

УДК 614.8

- В. О. Дурєєв¹, к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0002-7981-6779)*
В. В. Христич¹, к.т.н., доцент, заст. нач. каф. (ORCID0000-0002-5900-7042)
С. М. Бондаренко¹, к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0002-4687-1763)
М. В. Малярів¹, к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID ID 0000-0002-4052-7128)
М. І. Прокоф'єв², д.т.н., проф. каф. (ORCID ID 0000-0001-9388-3735)
¹Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна
²Донецький національний університет ім. Василя Стуса, Вінниця, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ МАГНІТНОКОНТАКТНОГО ТЕПЛОВОГО ПОЖЕЖНОГО СПОВІЩУВАЧА

Розроблено математичну модель магнітноконтактного теплового сповіщувача з урахуванням залежності магнітних властивостей контактів чутливого елемента від структури та типу його контактів. Отримані рівняння для визначення динамічних параметрів сповіщувача, виконано параметричне дослідження характеристик спрацьовування. Проведено аналіз джерел, що дозволив розробити математичні моделі сповіщувачів з детальним урахуванням типової структури матеріалу чутливих елементів з метою отримання динамічних параметрів сповіщувача і визначення оптимальних параметрів його спрацьовування. Модель сповіщувача являє собою сукупність рівнянь, що визначають умови теплообміну з середовищем та ураховують залежність магнітних властивостей контактів чутливого елемента типової структури при зміні температури середовища при нестационарному теплообміні. Результатом моделювання роботи сповіщувача є динамічні рівняння у відносних змінних та динамічними параметрами роботи сповіщувача, які дозволяють визначити параметри спрацьовування сповіщувача з урахуванням типової структури контактів чутливого елемента. Рівняння динаміки являють собою класичну позиційну ланку першого порядку та є зручними для проведення досліджень роботи сповіщувача, обчислень динамічних параметрів і проведення параметричних розрахунків параметрів спрацьовування. Розроблені динамічні рівняння для визначення та дослідження динамічних параметрів роботи і спрацьовування магнітноконтактного сповіщувача. Ураховано тип та структуру матеріалу контактів чутливого елемента сповіщувача. Результати порівняльних розрахунків мають відхилення від експериментальних даних до 5%. Виконане моделювання роботи сповіщувача та отримані рівняння динаміки дозволяють навести практичні рекомендації щодо підбору технічних параметрів для перспективних моделей магнітноконтактних сповіщувачів.

Ключові слова: пожежний сповіщувач, чутливий елемент, математична модель, інерційність, час спрацювання, температура спрацювання

1. Вступ

В сучасних автоматичних системах пожежної сигналізації застосовуються магнітноконтактні теплові сповіщувачі. Чутливим елементом таких сповіщувачів є геркон з контактами, магнітні властивості яких залежать від температури навколишнього середовища. Параметри спрацьовування таких сповіщувачів залежать від динамічних параметрів чутливого елемента, які визначаються структурою матеріалу контактів та процесом їх теплообміну з навколишнім середовищем. Магнітні властивості контактів залежать від типу та структури матеріалу чутливого елемента, а ураховуючи велике різноманіття подібних матеріалів, можуть в значній мірі відрізнятися один від одного в діапазоні робочих температур. Ураховуючи, що паспорт сповіщувача не містить даних про динамічні параметри та не вказує про тип і структуру матеріалу контактів чутливого елемента, дослідження ефективності спрацьовування пожежного сповіщувача стає сильно ускладненим. Ефективність роботи автоматичної системи пожежної сигналізації залежить від ефективності роботи її складових елементів.

Тому відсутність обґрунтованих даних про параметри чутливих елементів та умови теплообміну з навколишнім середовищем магнітноконтактних сповіщувачів є актуальною науковою проблемою.

2. Аналіз літератури та постановка проблеми

В [1] представлено фізичні властивості феритів, як матеріалів зі змінними магнітними властивостями. Показані принципи виникнення та механізми зміни магнітного поля, в залежності від структури матеріалу, зміни електричного струму, температури. Наведено рівняння залежності магнітних властивостей феритів від їх параметрів. Показано властивості п'яти основних класів матеріалів по їх магнітним властивостям: діамангнітна кераміка, надпровідні магніти, парамагнітна кераміка, феромагнетики та антиферомагнетики. Показано, що в свою чергу феромагнітні матеріали поділяються на матеріали, структуру яких складає магнітні домени різних типів. Показано, що в залежності від кристалічної структури виділяють тверді та м'які ферити, що впливає на напрям їх намагніченості. Проте не представлені рівняння залежності магнітних властивостей феритів від температури.

В [2] наведено результати експериментальних досліджень поведінки м'яких феритових сердечників, що застосовуються в перетворювачах електричного струму. Досліджувався гістерезис для м'яких феритів в умовах зміни температури. Виявлено, що температурні залежності магнітних властивостей м'яких феритів мають нелінійну залежність від температури. Проте показано, що для діапазону робочих температур від 20 °C до 100 °C лінійні скалярні моделі гістерезису Прейзаха містять похибки, що не перевищують встановлених обмежень. Це задовольняє їх застосування для інженерних розрахунків. Проте в роботі не представлені моделі застосування м'яких феритів у якості чутливих елементів датчиків температури.

В [3] експериментальним чином визначено, що зміна температури фериту має найбільший вплив на його максимальну індукцію. Дослідження проводилися при максимальній намагніченості магнітного поля зразків м'яких феритів. Наведено графічні результати розрахунків магнітної індукції фериту при зміні напруги. Отримано, що індукція приймає максимальне значення при температурі нижче 0 °C, а при максимальній температурі досліджень 60 °C індукція досягає мінімального значення, що є слідством хімічного складу фериту (рис. 1).

