K_4 \mu_B) \frac{1}{T^2}, \quad (13)$$

де

$$K_1 = N_B \mu_B g_B J_B V; \quad K_2 = N_A \mu_B g_A J_A V; \quad K_3 = \frac{g_B J_B H_B}{k_B}; \quad K_4 = \frac{g_A J_A H_A}{k_B}. \quad (14)$$

Для фериту з наночасток кобальту, синтезованих методом спільного осадження

$$\frac{dM_{HЧCo}}{dT} = -M_S \mu_L \Phi \frac{H}{k_B T^2}. \quad (15)$$

Для Co-xZnxFe₂O₄-фериту легovanого Zn намагніченість визначається [9]

$$\frac{dM_{CoZn}}{dT} = -\frac{M_S}{NT^2} (k_{CZ1} + k_{CZ2}), \quad (16)$$

Де

$$k_{CZ1} = -\frac{E_1}{k_B} e^{\frac{-E_1}{k_B T}}; \quad k_{CZ2} = -\frac{E_2}{k_B} e^{\frac{-E_2}{k_B T}}. \quad (17)$$

Для магнітної індукції кобальтового фериту

$$\frac{dB_{Co\Phi}}{dT} = -B_o \frac{k_B}{KV}. \quad (18)$$

Підставимо отримані рівняння (9, 11, 13, 15, 16, 18) в рівняння теплового балансу (8). Тоді, для феритів кобальту зі структурами $Mn_xCo_{1-x}Fe_2O_4$

$$C_m \frac{\left(1 - \frac{1}{T_B} T\right)^{0,23}}{K_{Co1}} d \frac{dM_{Co}}{d\tau} + \alpha F \frac{\left(1 - \frac{1}{T_B} T\right)^{0,23}}{K_{Co1}} dM_{Co} = \alpha F dT_{II}. \quad (19)$$

Для Mn-Cu феритів

$$C_m \frac{\left(1 - \frac{1}{T_B} T\right)^{0,23}}{K_{MnCu1}} d \frac{dM_{MnCu}}{d\tau} + \alpha F \frac{\left(1 - \frac{1}{T_B} T\right)^{0,23}}{K_{MnCu1}} dM_{MnCu} = \alpha F dT_{II}. \quad (20)$$

Для феритів з $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$ -наночасток

$$C_m \frac{T^2}{K_1 K_3 \mu_B - K_2 K_4 \mu_B} d \frac{dM_{HЧ}}{d\tau} + \alpha F \frac{T^2}{K_1 K_3 \mu_B - K_2 K_4 \mu_B} dM_{HЧ} = \alpha F dT_{II}. \quad (21)$$

Для фериту з наночасток кобальту, синтезованих методом спільного осадження

$$C_m \frac{T^2}{K_1 K_3 \mu_B - K_2 K_4 \mu_B} d \frac{dM_{HЧ}}{d\tau} + \alpha F \frac{T^2}{K_1 K_3 \mu_B - K_2 K_4 \mu_B} dM_{HЧ} = \alpha F dT_{II}. \quad (22)$$

Для $Co-xZn_xFe_2O_4$ -фериту легованого Zn намагніченість визначається [9]

$$C \cdot m \cdot \frac{NT^2}{-M_s(k_{CZ1} + k_{CZ2})} d \frac{dM_{CoZn}}{d\tau} + \alpha F \frac{NT^2}{-M_s(k_{CZ1} + k_{CZ2})} M_{CoZn} = \alpha F dT_{II}. \quad (23)$$

Для магнітної індукції кобальтового фериту

$$C \cdot m \cdot \frac{KV}{-B_o k_B} d \frac{dB_{Co\Phi}}{d\tau} + \alpha F \frac{KV}{-B_o k_B} dB_{Co\Phi} = \alpha F dT_{II}. \quad (24)$$

Лінеаризація отриманих рівнянь (19÷24) методом повного диференціалу дозволяє отримати рівняння динаміки теплового пожежного сповіщувача.

