

УДК 614.8

В. О. Дурєєв, 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)
О. А. Антошкін, к.т.н., ст. викл. каф. (ORCID 0000-0003-2481-2030)
М. В. Малярів, к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0002-4052-7128)
Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна

РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ МАГНІТНОКОНТАКТНОГО ТЕПЛООВОГО ПОЖЕЖНОГО СПОВІЩУВАЧА

Розроблено математичні моделі пожежного сповіщувача з урахуванням залежності намагніченості контактів чутливого елемента від температури та параметрів матеріалу контактів. Отримані рівняння динаміки СП урахують тип та структуру матеріалів контактів ЧЕ та залежність їх намагніченості від температури і відповідають інерційній позиційній ланці першого порядку, записаній у відносних змінних з постійними коефіцієнтами. В результаті вивчення актуальної літератури в моделях враховано характеристики матеріалу магнітних контактів для визначення його оптимальних динамічних параметрів. Математичною моделлю сповіщувача є система рівнянь, що складається з рівняння теплового балансу в умовах нестационарного теплообміну з припущенням рівномірного прогріву контактів чутливого елемента по усій глибині. Друге – рівняння зв'язку намагніченості контактів, запаяних в герконі, від температури. Отримані рівняння динаміки сповіщувача урахують тип та структуру матеріалів контактів ЧЕ та залежність їх намагніченості від температури і відповідають інерційній позиційній ланці першого порядку. Змінні рівняння є відносними щодо крапки лінеаризації, з постійними коефіцієнтами. Рівняння дозволяють проводити дослідження параметрів роботи сповіщувача з принципом залежності магнітної індукції від температури. Рівняння динаміки дозволяють досліджувати динамічні параметри роботи теплових СП, відносна погрішність результатів не перевищує 5%. Отримані результати моделювання роботи пожежного сповіщувача підтверджують правильність обраної гіпотези, а визначені параметри роботи СП співпадають з даними експерименту. Результати проведених досліджень дозволяють надати рекомендації по вибору параметрів роботи сповіщувачів, що покращить якість їх спрацювання: статичну та динамічну температури спрацювання, інерційність, час спрацювання.

Ключові слова: сповіщувач пожежний, чутливий елемент, модель сповіщувача, постійна часу, час спрацювання, температура спрацювання сповіщувача

1. Вступ

Використання сповіщувачів пожежних (СП) з чутливим елементом (ЧЕ), що працює за принципом залежності магнітної індукції від температури обумовлено простотою їх експлуатації, надійністю роботи та вигідними тактико-технічними параметрами відносно їх вартості.

В якості ЧЕ такого теплового СП виступає герметичний контакт, який містить в своєму складі контакти з магнітночутливого матеріалу, який змінює свої магнітні властивості при зміні температури оточуючого середовища.

Матеріал контактів та його структура впливають на параметри спрацювання такого СП і визначаються динамічними параметрами складових ЧЕ в умовах зміни їх теплового стану. В свою чергу, залежність намагніченості контактів ЧЕ визначається їх складовою речовиною. Ураховуючи різноманіття речовин, що можуть бути застосовані в якості магнітних контактів ЧЕ, параметри спрацювання таких СП значно відрізняються один від одного. Паспорт теплових СП практично не містить технічні данні ЧЕ і не описує динамічні параметри роботи СП в умовах, коли оточуюча температура змінюється. Відповідно, щоб покращити якість роботи системи протипожежного захисту, треба змоделювати спрацювання теп-

лового СП в умовах зміні температури оточуючого середовища для типової структури матеріалу його контактів, що є дуже важливим для визначення параметрів спрацювання СП.

Тому актуальним є проведення досліджень, направлених на розробку сповіщувачів пожежних з покращеними динамічними параметрами.

2. Аналіз літератури та постановка проблеми

В [1] наведені результати досліджень зміни температури поверхні з урахуванням висоти джерела високоінтенсивного теплового потоку. Визначені параметри спрацювання теплового СП. Показано можливість застосування наведеного методу визначення параметрів роботи перспективних теплових СП на підставі співпадіння отриманих результатів моделювання з паспортними даними існуючих СП. Проте, дослідження роботи ЧЕ з залежністю магнітної індукції від температури в наведеній публікації не проводилося.

В [2] представлені результати досліджень намагніченості м'яких феритів при різній температурі. Зроблено висновок, коли при загальній нелінійній залежності намагніченості від температури, для робочого діапазону ($20 \div 100$) °C залежність наближується до лінійної з похибками, що перевищують заданих значень. Такий результат цілком задовольняє застосування м'яких феритів в якості контактів ЧЕ СП. Проте моделювання застосування м'яких феритів в якості контактів ЧЕ СП не проводилося.