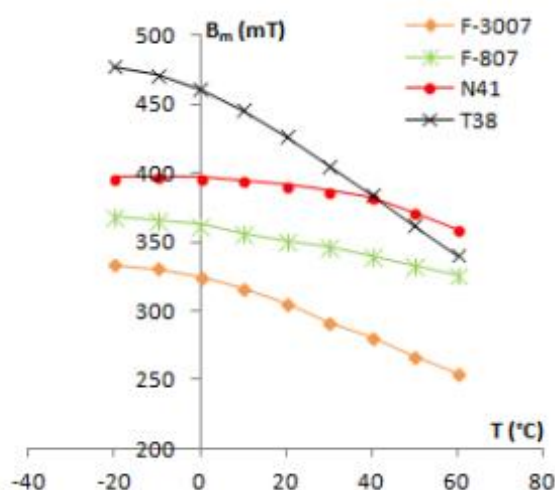


Рис. 1. Залежність максимальної магнітної індукції B_m марганець-цинкових феритів від температури, $H_m=120$ А/м

Теоретично обґрунтовано механізм втрати магнітних властивостей марганець-цинкового м'якого фериту при високих температурах, що надає саме їм перевагу при застосуванні у якості чутливих елементів в датчиках температури. Показано, що індукція приймає мінімальне значення при високій температурі, що є слідством хімічного складу фериту.

зано, що важливою умовою застосування таких індукційних елементів врахування температурного діапазону роботи. Проте рівнянь для визначення магнітних характеристик м'яких феритів не наведено.

В [4] показано технологію отримання фериту Mn–Zn при різних температурах з заданими магнітними властивостями. Визначено структуру фериту та розмір його кристалічної решітки в межах 8,36÷17,54 нм, що дозволяє отримувати його магнітні властивості наближені до м'яких феритів. Моделюванням та визначенням залежності намагніченості та індуктивності м'яких Mn–Zn феритів від температури автори роботи не займались.

В [5] проводилися роботи з розробки феритів з заданими властивостями. Наведені структурні параметри наночасток феритів з різними типами кристалічної решітки. Проведені дослідження структури та магнітних властивостей феритів при температурах $-(160\div 130)$ °C. Показано, що магнітні властивості фериту можуть бути представлені у якості функції від температури та зовнішнього магнітного поля. Наведена залежність магнітної індукції від температури. Проте моделювання роботи феритового чутливого елемента не проводилося.

В [6] отримані результати досліджень зразків феритів з різними розмірами часток. Визначено середній розмір структури феритів. Показано, що намагніченість однотипних часток здатна зменшуватися при збільшенні часу помолу. Показано, що температурні залежності намагніченості міняються в залежності від структури фериту та його кристалічної решітки. Моделювання застосування часток феритів для контролю температури в роботі не проводилося.

В [7] представлені графічні результати досліджень магнітних властивостей м'яких Ni–Co–Zn феритів при кімнатній температурі. Показано, що зразки мають типові температурні залежності намагніченості від температури. Теоретично обґрунтовано вплив структури феритів на їх магнітні властивості. Наведено залежності для визначення магнітного моменту, що залежить від молекулярної маси та намагніченості зразків фериту. Наведені чисельні значення коерцитивної сили, температури Кюрі та графічні результати залежності намагніченості зразків м'яких феритів від їх структури та температури. Проте, математичні залежності, що описують представлені результати в роботі не наведені.

В [8] представлено дослідження магнітних властивостей феромагнітного кобальту при зміні температури. Проведено дослідження залежності магнітного моменту та намагніченості від температури. Наведено графічні результати досліджень магнітних властивостей феритів при низьких температурах, та теоретично прояснено вплив структури матеріалу на його властивості. Дослідження залежності магнітних властивостей феритів при робочих температурах пожежних сповіщувачів в не проводилося.

В [9] наводиться теорія магнітного поля феромагнітів, пояснюється процеси різної природи намагнічування, пояснюються зміна магнітних властивостей матеріалів різної структури від температури. Наведені графічні результати досліджень, що пояснюють появлення та зникнення спонтанної намагніченості при зміні температури, навколо температури Кюрі, з формулами її визначення. Також наведено залежності впливу маси зразків феритів на зміну їх магнітних властивостей.

В [10] представлені результати математичних досліджень магнітних властивостей феритних наночасток від температури. Показано, що намагніченість феромагнітних наночасток описується законом Блоха, в якому магнітні властивості

матеріалу задаються показником ступеню температури. В роботі були порівняні результати теоретичних розрахунків и даних експерименту, які підтвердили отримані результати. Проте моделювання залежності магнітних властивостей повнорозмірних елементів з фериту в роботі не проводилося.

В [11] представлена методика, згідно якої моделюється робота чутливого елемента магнітноконтального сповіщувача. З урахуванням моделі теплового балансу та залежності намагніченості контактів від температури, отримується рівняння динаміки, що дозволяє моделювати роботу пожежного сповіщувача в різних умовах. Були отримані рівняння динаміки для умов застосування однодомених феромагнітних матеріалів, суперпарамагнітних часток при слабкому та сильному магнітних полях та з комплексним урахуванням намагніченості від зовнішнього магнітного поля і температури. Проте в роботі не розглядалися випадки застосування м'яких феритів, які мають найбільш виражені властивості, що дозволяють використовувати саме їх у якості чутливого елемента теплового магнітноконтального пожежного сповіщувача.