Для феритів кобальту зі структурами $Mn_xCo_{1-x}Fe_2O_4$

$$T_{Co} \dot{\bar{m}} + \bar{m} = K_{Co} \bar{t}_{II}. \quad (25)$$

де

$$T_{Co} = \frac{Cm}{\alpha F}; K_{Co} = \frac{K_{Co1}}{s \left(1 - \frac{1}{T_B} T\right)^{0.23}} \frac{T_{\Pi 0}}{M_{Co0}}. \quad (26)$$

Для Mn-Cu феритів

$$T_{MnCu} \dot{\bar{m}} + \bar{m} = K_{MnCu} \bar{t}_{\Pi}. \quad (27)$$

де

$$K_{MnCu} = \frac{K_{MnCu1}}{s \left(1 - \frac{1}{T_B} T\right)^{0.23}} \frac{T_{\Pi 0}}{M_{MnCu0}}; T_{MnCu} = \frac{Cm}{\alpha F}. \quad (28)$$

Для феритів з Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe₂O₄-наночасток

$$T_{HЧ} \dot{\bar{m}} + \bar{m} = K_{HЧ} \bar{t}_{\Pi}. \quad (29)$$

де

$$T_{HЧ} = \frac{Cm}{\alpha F}; K_{MnCu} = \frac{K_1 K_3 \mu_B - K_2 K_4 \mu_B}{T^2} \frac{T_{\Pi 0}}{M_{MnCu0}}. \quad (30)$$

Для фериту з наночасток кобальту, синтезованих методом спільного осадження

$$T_{HЧCo} \dot{\bar{m}} + \bar{m} = K_{HЧCo} \bar{t}_{\Pi}, \quad (31)$$

де

$$T_{HЧCo} = \frac{Cm}{\alpha F}; K_{HЧCo} = \frac{-M_S \mu_L \Phi H}{k_B T^2} \frac{T_{\Pi 0}}{M_{HЧCo0}}, \quad (32)$$

Для Co-xZnxFe₂O₄-фериту легованого Zn намагніченість визначається [9]

$$T_{CoZn} \dot{\bar{m}} + \bar{m} = K_{CoZn} \bar{t}_{\Pi}, \quad (33)$$

де

$$T_{CoZn} = \frac{Cm}{\alpha F}; K_{CoZn} = \frac{-M_S (k_{CZ1} + k_{CZ2})}{NT^2} \frac{T_{\Pi 0}}{M_{CoZn0}}. \quad (34)$$

Для магнітної індукції кобальтового фериту

$$T_{Co\Phi} \dot{\bar{m}} + \bar{m} = K_{Co\Phi} \bar{t}_{\Pi}, \quad (35)$$

де

$$T_{\text{СоФ}} = \frac{Cm}{\alpha F}; K_{\text{СоФ}} = \frac{-B_0 k_B}{KV} \frac{T_{\text{П0}}}{B_{\text{СоФ0}}}. \quad (36)$$

Таким чином, отримано рівняння (25, 27, 29, 31, 33, 35) динаміки пожежного сповіщувача з принципом залежності магнітної індукції від температури з урахуванням структури та матеріалу контактів чутливого елемента. На підставі отриманих рівнянь, проведемо параметричні дослідження характеристик спрацювання пожежного сповіщувача [16÷18]

$$T_{\text{СП}} = \frac{60 \cdot (T_{\text{ДИН}} - T_{\text{СТАТ}})}{\frac{dT}{d\tau} \cdot K_{\text{СП}}}; \quad (37)$$

$$T_{\text{ДИН}} = \frac{60 T_{\text{СТАТ}} + K_{\text{СП}} T_{\text{СП}} \cdot \frac{dT}{d\tau}}{60}; \quad (38)$$

$$\tau_{\text{СПР}} = \frac{60 \cdot (T_{\text{СТАТ}} - T_0) + T_{\text{СП}} \frac{dT}{d\tau}}{\frac{dT}{d\tau}}, \quad (39)$$

де $T_{\text{СП}}$ – інерційність сповіщувача, сек; $T_{\text{ДИН}}$, $T_{\text{СТАТ}}$ – динамічна та статична температури спрацювання сповіщувача, К; $\tau_{\text{СПР}}$ – час спрацювання сповіщувача, сек; $dT/d\tau$ – швидкість зростання температури, $\text{К} \cdot \text{сек}^{-1}$.

В табл. 1 та рис. 1. представлені результати параметричних досліджень характеристик спрацювання пожежного сповіщувача у порівнянні з даними експерименту з застосуванням СПТМ-70.

Таб. 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	90
$\tau_{\text{СПР РОЗР}}$, с		456	240	132	95
$T_{\text{СП ЕКСП}}$, с		24			

Таким чином, в процесі моделювання роботи пожежного сповіщувача з принципом залежності магнітної індукції від температури було отримано рівняння динаміки і проведено визначення параметрів спрацювання сповіщувача. Динамічне рівняння являє собою реальну позиційну ланку з відносними змінними та постійними коефіцієнтами.