В [3] проводилися дослідження температурного впливу зовнішнього середовища на магнітну індукцію фериту. Дослідження виконані для умов максимального показника намагніченості для м'яких феритів. Отримані результати дозволяють визначити величину магнітної індукції феритів в умовах зміни напруги. Визначено, що величина магнітної індукції фериту зменшується при збільшенні температури в діапазоні ($0 \div 60$) °C. Представлено теоретичне обґрунтування наведеної залежності, що математично описує зміну намагніченості фериту при зміні температури у м'якому марганець-цинковому фериті та обумовлено можливість застосування даних типів феритів у якості ЧЕ теплового СП для практичних температурних інтервалів роботи. Аналітичних рівнянь для визначення намагніченості не представлено.

В [4] наведено приклад визначення структури Mn–Zn фериту з визначеними магнітними властивостями для різних температур. В межах ($8,36 \div 17,54$) нм визначено структуру та розмір кристалічної решітки фериту з заданими параметрами намагніченості, подібними параметрам м'яких феритів. Проте математичного моделювання роботи Mn–Zn фериту в умовах зміни температури не проводилося. Рівнянь залежності магнітних властивостей Mn–Zn фериту від температури також не наведено.

В [5] виконана робота по створенню фериту з визначеними параметрами структурної решітки та намагніченості. В роботі наведено зразки та магнітні параметри наночасток та структури феритів з урахуванням типу їх кристалічної решітки. Виконані експериментальні дослідження структури і намагніченості феритів в діапазоні температур, що задовольняє їх практичне застосування ($-160 \div 130$) °C. Показано функціональну залежність магнітних властивостей розроблених феритів від значень температури і магнітних властивостей оточуючого поля. Наведено формули для отримання рівня магнітної індукції в умовах зміни оточуючої температури. Проте моделей застосування феритів в якості ЧЕ теплового СП не приведено.

В [6] проведені дослідження впливу структури, розміру часток та кристалічної решітки феритів різної структури на параметри їх намагніченості. Представлено результати з визначення середнього розміру феритних часток та їх структури. Визначено вплив часу формування структури однотипних феритних матеріалів на параметри їх намагніченості. Виявлено зв'язок магнітних властивостей феритів від зміни часу та температури формування структури та кристалічної решітки. Проте питання щодо застосування феритів в якості чутливого елемента, який реагує на зміну температури, не розглянуто.

В [7] наведено графічні залежності, отримані при дослідженні намагніченості м'яких NiCoZn феритів. Доведено, що представлені матеріали мають виражені залежності магнітних властивостей від температури. Визначено та теоретично обґрунтовано механізм впливу структури матеріалу на його магнітні властивості. Показано формули для визначення магнітного моменту від молекулярної маси і магнітного рівня матеріалу. Наведені значення отриманих магнітних властивостей фериту, та показано їх залежність від структури та температури. Однак, залежностей для визначення магнітних властивостей феритів не приведено.

В [8] розглянуто температурний вплив на сердечник з фериту з різною структурою його матеріалу та доміжками SiO₂. Наведені результати магнітних властивостей фериту з урахуванням його структури та концентрації доміжок. Температурний вплив на зміну намагніченості фериту не досліджувався.

В [9] наведено результати моделювання впливу температури та зовнішніх сил на намагніченість магнітом'яких феритів. Представлено графоаналітичні залежності, отримані в результаті дослідження намагніченості феритів різної структури при змінному зовнішньому впливі. Показано, що урахування структури фериту дозволяє більш точно визначити його намагніченість. В роботі представлено структурні моделі магнітом'яких феритів, що дозволяє визначити їх намагніченість для різних температур та зовнішньому впливі. Проте в роботі не наведено аналітичні залежності для визначення намагніченості феритів з урахуванням їх структури, а представлені графічні залежності не дозволяють їх застосувати при дослідженні впливу структури інших типів феритів на їх магнітні властивості.

Дослідження намагніченості феритних наночасток в умовах зміни температури проводилося в [10]. Магнітні властивості феромагнітних наночасток описуються законом Блоха та задаються показником температури. Показано співпадіння теоретично розрахованих параметрів з результатами експерименту. Проте, питання застосування феритних наночасток в якості ЧЕ теплових СП не розглядувалися. Моделювання застосування повнорозмірних ЧЕ з матеріалу, який складається з феромагнітних наночасток не виконувалося.