В [12] наведено методи моделювання роботи елементів автоматичних систем за рахунок застосування математичних додатків VisSim та Maple. Проте для практичного їх застосування потрібні моделі чутливих елементів, що ураховують структуру та залежності, що описують магнітні властивості феритів, для застосування їх у якості чутливих елементів в теплових магнітноконтальных сповіщувачах.

Таким чином, важливою та невирішеною частиною розглянутої проблеми є розробка моделі магнітноконтального сповіщувача з урахуванням магнітних властивостей матеріалу контактів його чутливого елемента.

3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи є моделювання роботи магнітноконтального теплового пожежного сповіщувача для визначення динаміки його роботи в залежності від типу та структури матеріалу контактів чутливого елемента в діапазоні робочих температур (20÷80) °С.

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішення наступних завдань:

- змоделювати роботу пожежного сповіщувача з урахуванням матеріалу чутливого елемента;
- отримати залежності та дослідити вплив динамічних параметрів на роботу сповіщувача.

4. Матеріали та методи досліджень

Об'єкт дослідження – залежність магнітних властивостей феритових контактів пожежного сповіщувача від температури. Предмет дослідження – розробка моделі пожежного сповіщувача для визначення динамічних параметрів його роботи. Гіпотезою є припущення рівномірного розподілу температури контактів чутливого елемента по координаті при тепловому впливі на його магнітні властивості.

Розробка структурно-динамічної моделі пожежного сповіщувача проводилося з застосуванням додатку VisSim [11]. Дослідження температурного впливу на магнітні властивості феритових контактів, визначення математичних залежностей та розрахунки параметрів роботи сповіщувача виконувалося з додатком Maple. Характеристики спрацьовування сповіщувача визначалися при параметричних розрахунках часу спрацьовування, постійної часу і динамічної температури спрацьовування при заданій швидкості зростання температури.

5. Моделювання роботи магнітноконтактного теплового сповіщувача

Значна кількість теплових сповіщувачів, які встановлені на об'єктах різного господарювання, застосовує принцип залежності магнітної індукції від температури. Чутливим елементом таких сповіщувачів є геркон, з запаяними феритовими контактами (сповіщувачі серії СПТМ). Розрахункова схема такого сповіщувача представлена в [11].

Для моделювання роботи такого сповіщувача застосуємо рівняння теплового балансу при нестационарному тепловому обміні в контактах та рівняння що ураховують залежність намагніченості контактів чутливого елемента пожежного сповіщувача від температури, з урахуванням типу та структури феритових контактів. Приймаючи умови рівномірного розподілу температури феритових контактів по координаті (критерій Біо < 0,1), рівняння теплового балансу має вигляд:

$$Cm \cdot d \frac{dT}{dt} + \alpha F dT = \alpha F dT_{\text{п}}, \quad (1)$$

де m – маса феритових контактів, кг; C – теплоємність матеріалу феритових контактів, Дж·кг⁻¹·К⁻¹; τ – час, сек; T – температура контактів з фериту, К; F – площа поверхні феритових контактів, м²; α – коефіцієнт конвекційного теплообміну, Вт·м⁻²·К⁻¹; $T_{\text{п}}$ – температура повітря, К.

Для урахування типів та структури феритових контактів, розглянемо варіанти застосування ключових варіантів матеріалів контактів для діапазону робочих температур (20÷80) °С.

Згідно з теорією магнітного поля [9] залежність намагніченості контактів чутливого елемента магнітноконтактного сповіщувача, виконаних з матеріалів з вираженими феритними властивостями має вигляд:

$$M_{\text{ф}} = M_0 \frac{k_{\text{в}} T}{\mu \gamma M} a, \quad (2)$$

де M_0 – початкова намагніченість ячійки феромагнітного елемента при нормальній температурі, А/м; $k_{\text{в}}$ – постійна Больцмана, Дж/К; T – поточна температура, К; μ – магнітна проникність, що характеризується відношенням щільності потоку до характеристики магнітного поля; γ – коефіцієнт молекулярного поля; M – намагніченість насичення, А/м; a – змінна що ураховує структуру феритової решітки контакту, м.

Для матеріалів з вираженими антиферитними властивостями залежність намагніченості контактів чутливого елемента [9]:

$$M_{\text{АФ}} = M_{\text{АФ0}} H \frac{C}{T}, \quad (3)$$

де $M_{\text{АФ0}}$ – початкова намагніченість ячійки антиферомагнітного елемента при нормальній температурі, А/м; H – характеристика магнітного поля, що діє на контакти, А/м; C – постійна Кюри, що пов'язує магнітну проникність матеріалу з діючою на нього температурою.

Диференційне рівняння залежності індукованої напруги та магнітної індукції м'якого марганець-цинкового фериту від температури, та результат його інтегрування у вигляді залежності магнітної індукції від температури [3]:

$$U_{MZ} = -n_S S_E \frac{dB_{MZ}}{dT}; \quad B_{MZ} = \frac{K_C}{n_S S_E} \int U_{MZ} dT, \quad (4)$$

де U_{MZ} – індукована напруга марганець-цинкового феритового контакту, В; n_S – кількість витків вимірювальної катушки з досліджуваним зразком марганець-цинкового фериту; S_E – площа поперечного перетину витка катушки, мм²; B_{MZ} – магнітна індукція марганець-цинкового феритового контакту, мА/с²; K_C – постійна інтегрування.