Рівняння динаміки ураховують залежність магнітної індукції від температури та вплив структури та типу матеріалу феритових контактів чутливого елемента пожежного сповіщувача на параметри його роботи. Рівняння являють собою стандартну інерційну ланку першого порядку, що надає додаткову зручність при дослідженні характеристик роботи пожежного сповіщувача, та проведення парамет-

ричних розрахунків його динамічних параметрів. Відмінність отриманих в розрахунках (37÷39) температури та часу спрацювання не перевищує 5 % від експериментальних даних.

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

Розроблено математичну модель пожежного сповіщувача в якості чутливого елемента якого виступають феритові контакти з залежністю магнітної індукції від температури. Характерною особливістю розробленої математичної моделі сповіщувача є можливість урахування впливу типу та структури матеріалу феритових контактів чутливого елемента на характеристики його спрацювання.

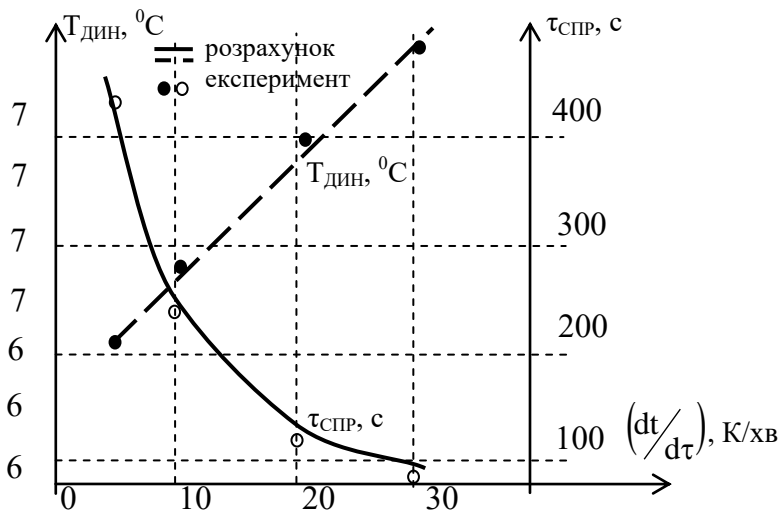


Рис. 1. Характеристики спрацювання пожежного сповіщувача

Відмінною ознакою розробленої моделі сповіщувача є можливість урахування типу та структури феритових контактів, які в попередніх роботах не урахувалися і не досліджувалися: ферит кобальту зі структурою $Mn_xCo_{1-x}Fe_2O_4$, Mn-Cu ферит, ферит що утворено з $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$ -наночасток, ферит з наночасток кобальту синтезованих методом спільного осадження, $Co-xZn_xFe_2O_4$ -ферит легований Zn. Так для контактів чутливого елемента, матеріалом яких є ферит кобальту зі структурами $Mn_xCo_{1-x}Fe_2O_4$ ураховуються: константа анізотропії K , коерцитова сила H_C , параметр комірки кристалу фериту a , стандартне відхилення розподілу розмірів частинок фериту b , зовнішнє магнітне поле H , температура блокування T_B , поточна температура контактів T , маса контактів m , теплоємність матеріалу контактів C , коефіцієнт конвекційного теплообміну α , площа контактів F , температура оточувального середовища $T_{\text{от}}$. Для контактів чутливого елемента з Mn-Cu фериту модель ураховує: намагніченість насичення Mn-Cu фериту M_S , ефективну константу анізотропії K_1 , константу анізотропії K , коерцитову силу H_C , параметр комірки кристалу фериту a , стандартне відхилення розподілу розмірів частинок фериту b , зовнішнє магнітне поле H , температуру блокування T_B , поточну температуру контактів T , масу контактів m , теплоємність матеріалу контактів C , коефіцієнт конвекційного теплообміну α , площу контактів F , температуру оточувального середовища $T_{\text{от}}$. Для контактів з феритових $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$ -наночасток в моделі ураховуються: середні магнітні моменти позицій А та Б фериту M_A/M_B , кількість атомів відповідної позиції на одиницю об'єму N_A/N_B , маг-