В [11] досліджувалися магнітні властивості феромагнітів зі структурою, що складається з однодомених феритів, суперпарамагнітних феритів в умовах слабого і сильного магнітного впливу, з урахуванням параметрів намагніченості феромагнітів від зовнішніх магнітних полів та температурного впливу.

Наведено методику визначення рівнянь динаміки та динамічних параметрів ЧЕ теплових СП з феритами різних типів та структури. Але можливість застосування феритів загальної та м'якої структури, марганець-цинкових та на основі кобальту, які мають дуже виражені магнітні властивості, не розглядувалися в представленій праці.

Додатки, що дозволяють виконати математичне моделювання роботи теплового СП з урахуванням типу і принципу роботи ЧЕ та провести параметричні дос-

лідження динамічних параметрів ЧЕ та СП представлено в [12]. Розроблені математичні моделі теплових СП з урахуванням структурних характеристик феритних контактів, оброблювалися з застосуванням програм VisSim та Maple. Проте, математичне дослідження моделі теплового СП з застосуванням отриманих рівнянь динаміки у відповідних програмах можливе лише на кінцевому етапі, коли моделювання роботи СП вже виконано з урахуванням особливостей їх роботи.

Отже, невирішеною частиною проблеми покращення ефективності роботи системи раннього виявлення пожежі, є моделювання роботи теплового пожежного сповіщувача з урахуванням магнітних властивостей чутливого елемента.

3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи є моделювання роботи теплового сповіщувача з принципом залежності магнітної індукції від температури, для дослідження залежності його динамічних параметрів від характеристик чутливого елемента.

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішення наступних завдань:

- розробити математичну модель пожежного сповіщувача з урахуванням характеристик чутливого елемента;
- отримати рівняння динаміки сповіщувача та дослідити параметри його роботи.

4. Матеріали та методи досліджень

В якості об'єкту дослідження прийнято залежність магнітних властивостей контактів сповіщувача від зміни температури. Предметом дослідження є моделювання спрацювання сповіщувача для дослідження його динамічних параметрів. У якості гіпотези прийнято припущення про рівномірний прогрів контактів сповіщувача при визначені їх намагніченості.

Структурно-динамічна модель сповіщувача розроблена з використанням програми VisSim [12]. Дослідження намагніченості контактів СП з урахуванням їх структури при зміні температури та параметричні дослідження динамічних параметрів СП виконувалися з застосуванням програми Maple. Дослідження параметрів спрацювання сповіщувача проводилося при визначені постійної часу, динамічної температури спрацювання, інерційності та часу спрацювання для заданої швидкості зміни температури.

5. Розробка математичної моделі сповіщувача

Схема теплового СП з залежністю магнітної індукції від температури (СПТМ-70) має вигляд (рис. 1).

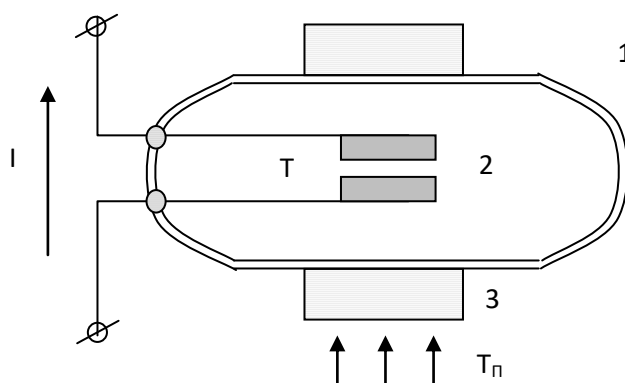


Рис. 1. Розрахункова схема теплового СП з залежністю магнітної індукції від температури: 1 – герметичний контакт; 2 – намагнічені контакти; 3 – магніт

В якості математичної моделі СП приймемо систему рівнянь, що складається з рівняння теплового балансу в умовах нестационарного теплообміну з припущенням рівномірного прогріву контактів ЧУ по усій глибині (критерій Біо<0,1):

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

де m – маса контактів, кг; C – теплоємність, Дж·кг⁻¹·К⁻¹; τ – час, сек; T – поточна температура контактів, К; F – площа, м²; α – коефіцієнт конвекційного теплообміну, Вт·м⁻²·К⁻¹; T_{Π} – температура оточуючого середовища, К.