Згідно [8] намагніченість феритових контактів з урахуванням закону Блоха:

$$M_{NB} = M_0 (1 - B_L T^{1.5}); \quad B_L = 2,614 V_0 \left(\frac{k_B}{4\pi D} \right)^{1.5}, \quad (5)$$

де B_L – фактор Блоха; V_0 – атомний об'єм, м³; діаметр наночастки фериту D , м.

Для побудови моделі сповіщувача з контактами різної структури, дорівняємо в рівняннях (2÷5) диференціали лівої та правої частин:

$$\frac{dM_\Phi}{dT} = k_\Phi; \quad k_\Phi = M_0 \frac{k_B}{\mu\gamma M} a; \quad (6)$$

$$\frac{dM_{A\Phi}}{dT} = k_{A\Phi} \frac{1}{T^2}; \quad k_{A\Phi} = -M_{A\Phi 0} H C; \quad (7)$$

$$\frac{dB_{MZ}}{dT} = \frac{K_C}{n_S S_E} U_{MZ}; \quad (8)$$

$$\frac{dM_{NB}}{dT} = k_{NB1} \sqrt{T}; \quad k_{NB1} = -1,5 M_0 B_L. \quad (9)$$

Таким чином, моделювання роботи магнітноконтактного теплового сповіщувача з контактами різної типової структури проводиться з урахуванням теплового балансу (1) контактів чутливого елемента та залежності магнітних властивостей (6÷9) матеріалу контактів від температури. Дана система рівнянь урахує вплив типу та структури типових матеріалів контактів чутливого елемента на роботу теплового магнітноконтактного сповіщувача в діапазоні робочих температур (20÷80) °С.

6. Отримання залежностей та дослідження впливу динамічних параметрів на роботу сповіщувача

Для отримання залежностей та дослідження впливу динамічних параметрів магнітноконтактного теплового сповіщувача з контактами типової структури, об'єднаємо рівняння (1) теплового балансу та залежності (6–9) магнітних властивостей контактів від температури.

Для намагніченості матеріалів контактів з вираженими феритними властивостями:

$$C_m \cdot \frac{1}{k_\Phi} \cdot \frac{d}{dt} dM_\Phi + \alpha F \cdot \frac{1}{k_\Phi} \cdot dM_\Phi = \alpha F \cdot \Delta T_{II}; \quad (10)$$

$$T_{\Phi} \frac{\dot{\bar{m}}}{\bar{m}} = K_{\Phi} \bar{t}_{\Pi}; \quad T_{\Phi} = \frac{Cm}{\alpha F}; \quad K_{\Phi} = \frac{k_{\Phi} T_{\Pi 0}}{M_{\Phi 0}}, \quad (11)$$

де $M_{\Phi 0}$ – намагніченість матеріалу з вираженими феритними властивостями у вихідній точці, А/м; $T_{\Pi 0}$ – температура повітря у вихідній точці, К; T_{Φ} – інерційність, с; K_{Φ} – коефіцієнт посилення; \bar{m} , \bar{t}_{Π} – відносні змінні.

Для намагніченості матеріалів контактів з вираженими антиферитними властивостями:

$$Cm \cdot \frac{T^2}{k_{\text{АФ}}} \cdot \frac{d}{d\tau} dM_{\text{АФ}} + \alpha F \cdot \frac{T^2}{k_{\text{АФ}}} \cdot dM_{\text{АФ}} = \alpha F \cdot \Delta T_{\Pi}; \quad (12)$$

$$T_{\text{АФ}} \frac{\dot{\bar{m}}}{\bar{m}} = K_{\text{АФ}} \bar{t}_{\Pi}; \quad T_{\text{АФ}} = \frac{Cm}{\alpha F}; \quad K_{\text{АФ}} = \frac{k_{\text{АФ}} T_{\Pi 0}}{T^2 M_{\text{АФ} 0}}; \quad (13)$$

де $M_{\text{АФ} 0}$ – намагніченість матеріалу з антиферитними властивостями у вихідній точці, А/м; $T_{\text{АФ}}$ – інерційність, с; $K_{\text{АФ}}$ – коефіцієнт посилення.

Для магнітної індукції м'якого марганець-цинкового фериту:

$$Cm \cdot \frac{n_S S_E T^2}{K_C U_{\text{МЗ}}} \cdot \frac{d}{d\tau} dB_{\text{МЗ}} + \alpha F \cdot \frac{n_S S_E T^2}{K_C U_{\text{МЗ}}} \cdot dB_{\text{МЗ}} = \alpha F \cdot \Delta T_{\Pi}; \quad (14)$$

$$T_{\text{МЗ}} \frac{\dot{\bar{m}}}{\bar{m}} = K_B \bar{t}_{\Pi}; \quad T_{\text{МЗ}} = \frac{Cm}{\alpha F}; \quad K_{\text{МЗ}} = \frac{K_C U_{\text{МЗ}} T_{\Pi 0}}{n_S S_E T^2 B_{\text{МЗ} 0}}; \quad (15)$$

де $B_{\text{МЗ} 0}$ – магнітна індукція м'якого марганець-цинкового фериту у вихідній точці, кг/Ас²; $T_{\text{МЗ}}$ – інерційність, с; $K_{\text{МЗ}}$ – коефіцієнт посилення.