нетон Бора $\mu\text{В}$, фактор Ланде відповідної позиції наночастки фериту, магнітний та механічний моменти атомів/іонів у кристалічній решітці фериту g_A/g_B , загальні кутові моменти позиції фериту J_A/J_B , функція Бріллюена B , магнітне поле, що діє на відповідну позицію фериту H_A/H_B , постійна Больцмана k_B , поточна температура контактів T , маса контактів m , теплоємність матеріалу контактів C , коефіцієнт конвекційного теплообміну α , площа контактів F , температура оточувального середовища $T_{\text{П}}$. Якщо контакти мають ферит з наночастками кобальту які синтезуються методом спільного осадження, математична модель ураховує: намагніченість насичення фериту M_S , магнітний момент наночастки фериту μ , параметр намагніченості фериту L_{Φ} , зовнішнє магнітне поле H , постійну Больцмана k_B , поточну температуру контактів T , масу контактів m , теплоємність матеріалу контактів C , коефіцієнт конвекційного теплообміну α , площу контактів F , температуру оточувального середовища $T_{\text{П}}$. Для контактів з $\text{Co-xZnxFe}_2\text{O}_4$ -фериту легованого Zn модель ураховує: намагніченість насичення фериту M_S , число Авогадро N , енергетичні рівні структури фериту E_1/E_2 , постійну Больцмана k_B , поточну температуру контактів T , масу контактів m , теплоємність матеріалу контактів C , коефіцієнт конвекційного теплообміну α , площу контактів F , температуру оточувального середовища $T_{\text{П}}$. Модель контактів з кобальтового фериту ураховує: магнітну індукцію кобальтового фериту $B_{\text{СоФ}}$, екстрапольоване значення магнітної індукції кобальтового фериту при 0К B_0 , константу магнітної анізотропії K , об'єм наночастинки кобальтового фериту V , постійну Больцмана k_B , поточну температуру контактів T , масу контактів m , теплоємність матеріалу контактів C , коефіцієнт конвекційного теплообміну α , площу контактів F , температуру оточувального середовища $T_{\text{П}}$.

Урахування наведених параметрів в рівняннях динаміки дозволило урахувати характеристики та структуру феритових контактів чутливого елемента та залежність їх магнітної індукції від температури. Рівняння динаміки являють собою інерційні ланки першого порядку. Магнітна індукція контактів, їх намагніченість та температура середовища що оточує пожежний сповіщувач являють собою відносні змінні. Постійна часу та коефіцієнт посилення сповіщувача в рівнянні є постійними значеннями. Отримані рівняння динаміки сповіщувача дозволяють проводити параметричні дослідження роботи пожежного сповіщувача та визначати характеристики його спрацювання з урахуванням залежності магнітної індукції від температури для різних типів та структур феритових контактів чутливого елемента.

Отримані розрахункові значення параметрів спрацювання пожежного сповіщувача мають якісне співпадіння з експериментальними даними.

Результати розрахунків підтверджують, що магнітна індукція контактів чутливого елемента визначається з комплексним урахуванням складу, структури та магнітних властивостей феритових контактів при зміні навколишньої температури.

В якості обмеження застосування представленої моделі є потреба у визначенні залежності магнітної індукції та намагніченості феритових контактів від температури, характеристик та структури феритових контактів, параметрів конвективного теплообміну. Недоліком розробленої моделі сповіщувача є неможливість урахування зміни магнітного поля постійного магніту та магнітного моменту контактів при зміні температури чутливого елемента.

Подальшим розвитком представлено підходу до моделювання роботи сповіщувача є урахування намагніченості контактів при початковій температурі, визначення залежності магнітного поля постійного магніту від температури, визначення магнітних параметрів контактів чутливого елемента в діапазоні роботи

сповіщувача. Проте, комплексне урахування наведених характеристик хоча і дозволяє знизити погрішність визначення розрахункових параметрів спрацювання сповіщувача, але приводить до значного ускладнення його математичної моделі. Додавання в рівняння нелінійних параметрів роботи сповіщувача потребує рішення окремої задачі лінеаризації отриманих рівнянь, що являє собою окреме складне завдання.

Слід зауважити, що саме запропонований в роботі узагальнений підхід моделювання роботи пожежного сповіщувача дозволяє отримати більш універсальні результати, що в свою чергу спрощує дослідження параметрів спрацювання сповіщувача. Хоча величина погрішностей отриманих результатів розрахунків не завжди дозволяє провести якісне дослідження параметрів роботи сповіщувачів з контактами чутливого елемента іншої структури.