Також до системи рівнянь входить залежність магнітних властивостей контактів ЧЕ від температури. Так для м'яких марганець-цинкових (Mn-Zn) феритів, залежність намагніченості від температури [2]:

$$M_{MZ} = M_{SAT} \left[\operatorname{cth} \left(\frac{H}{k_B T} \right) - \frac{k_B T}{H} \right], \quad (2)$$

де M_{SAT} – намагніченість насичення м'якого Mn-Zn фериту, А/м; H – зовнішнє магнітне поле, А/м; k_B – постійна Больцмана, Дж/К.

Для м'яких феритів на основі кобальту [5]

$$M_{Co} = M_{S0} - C \left[e^{\frac{-E_1}{k_B T}} + e^{\frac{-E_2}{k_B T}} \right], \quad (3)$$

де M_{S0} – намагніченість при початковій температурі, А/м; $C = M_{S0}/N$ – постійна що урахує структуру матеріалу, де N – число Авогадро, моль⁻¹; E_1, E_2 – енергетичні рівні структури фериту.

Для м'яких феритів в умовах високих температур, з урахуванням закону Блоха і температурних властивостей [5]

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

де M_0 – намагніченість при початковій температурі, А/м; V_L – фактор Блоха; V_L – фактор Блоха; V_0 – атомний об'єм феритних наночасток (ФН), м³; діаметр ФН D , м; C_{NB} – температурний коефіцієнт, 1/К.

Для ФН що задовольняють рівнянням Ейлера-Маклорена [5]

$$M_N = \frac{1,5\zeta}{(2\pi JS)^{1.5}} (k_B T)^{1.5} - \frac{1,5\zeta}{\pi JSN} k_B T, \quad (5)$$

де ζ – функція Рімана; J, S, N – параметри, що урахують структуру решітки ФН, м.

Для моделювання залежності намагніченості контактів ЧЕ від температури дорівняємо в рівняннях (2 ÷ 5) диференціали лівої та правої частин:

$$\frac{dM_{MZ}}{dT} = \frac{k_{MZ1}}{\operatorname{sh}^2 \left(\frac{k_{MZ2}}{T} \right)} \frac{1}{T^2} + k_{MZ3}; \quad k_{MZ1} = \frac{M_{SAT} H}{k_B}; \quad k_{MZ2} = \frac{H}{k_B}; \quad k_{MZ3} = -M_{SAT} \frac{k_B}{H}; \quad (6)$$

$$\frac{dM_{Co}}{dT} = \frac{k_{c1} + k_{c2}}{T^2}; k_{c1} = -Ce^{\frac{-E_1}{k_B T}} \cdot \frac{E_1}{k_B}; k_{c2} = -Ce^{\frac{-E_2}{k_B T}} \cdot \frac{E_2}{k_B}; \quad (7)$$

$$\frac{dM_{NB}}{dT} = k_{NB1} \sqrt{T} + k_{NB2}; k_{NB1} = -1,5M_0 B_L; k_{NB2} = M_0 C; \quad (8)$$

$$\frac{dM_N}{dT} = k_{N1} \sqrt{T} - k_{N2}; k_{N1} = \frac{2,25\zeta}{(2\pi JS)^{1,5}} k_B^{1,5}; k_{N2} = \frac{1,5\zeta}{\pi JSN} k_B. \quad (9)$$

Таким чином, математична модель теплового СП являє собою систему рівнянь (1), (6÷9) та ураховує тепловий баланс контактів ЧЕ, та залежності намагніченості феритових контактів ЧЕ СП від типу та структури контактів ЧЕ при зміні температури.

6. Отримання рівняння динаміки сповіщувача та дослідження параметрів його роботи

Для визначення рівнянь динаміки СП та дослідження параметрів його роботи, підставимо рівняння залежності намагніченості від температури (6÷9) до рівняння теплового балансу (1).

Для м'яких Mn-Zn феритів

$$C_m \cdot \frac{\text{sh}^2\left(\frac{k_{MZ2}}{T}\right) T^2}{k_{MZ1} + k_{MZ3} \text{sh}^2\left(\frac{k_{MZ2}}{T}\right) T^2} \cdot \frac{d}{dt} dM_{MZ} + \alpha F \cdot \frac{\text{sh}^2\left(\frac{k_{MZ2}}{T}\right) T^2}{k_{MZ1} + k_{MZ3} \text{sh}^2\left(\frac{k_{MZ2}}{T}\right) T^2} \cdot \frac{d}{dt} dM_{MZ} = \alpha F \cdot \Delta T_{II}; \quad (10)$$

$$T_{MZ} \dot{\bar{m}} + \bar{m} = K_{MZ} \bar{t}_{II}; \quad (11)$$

де

$$T_{MZ} = \frac{C_m}{\alpha F}; K_{MZ} = \frac{k_{MZ1} + k_{MZ3} \text{sh}^2\left(\frac{k_{MZ2}}{T}\right) T^2}{\text{sh}^2\left(\frac{k_{MZ2}}{T}\right) T^2} \frac{T_{II0}}{M_{MZ0}}, \quad (12)$$