Для намагніченості феритних часток з урахуванням закону Блоха:

$$Cm \cdot \frac{1}{k_{\text{NB1}} \sqrt{T}} \cdot \frac{d}{d\tau} dM_{\text{NB}} + \alpha F \cdot \frac{1}{k_{\text{NB1}} \sqrt{T}} \cdot dM_{\text{NB}} = \alpha F \cdot \Delta T_{\Pi}; \quad (16)$$

$$T_{\text{NB}} \frac{\dot{\bar{m}}}{\bar{m}} = K_{\text{NB}} \bar{t}_{\Pi}; \quad T_{\text{NB}} = \frac{Cm}{\alpha F}; \quad K_{\text{NB}} = k_{\text{NB1}} \sqrt{T} \frac{T_{\Pi 0}}{M_{\text{NB} 0}}, \quad (17)$$

де $M_{\text{NB} 0}$ – намагніченість феритних наночасток у вихідній точці, А/м; T_{NB} – інерційність, с; K_{NB} – коефіцієнт посилення.

Ураховуючи отримані динамічні параметри (11, 13, 15, 17) роботи магнітно-контактного сповіщувача з контактами чутливого елемента типової структури, визначимо параметри спрацьовування сповіщувача за методом [11]:

$$T_{\text{СП}} = \frac{60 \cdot (T_{\text{ДИН}} - T_{\text{СТАТ}})}{\frac{dT}{dt} \cdot K_{\text{СП}}}; \quad (18)$$

$$T_{\text{дин}} = \frac{60T_{\text{СТАТ}} + K_{\text{СП}} T_{\text{СП}} \cdot \frac{dT}{d\tau}}{60}; \quad (19)$$

$$\tau_{\text{СПР}} = \frac{60 \cdot (T_{\text{СТАТ}} - T_0) + T_{\text{СП}} \frac{dT}{d\tau}}{\frac{dT}{d\tau}}, \quad (20)$$

де $T_{\text{СП}}$ – інерційність сповіщувача, с; $T_{\text{дин}}$, $T_{\text{СТАТ}}$ – динамічна та статична температура спрацювання сповіщувача, К; $\tau_{\text{СПР}}$ – час спрацювання, с; $dT/d\tau$ – задана швидкість зростання температури, К/с.

При порівнянні теоретичних розрахунків з даними експерименту, в якості досліджуваного СП застосовано СПТМ-70. Експериментально для СПТМ-70 було визначено статичну $T_{\text{СТ.ЕКСП}}$ температуру спрацювання, динамічну $T_{\text{ДИН.ЕКСП}}$ температуру спрацювання, час $\tau_{\text{СПР}}$ спрацювання, інерційність $T_{\text{СП.ЕКСП}}$ (18).

В теоретичних розрахунках з умов визначеної інерційності та заданої швидкості ($dT/d\tau$) зростання температури, визначалися динамічна $T_{\text{ДИН.РОЗР}}$ температура (19) та час $\tau_{\text{СПР РОЗР}}$ спрацювання (20) сповіщувача.

Результати усереднених значень отриманих та розрахованих параметрів спрацювання сповіщувача СПТМ-70 наведені в табл. 1, та на рис. 1.

Табл. 1. Динамічні параметри магнітоконтального 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		67,5	69,5	75	78,5
Відносна погрішність $\overline{\Delta x} T_{\text{ДИН}}$, %		1,03	2,25	0,13	2,21
$\tau_{\text{СПР ЕКСП}}$, с		437	236	124	90
$\tau_{\text{СПР РОЗР}}$, с		435	225	129	94
Відносна погрішність $\overline{\Delta x} \tau_{\text{СПР}}$, %		0,46	4,66	4,03	4,44
$T_{\text{СП ЕКСП}}$, с	24				

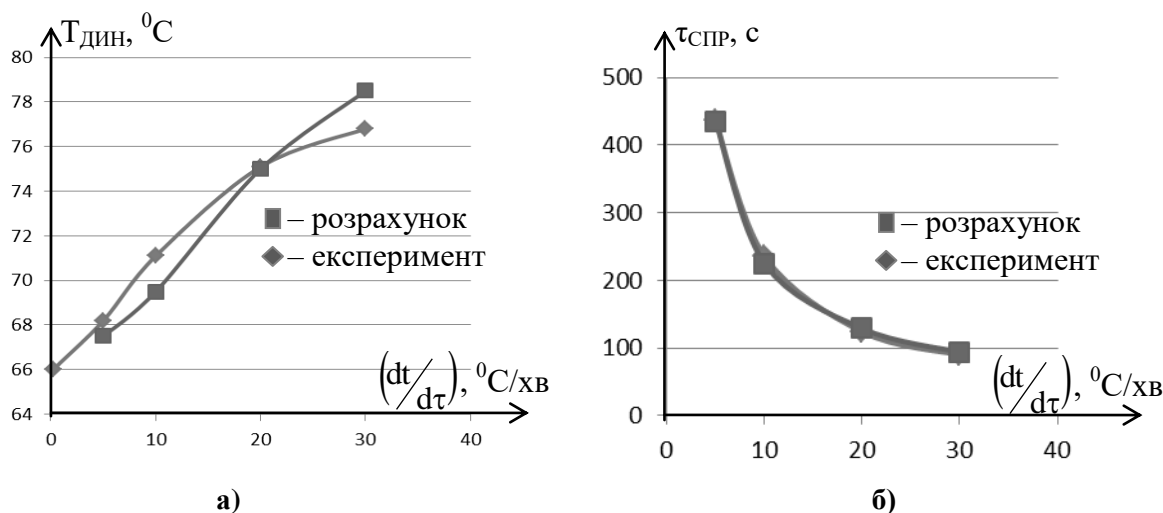


Рис. 1. Динамічні параметри спрацювання СПТМ-70 при зміні швидкості зростання температури: а – залежність динамічної температури спрацювання; б – залежність часу спрацювання