8. Висновки

1. Представлена математична модель теплового пожежного сповіщувача з залежністю магнітної індукції від температури. Матеріал контактів чутливого елемента сповіщувача являє собою структуру фериту кобальту зі структурою $Mn_xCo_{1-x}Fe_2O_4$, Mn-Cu ферит, ферит що утворено з $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$ -наночасток, ферит з наночасток кобальту синтезованих методом спільного осадження, $Co_xZn_xFe_2O_4$ -ферит легований Zn. Визначено та підтверджено експериментальними даними, що дослідження параметрів спрацювання пожежного сповіщувача потрібно проводити з урахуванням залежності магнітної індукції контактів чутливого елемента від температури, параметрів магнітного поля постійного магніту та особливостей теплообміну чутливого елемента з навколишнім середовищем. Крім того, в математичній моделі сповіщувача треба врахувати тип та структуру феритових контактів чутливого елемента. Модель сповіщувача, контакти якого складаються з фериту кобальту зі структурою $Mn_xCo_{1-x}Fe_2O_4$, ураховує 12 факторів: константу анізотропії, коерцитову силу, параметр комірки кристалу фериту, стандартне відхилення розподілу розмірів частинок фериту, зовнішнє магнітне поле, температуру блокування, поточну температуру контактів, масу контактів, теплоємність матеріалу контактів, коефіцієнт конвекційного теплообміну, площу контактів, температуру оточувального середовища. Для контактів чутливого елемента з Mn-Cu фериту модель ураховує 14 факторів: намагніченість насичення фериту, ефективну константу анізотропії, константу анізотропії, коерцитову силу, параметр комірки кристалу фериту, стандартне відхилення розподілу розмірів частинок фериту, зовнішнє магнітне поле, температуру блокування, поточну температуру контактів, масу контактів, теплоємність матеріалу контактів, коефіцієнт конвекційного теплообміну, площу контактів, температуру оточувального середовища. У випадку контактів з феритових $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$ -наночасток, модель ураховує 20 факторів: середні магнітні моменти двох позицій фериту, кількість атомів двох позицій фериту на одиницю об'єму, магнетон Бора, фактор Ланде відповідної позиції наночастки фериту, магнітний та механічний моменти атомів/іонів у кристалічній решітці фериту, загальні кутові моменти двох позицій фериту, функцію Бріллюена, магнітні поля що діють на дві позиції фериту, постійну Больцмана, поточну температуру контактів, масу контактів, теплоємність матеріалу контактів, коефіцієнт конвекційного теплообміну, площу контактів, температуру оточувального середовища. Для контактів з фериту з наночастками кобальту, що синтезувалися методом спільного осадження, математична модель ураховує 11 факторів: намагніченість насичення фериту, магнітний момент нано-

частки фериту, параметр намагніченості фериту, зовнішнє магнітне поле, постійну Больцмана, поточну температуру контактів, масу контактів, теплоємність матеріалу контактів, коефіцієнт конвекційного теплообміну, площу контактів, температуру оточувального середовища. Для контактів з $\text{Co-xZnxFe}_2\text{O}_4$ -фериту легovanого Zn модель ураховує 11 факторів: намагніченість насичення фериту, число Авогадро, енергетичні рівні двох структур фериту, постійну Больцмана, поточну температуру контактів, масу контактів, теплоємність матеріалу контактів, коефіцієнт конвекційного теплообміну, площу контактів, температуру оточувального середовища. В модель контактів з кобальтового фериту враховано 11 факторів: магнітна індукція кобальтового фериту, екстрапольоване значення магнітної індукції кобальтового фериту при 0К, константа магнітної анізотропії, об'єм наночастинки кобальтового фериту, постійна Больцмана, поточна температура контактів, маса контактів, теплоємність матеріалу контактів, коефіцієнт конвекційного теплообміну, площа контактів, температура оточувального середовища.

2. Отримані динамічні рівняння роботи пожежного сповіщувача та проведено дослідження параметрів його спрацювання. В рівняннях враховано залежність магнітної індукції феритових контактів від температури, їх структура та характеристики магнітного поля постійного магніту. Відмінність отриманих в розрахунках температури та часу спрацювання не перевищує 5 % від експериментальних даних. З метою покращення параметрів спрацювання пожежного сповіщувача є потреба розміщення на герконі додаткового теплового радіатора, що зменшить час прогріву та інерційність спрацювання сповіщувача. Також доцільно в моделі пожежного сповіщувача урахувати параметри намагніченості феритових контактів різної структури, характеристик магнітного поля постійного магніту геркону та створити можливість розширити температурний діапазон дослідження роботи пожежного сповіщувача.