Таким чином в результаті вирішення поставлених завдань, отримані рівняння, що моделюють роботу магнітноконтактного теплового пожежного сповіщувача з феритовими контактами. Рівняння являють собою динамічні позиційні ланки першого порядку у відносних змінних та урахують залежність магнітних властивостей контактів типової структури при зміні температури в діапазоні робочих температур (20÷80) °С та їх структуру: намагніченість контактів з вираженими феритними (11) та антиферитними (13) властивостями, магнітну індукцію м'якого марганець-цинкового фериту (15), намагніченість феритних наночасток з урахуванням закону Блоха (17). Отримані рівняння зручні для проведення параметричних досліджень роботи сповіщувачів, а відносна погрішність отриманих за ними результатів не перевищує 5 %.

7. Обговорення результатів дослідження впливу структури контактів на динаміку роботи сповіщувача

Виконано моделювання роботи теплового сповіщувача з феритовими контактами чутливого елемента. Особливістю моделювання є урахування структури типових феритових матеріалів при дослідженні залежності їх магнітних властивостей від температури з застосуванням рівняння теплового балансу.

Особливістю запропонованої моделі магнітноконтактного теплового пожежного сповіщувача полягає в урахуванні характеристик матеріалу та структури контактів чутливого елемента. Модель ураховує наступні типи матеріалів контактів чутливого елемента, що не розглядалися раніше: матеріал контактів з вираженими феритними властивостями, з вираженими антиферитними властивостями, м'який марганець-цинковий ферит, феритні наночастки в умовах урахування закону Блоха. Так у порівнянні з існуючими моделями магнітноконтактного сповіщувача, запропонована модель ураховує: модель для контактів з вираженими феритними властивостями – початкову намагніченість ячійки феромагнітного елемента при нормальній температурі M_0 , постійну Больцмана k_B , магнітну проникність μ , коефіцієнт молекулярного поля γ , намагніченість насичення M , параметр структури решітки феритового контакту a , поточну температуру T . Для контактів з вираженими антиферитними властивостями – початкова намагніченість ячійки антиферомагнітного елемента при нормальній температурі M_{AF0} , характеристика магнітного поля, що діє на контакти H , постійна Кюрі C , поточна температура T . Моделювання залежності магнітної індукції для контактів з м'якого марганець-цинкового фериту ураховує: індуковану напругу U_{MZ} , кількість витків вимірювальної котушки з досліджуваним зразком марганець-цинкового фериту n_s , площу поперечного перетину витка котушки S_E , постійну інтегрування K_s , поточну температуру T . Для феритних наночасток з урахуванням закону Блоха ураховувалися: початкова намагніченість наночастки феритного елемента при нормальній температурі M_0 , фактор Блоха V_L , атомний об'єм V_0 , діаметр наночастки фериту D , постійна Больцмана k_B , поточна температура T .

Отримані залежності динамічних параметрів являють собою позиційні ланки першого порядку з відносними змінними та дозволяють визначати параметри спрацьовування теплових магнітноконтактних пожежних сповіщувачів з типовими контактами різної структури. Рівняння ураховують структуру матеріалу контактів чутливого елемента та залежність їх магнітних властивостей від зміни температури зовнішнього середовища. Відносні погрішності розрахованих параметрів спрацьовування сповіщувача СПТМ-70 відрізняються від експериментальних

даних на величину, що не перевищує 5 %, що пояснюється урахуванням в моделі магнітоконтактного сповіщувача особливостей матеріалу та структури контактів чутливого елемента.

Отримані результати свідчать, що магнітні властивості контактів типової структури залежать від сукупного урахування їх початкової намагніченості та зміни поточної температури. Наведені фактори визначають інерційність та параметри спрацьовування сповіщувача, так як вони оказують вплив на динамічні параметри роботи сповіщувача.

Слід зауважити, що обмеженням застосування розроблених моделей магнітоконтактного сповіщувача є можливість їх використання тільки при відомих чисельних значеннях початкової намагніченості, величини магнітного поля та відомій структурі матеріалу контактів.

Недоліком представлених моделей є те, що вони не ураховують гармонійну зміну зовнішнього магнітного поля, залежність величини магнітного моменту від температури та зміну температури поза робочого діапазону (20÷80) °С.

Подальшим розвитком запропонованого підходу з побудови математичної моделі магнітоконтактного сповіщувача слід пов'язувати з визначенням параметрів початкової намагніченості, величини та закону зміни зовнішнього магнітного поля і магнітного моменту в робочому та розширеному діапазоні температур. Таке урахування наведених факторів підвищить точність розрахунків, проте значно ускладнює моделювання роботи сповіщувача за рахунок потреби урахування великої кількості факторів, визначення яких є самою за собою складною задачею. Узагальнення параметрів структури феритових контактів дає більш універсальні результати, проте їх точність може не дозволити проводити параметричні дослідження динамічних параметрів сповіщувачів з контактами складної структури.

Отже, результати моделювання роботи теплового магнітоконтактного пожежного сповіщувача підтверджують вірність прийнятої гіпотези, а розраховані параметри спрацьовування сповіщувача відповідають експериментальним даним. Таким чином, мета дослідження вважається досягнутою. Результати досліджень дозволяють зробити рекомендації по підбору динамічних параметрів, що покращить параметри спрацьовування перспективних сповіщувачів: статичну та динамічну температуру спрацьовування, час спрацьовування.