Література

1. Baraliya J., Joshi H. Spectroscopy investigation of nanometric cobalt ferrite synthesized by different techniques. *Vibrational Spectroscopy*. 2014. Vol. 74. P. 75–80. doi: 10.1016/j.vibspec.2014.07.013
2. Angotzi M., Mameli V., Zákutná D., Kubániová D., Cara C., Cannas C. Evolution of the Magnetic and Structural Properties with the Chemical Composition in Oleate-Capped $\text{MnxCo}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ Nanoparticles. *The Journal of Physical Chemistry*. 2021. Vol. 125. P. 20626–20638. doi: 10.1021/acs.jpcc.1c06211
3. Dippong T., Levei, E., Cadar O. Recent Advances in Synthesis and Applications of MFe_2O_4 (M=Co, Cu, Mn, Ni, Zn). *Nanoparticles*. *Nanomaterials*. 2021. Vol. 11. P. 1560. doi: 10.3390/nano11061560
4. Priti A., Kadam S. Tailoring Structural and Magnetic Properties of Co–Zn Ferrite Nanoparticles via Erbium Substitution. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*. 2025. P. 18. doi: 10.21203/rs.3.rs-7263499/v1
5. Abu-Elsaad N., Metwally R., Nawara A. Erbium Substituted Mn-Cu Ferrite Nanoparticles: Synthesis, Structural, Magnetic, and Antimicrobial Activity Properties. *Brazilian Journal of Physics*. 2025. Vol. 55(165). P. 18. doi: 10.1007/s13538-025-01784-z
6. Dippong T., Deac I., Levei E. Effect of Silica Embedding on the Structure, Morphology and Magnetic Behavior of $(\text{Zn}_{0.6}\text{Mn}_{0.4}\text{Fe}_2\text{O}_4)_\delta/(\text{SiO}_2)_{(100-\delta)}$ Nanoparticles. *Nanomaterials*. 2021. Vol. 11(9). P. 2232. doi: 10.3390/nano11092232
7. Bajorek A., Berger C., Dulski M., Łopadczak P., Zubko M. Microstructural and

magnetic characterization of Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe₂O₄ ferrite nanoparticles. Journal of Physics and Chemistry of Solids. 2019. Vol. 129. P. 1–21. doi: 10.1016/j.jpcs.2018.12.045

8. Alberton, K., Monteiro L., Moraes A., Bucar R. Morphologic, structural, and magnetic characterization of cobalt ferrite nanoparticles synthesized at different temperatures. International Journal for Innovation Education and Research. 2021. Vol. 9(9). P. 399–405. doi: 10.31686/ijer.vol9.iss9.3355

9. Bato K., Raslan E., Yang Y., Adil S. Structural, dielectric and low temperature magnetic response of Zn doped cobalt ferrite nanoparticles. AIP Advances. 2019. Vol. 9. P. 055202. doi: 10.1063/1.5078411

10. Palade P., Comanescu C., Kuncser V. Mesoporous Cobalt Ferrite Nanosystems Obtained by Surfactant-Assisted Hydrothermal Method: Tuning Morpho-structural and Magnetic Properties via pH-Variation. Nanomaterials. 2020. Vol. 10. P. 476. doi: 10.3390/nano10030476

11. Khalil H., Elsharkawy S., El-Batouti M. Zn-Al Ferrite/Polypyrrole Nanocomposites: Structure and Dielectric and Magnetic Properties for Microwave Applications. Polymers. 2024. Vol. 16(17). P. 2432. doi: 10.3390/polym16172432

12. Burzo. E., Tetean R. New Insights on the Spin Glass Behavior in Ferrites Nanoparticles. Nanomaterials. Vol. 12. 2022. P. 1782. doi: 10.3390/nano12101782

13. Bury P., Veveričík M., Cernobila F., Patel H. Effect of Mn-Doped ZnFe₂O₄ Ferrites on Structural Changes and Magneto Optical Behavior in Nematic Liquid. Crystals. 2025. Vol. 18. P. 5660. doi: 10.3390/ma18245660

14. Alzoubi G. The Effect of Co-Doping on the Structural and Magnetic Properties of Single-Domain Crystalline Copper Ferrite Nanoparticles. Magnetochemistry. 2022. Vol. 8. P. 164. doi: 10.3390/magnetochemistry8120164

15. Rahmani-Andebili M. MATLAB Lessons, Examples, and Exercises: A Tutorial for Beginners and Experts. Springer. 2024. P. 480. ISBN 978-3031761768.