8. Висновки

1. Розроблені математичні моделі магнітоконтактних теплових пожежних сповіщувачів з контактами чутливих елементів, що мають структуру з вираженими феритними та антиферитними властивостями, м'якого марганець-цинкового фериту та феритових наночастинок з урахуванням закону Блоха. Доведено, що для урахування впливу магнітних властивостей контактів чутливого елемента на параметри спрацьовування пожежного сповіщувача, разом з параметрами намагніченості, магнітної індукції, зовнішнього магнітного поля, магнітного моменту та характеристик теплообміну з зовнішнім середовищем, моделювання роботи сповіщувача повинне ураховувати структуру матеріалу контактів. Так в моделі з загальними феритними властивостями структури контактів ураховано 6 параметрів: початкова намагніченість ячійки феромагнітного елемента, постійна Больцмана, магнітна проникність, коефіцієнт молекулярного поля, намагніченість насичення, параметр структури решітки феритового контакту, поточна температура. Модель що описує загальні антиферитні властивості структури контактів ураховує 4 па-

раметри: початкова намагніченість ячійки антиферомагнітного елементу, характеристика магнітного поля, постійна Кюрі, поточна температура. Модель залежності магнітної індукції для контактів з м'якого марганець-цинкового фериту ураховує 5 факторів: індуковану напругу, кількість витків вимірювальної котушки з досліджуваним зразком марганець-цинкового фериту, площу поперечного перетину витка котушки, постійну інтегрування, поточну температуру. Модель зі структурою контактів у вигляді феритних наночасток з урахуванням закону Блоха ураховує 6 факторів: початкова намагніченість наночастки феритного елементу, фактор Блоха, атомний об'єм, постійна Больцмана, діаметр наночастки, поточна температура.

2. Отримані рівняння для визначення та дослідження динамічних параметрів роботи і спрацьовування теплового пожежного магнітноконтактного сповіщувача. Ураховано тип та структуру матеріалу контактів чутливого елементу сповіщувача. Результати порівняльних розрахунків мають відхилення від експериментальних даних до 5 %. В якості рекомендацій покращення динамічних параметрів роботи сповіщувача, доцільно застосовувати тепловий радіатор та збільшити загальну площу чутливого елементу, що поліпшує умови конвективного теплообміну сповіщувача з набігаючим тепловим потоком. В математичних моделях доцільно ураховувати параметри початкової намагніченості, величини та закону зміни зовнішнього магнітного поля і магнітного моменту в робочому та розширеному діапазоні температур, дані структури контактів.

Література

1. Carter C. Barry, Norton M. Grant. *Ceramic Materials/ Sciece and Engineering*. Springer, 2007. 716 p. doi: 10.1007/978-0-387-46271-4
2. Lu H., Zhu Y., Hui J. G. Measurement and modeling of thermal effects on magnetic hysteresis of soft ferrites. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2007. Vol. 43(11). P. 3953–3960. doi: 10.1109/tmag.2007.904942
3. Кахняж М. Л., Салах Я. Л., Шевчик Р. Ю., Беньковски А. В., Коробийчук И. В. Дослідження впливу температури на магнітні характеристики феритів з марганець-цинкового сплава. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2015. Vol. 6(5(78)). P. 17–21. doi: 10.15587/1729-4061.2015.55410
4. Martinson K., Belyak V., Sakhno D., Chebanenko M., Panteleev I. Mn-Zn Ferrite Nanoparticles by Calcining Amorphous Products of Solution Combustion Synthesis: Preparation and Magnetic Behavior. *International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis*. 2022. Vol. 31. P. 17–23. doi: 10.3103/s106138622201006x
5. Nairan A.; Khan M.; Khan U.; Iqbal M.; Riaz S.; Naseem S. Temperature-Dependent Magnetic Response of Antiferromagnetic Doping in Cobalt Ferrite Nanostructures. *Nanomaterials*. 2016. P. 73. doi: 10.3390/nano6040073
6. Thanh T. D., Manh D. H., Phuc N. X. Deviation from Bloch's T_{3/2} Law and Spin-Glass-Like Behavior in La_{0,7}Ca_{0,3}MnO₃ Nanoparticles. *J Supercond Nov Magn* 28. 2015. P. 1051–1054. doi: 10.1007/s10948-014-2869-5
7. Ullah S., Firoz U., Momin A., Hakim M. Effect of V₂O₅ addition on the structural and magnetic properties of Ni–Co–Zn ferrites. Published by IOP Publishing Ltd. 2021. doi: 10.1088/2053-1591/abd865
8. Kumar P., Mandal K. Effect of spatial confinement on spin-wave spectrum: Low temperature deviation from Bloch's T_{3/2} law in Co nanoparticles, 2007. 11 p. doi: 10.48550/arXiv.cond-mat/0701152

9. Cullity B. D., Graham C. D. Introduction to Magnetic Materials, Second Edition. Copyright. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2009. 544 p. URL: <http://ndl.ethernet.edu.et/bitstream/123456789/31331/1/B.%20D.%20Cullity.pdf>

10. Cojocaru S. Magnon gas and deviation from the Bloch law in a nanoscale Heisenberg ferromagnet. Philosophical Magazine. 2011. P. 1–15. URL: https://www.researchgate.net/publication/233077658_Magnon_gas_and_deviation_from_the_Bloch_law_in_a_nanoscale_Heisenberg_ferromagnet