16. Дурєєв В. О., Олійник В. В., Бондаренко С. М., Антошкін О. А., Малярів М. В., Мурін М. М. Розробка математичної моделі теплового пожежного сповіщувача з термопарою. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2025. № 2(42). С. 87–99. doi: 10.52363/2524-0226-2025-42-6

17. Pospelov B., Andronov V., Rybka E., Skliarov S. Research into dynamics of setting the threshold and a probability of ignition detection by selfadjusting fire detectors. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 5/9(89). P. 43–48. doi: 10.15587/1729-4061.2017.110092

18. Abramov Y., Kalchenko Y., Liashevskaya O. Determination of dynamic characteristics of heat fire detectors. EUREKA, Physics and Engineering. 2019. Vol. 3. P. 50–59. doi: 10.21303/2461-4262.2019.00898

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

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

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

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

S. Yakukhin, Senior Lecturer

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

National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine

MODELING THE OPERATION OF A HEAT FIRE DETECTOR WITH THE DEPENDENCE OF MAGNETIC INDUCTION ON TEMPERATURE

A mathematical model of a fire detector based on the principle of magnetic induction dependence on temperature is presented. The dynamics equations of the detector are given, taking into account the

magnetic properties of the ferrite contacts of the sensitive element, the conditions of heat exchange with the environment, the parameters of magnetization, magnetic induction, the type and structure of the material of the contacts that affect the operation of the detector. A characteristic feature of the mathematical model of the detector is the comprehensive consideration of the influence of the magnetic properties and characteristics of the ferrite material of the contacts on the detector operation parameters. The dynamics equations obtained from the mathematical model of the detector describe its operation in transient modes and represent first-order inertial links written in relative variables with constant coefficients. Magnetic induction and magnetization of contacts are represented by relative variables, inertia and gain are taken into account by constant values. Dynamics equations allow for a convenient study of the operation of a fire detector and to perform parametric calculations of its triggering parameters, taking into account the dependence of the magnetic properties of the contacts of the sensitive element on the temperature and structure of the ferrite material of the contacts. The obtained results of calculations of the detector triggering parameters confirm the correctness of the adopted hypothesis. The difference in the temperature and triggering time obtained in the calculations does not exceed 5 % of the experimental data. As a limitation of the use of the presented model, the use in calculations of the specified parameters of the magnetic field of a permanent magnet, the characteristics of the substance of ferrite contacts, the determined dependences of the magnetic induction of contacts on temperature and conditions of convective heat exchange of the detector with the surrounding environment is used. As constructive ways to improve the detector's operating parameters, recommendations are given on the structure of the sensitive element, namely, increasing the total area of thermal contact to improve the conditions of convection heat transfer, reducing the mass of the sensitive element contacts to reduce the inertia, time and temperature of detector operation.

Keywords: detector, sensitive element, mathematical model, ferrite, time constant, operating parameters, inertia