11. Дурєєв В. О., Христич В. В., Бондаренко С. М., Маляров М. В., Корнієнко Р. В. Математична модель магнітоконтактного теплового пожежного сповіщувача. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2023. № 1(37). С. 31–43. URL: <http://pes.nuczu.edu.ua/images/arhiv/37/3.pdf> ISSN 2524-0226

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

V. Durieiev¹, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department

V. Khrystych¹, PhD, Associate Professor, Deputy Head of the Department

S. Bondarenko¹, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department

M. Maliarov¹, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department

M. Prokofiev², DSc, Professor, Professor of the Department

¹National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

²Donetsk National University named after Vasyl Stus, Vinnytsia, Ukraine

SIMULATION OF THE WORK OF THE MAGNETIC CONTACT THERMAL FIRE ALARM

A mathematical model of the magnetic contact thermal detector was developed, taking into account the dependence of the magnetic properties of the contacts of the sensitive element on the structure and type of its contacts. Equations for determining the dynamic parameters of the detector were obtained, and a parametric study of the triggering characteristics was performed. An analysis of sources was carried out, which made it possible to develop mathematical models of detectors with detailed consideration of the typical structure of the material of sensitive elements in order to obtain the dynamic parameters of the detector and determine the optimal parameters of its activation. The model of the detector is a set of equations that determine the conditions of heat exchange with the environment and take into account the dependence of the magnetic properties of the contacts of the sensitive element of a typical structure when the temperature of the environment changes during non-stationary heat exchange. The result of modeling the detector's operation is dynamic equations in relative variables and dynamic parameters of the detector's operation, which allow determining the parameters of the detector's operation, taking into account the typical contact structure of the sensitive element. The dynamics equations represent a classical positional link of the first order and are convenient for carrying out studies of detector operation, calculations of dynamic parameters and parametric calculations of actuation parameters. Dynamic equations have been developed to determine and study the dynamic parameters of the magnetic contact detector. The type and structure of the contact material of the sensitive element of the detector is taken into account. The results of comparative calculations deviate from the experimental data by up to 5 %. The performed simulation of the detector and the obtained dynamics equations allow us to provide practical recommendations for the selection of technical parameters for promising models of magnetic contact detectors.

Keywords: fire detector, sensitive element, mathematical model, inertia, activation time, activation temperature

References

1. Carter, C. B. (2007). Ceramic Materials: Science and Engineering. Springer, 716. doi: 10.1007/978-0-387-46271-4

2. Lu, H., Zhu, Y., Hui, J. G. (2007). Measurement and modeling of thermal effects on magnetic hysteresis of soft ferrites. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1, 43(11), 3953–3960. doi: 10.1109/tmag.2007.904942
3. 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
4. Martinson, K., Belyak, V., Sakhno, D., Chebanenko, M., Panteleev, I. (2022). Mn-Zn Ferrite Nanoparticles by Calcining Amorphous Products of Solution Combustion Synthesis: Preparation and Magnetic Behavior. *International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis*, 31, 17–23. doi: 10.3103/S106138622201006X
5. Nairan, A., Khan, M., Khan, U., Iqbal, M., Riaz, S., Naseem, S. (2016). Temperature-Dependent Magnetic Response of Antiferromagnetic Doping in Cobalt Ferrite Nanostructures. *Nanomaterials*, 73. doi: org/10.3390/nano6040073
6. Thanh, T. D., Manh, D. H., Phuc, N. X. (2015). Deviation from Bloch's T_{3/2} Law and Spin-Glass-Like Behavior in La_{0,7}Ca_{0,3}MnO₃ Nanoparticles. *J Supercond Nov Magn*, 28, 1051–1054. doi: 10.1007/s10948-014-2869-5
7. Ullah, S., Firoz, U., Momin, A., Hakim, M. (2021). Effect of V₂O₅ addition on the structural and magnetic properties of Ni–Co–Zn ferrites. Published by IOP Publishing Ltd. doi: 10.1088/2053-1591/abd865
8. Kumar, P., Mandal, K. (2007). Effect of spatial confinement on spin-wave spectrum: Low temperature deviation from Bloch's T_{3/2} law in Co nanoparticles, 11. doi: 10.48550/arXiv.cond-mat/0701152
9. Cullity, B. D., Graham, C. D. (2009). *Introduction to Magnetic Materials*, Second Edition. Copyright. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 544. Available at: <http://ndl.ethernet.edu.et/bitstream/123456789/31331/1/B.%20D.%20Cullity.pdf>
10. Cojocar, S. (2011). Magnon gas and deviation from the Bloch law in a nanoscale Heisenberg ferromagnet. *Philosophical Magazine*, 1–15. Available at: https://www.researchgate.net/publication/233077658_Magnon_gas_and_deviation_from_the_Bloch_law_in_a_nanoscale_Heisenberg_ferromagnet
11. Durieiev, V. O., Khrystych, V. V., Bondarenko, S. M., Maliarov, M. V., Korniienko, R. V. (2023). Matematychna model mahnitnokontaktneho teplovoho pozhezhnoho spovishchuvacha. *Problemy nadzvychainykh sytuatsii*, 1(37), 31–43. Available at: <http://pes.nuczu.edu.ua/images/arhiv/37/3.pdf> ISSN 2524-0226
12. Zabara, S. (2015). Modelyuvannya sistem u seredovishchi MATLAB. *Universitet Ukraïna*, 137. Available at: <https://www.yakaboo.ua/modeljuvannja-sistem-u-seredovishchi-matlab.html>

Надійшла до редколегії: 09.03.2024

Прийнята до друку: 16.04.2024