References

1. Baraliya, J., Joshi, H. (2014). Spectroscopy investigation of nanometric cobalt ferrite synthesized by different techniques. *Vibrational Spectroscopy*, 74, 75–80. doi: 10.1016/j.vibspec.2014.07.013
2. Angotzi, M., Marnelli, V., Zákutná, D., Kubániová, D., Cara, C., Cannas, C. (2021). Evolution of the Magnetic and Structural Properties with the Chemical Composition in Oleate-Capped $Mn_xCo_{1-x}Fe_2O_4$ Nanoparticles. *The Journal of Physical Chemistry*, 125, 20626–20638. doi: 10.1021/acs.jpcc.1c06211
3. Dippong, T., Levei, E., Cadar, O. (2021). Recent Advances in Synthesis and Applications of MFe_2O_4 ($M=Co, Cu, Mn, Ni, Zn$). Nanoparticles. *Nanomaterials*, 11, 1560. doi: 10.3390/nano11061560
4. Priti, A., Kadam, S. (2025). Tailoring Structural and Magnetic Properties of Co–Zn Ferrite Nanoparticles via Erbium Substitution. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 18. doi: 10.21203/rs.3.rs-7263499/v1
5. Abu-Elsaad, N., Metwally, R., Nawara, A. (2025). Erbium Substituted Mn–Cu Ferrite Nanoparticles: Synthesis, Structural, Magnetic, and Antimicrobial Activity Properties. *Brazilian Journal of Physics*, 55(165), 18. doi: 10.1007/s13538-025-01784-z
6. Dippong, T., Deac, I., Levei, E. (2021). Effect of Silica Embedding on the Structure, Morphology and Magnetic Behavior of $(Zn_{0.6}Mn_{0.4}Fe_2O_4)_\delta/(SiO_2)_{(100-\delta)}$ Nanoparticles. *Nanomaterials*, 11(9), 2232. doi: 10.3390/nano11092232
7. Bajorek, A., Berger, C., Dulski, M., Łopadczak, P., Zubko, M. (2019). Microstructural and magnetic characterization of $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$ ferrite nanoparticles. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 129, 1–21. doi: 10.1016/j.jpcs.2018.12.045
8. Alberton, K., Monteiro, L., Moraes, A., Bucar, R. (2021). Morphologic, structural, and magnetic characterization of cobalt ferrite nanoparticles synthesized at

different temperatures. *International Journal for Innovation Education and Research*, 9(9), 399–405. doi: 10.31686/ijier.vol9.iss9.3355

9. Bato, K., Raslan, E., Yang, Y., Adil, S. (2019). Structural, dielectric and low temperature magnetic response of Zn doped cobalt ferrite nanoparticles. *AIP Advances*, 9, 055202. doi: 10.1063/1.5078411

10. Palade, P., Comanescu, C., Kuncser, V. (2020). Mesoporous Cobalt Ferrite Nanosystems Obtained by Surfactant-Assisted Hydrothermal Method: Tuning Morphostructural and Magnetic Properties via pH-Variation. *Nanomaterials*, 10, 476. doi: 10.3390/nano10030476

11. Khalil, Huda., Elsharkawy, S., El-Batouti, M. (2024). Zn-Al Ferrite/Polypyrrole Nanocomposites: Structure and Dielectric and Magnetic Properties for Microwave Applications. *Polymers*, 16(17), 2432. doi: 10.3390/polym16172432

12. Burzo, E., Tetean, R. (2022). New Insights on the Spin Glass Behavior in Ferrites Nanoparticles. *Nanomaterials*, 12, 1782. doi: 10.3390/nano12101782

13. Bury, P., Veveričík, M., Cernobila, F., Patel, H. (2025). Effect of Mn-Doped ZnFe₂O₄ Ferrites on Structural Changes and Magneto Optical Behavior in Nematic Liquid. *Crystals*, 1(18), 5660. doi: 10.3390/ma18245660

14. Alzoubi, G. (2022). The Effect of Co-Doping on the Structural and Magnetic Properties of Single-Domain Crystalline Copper Ferrite Nanoparticles. *Magnetochemistry*, 1(8), 164. doi: 10.3390/magnetochemistry8120164

15. Rahmani-Andebili, M. (2024). *MATLAB Lessons, Examples, and Exercises: A Tutorial for Beginners and Experts*. Springer, 480. ISBN 978-3031761768.

16. Duryeyev, V. O., Oliynyk, V. V., Bondarenko, S. M., Antoshkin, O. A., Malyarov, M. V., Muryn M. M. (2025). Rozrobka matematychnoyi modeli teplovoho pozhezhnogo spovishchuvacha z termoparoyu. *Problemy nadzvychaynykh sytuatsiy*, 2(42), 87–99 doi: 10.52363/2524-0226-2025-42-6

17. Pospelov, B., Andronov, V., Rybka, E., Skliarov, S. (2017). Research into dynamics of setting the threshold and a probability of ignition detection by selfadjusting fire detectors. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5/9 (89), 43–48. doi: 10.15587/1729-4061.2017.110092

18. Abramov, Y., Kalchenko, Y., Liashevskaya, O. (2019). Determination of dynamic characteristics of heat fire detectors. *EUREKA, Physics and Engineering*, 3, 50–59. doi: 10.21303/2461-4262.2019.00898

Надійшла до редколегії: 10.03.2026

Прийнята до друку: 13.04.2026

Дата публікації (оприлюднення): 31.05.2026