де M_{MZ0} – намагніченість м'якого Mn-Zn фериту у вихідній точці, А/м; T_{II0} – температура навколишнього середовища у вихідній точці, К; T_{MZ} – динамічний параметр СП (постійна часу), с; K_{MZ} – динамічний параметр СП (коефіцієнт посилення); \bar{m} , \bar{t}_{II} – відносні змінні.

Намагніченість м'якого фериту на основі кобальту

$$C_m \cdot \frac{T^2}{k_{c1} + k_{c2}} \cdot \frac{d}{dt} dM_C + \alpha F \cdot \frac{T^2}{k_{c1} + k_{c2}} \cdot dM_C = \alpha F \cdot \Delta T_{II}, \quad (13)$$

$$T_C \frac{\dot{\bar{m}}}{\bar{m}} = K_C \bar{t}_\Pi, \quad (14)$$

де

$$T_C = \frac{Cm}{\alpha F}; K_C = \frac{k_{c1} + k_{c2}}{T^2} \frac{T_{\Pi 0}}{M_{C0}}, \quad (15)$$

де M_{C0} – намагніченість м'якого кобальтового фериту у вихідній точці, А/м; T_C – динамічний параметр СП (постійна часу), с; K_C – динамічний параметр СП (коефіцієнт посилення).

Намагніченість м'яких феритів, що задовольняють закону Блоху і з урахуванням температурного коефіцієнту

$$Cm \cdot \frac{1}{k_{NB1} \sqrt{T} + k_{NB2}} \cdot \frac{d}{d\tau} dM_{NB} + \alpha F \cdot \frac{1}{k_{NB1} \sqrt{T} + k_{NB2}} \cdot dM_{NB} = \alpha F \cdot \Delta T_\Pi; \quad (16)$$

$$T_{NB} \frac{\dot{\bar{m}}}{\bar{m}} = K_{NB} \bar{t}_\Pi; \quad (17)$$

де

$$T_{NB} = \frac{Cm}{\alpha F}; K_{NB} = k_{NB01} \sqrt{T} \frac{T_{\Pi 0}}{M_{NB0}}, \quad (18)$$

де M_{NB0} – намагніченість ФН у вихідній точці, А/м; T_{NB} – динамічний параметр СП (постійна часу), с; K_{NB} – динамічний параметр СП (коефіцієнт посилення).

Намагніченість ФН що задовольняють рівнянням Ейлера-Маклорена

$$Cm \cdot \frac{1}{k_{N1} \sqrt{T} - k_{N2}} \cdot \frac{d}{d\tau} dM_N + \alpha F \cdot \frac{1}{k_{N1} \sqrt{T} - k_{N2}} \cdot dM_N = \alpha F \cdot \Delta T_\Pi; \quad (19)$$

$$T_N \frac{\dot{\bar{m}}}{\bar{m}} = K_N \bar{t}_\Pi, \quad (20)$$

де

$$T_N = \frac{Cm}{\alpha F}; K_N = \left(k_{N1} \sqrt{T} - k_{N2} \right) \frac{T_{\Pi 0}}{M_{N0}}, \quad (21)$$

де M_{N0} – намагніченість ФН у вихідній точці, А/м; T_N – динамічний параметр СП (постійна часу), с; K_N – динамічний параметр СП (коефіцієнт посилення).

В результаті отримано рівняння (11, 14, 17, 20) динаміки, що описують роботу теплового СП з принципом дії, що урахує залежність магнітної індукції при зміні температури навколишнього середовища. Ураховуються матеріал контактів ЧЕ та їх структура. Після отримання параметрів динаміки (12, 15, 18, 21), дослідимо параметри роботи СП використовуючи підхід [11].

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

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

$$\tau_{СПР} = \frac{60 \cdot (T_{СТАТ} - T_0) + T_{СП} \frac{dT}{d\tau}}{\frac{dT}{d\tau}}; \quad (24)$$

де $T_{СП}$ – динамічний параметр СП (постійна часу), сек; $T_{ДИН}$, $T_{СТАТ}$ – температури спрацювання СП (динамічна та статична), К; $\tau_{СПР}$ – час спрацювання, сек; $dT/d\tau$ – швидкість зміни температури, К/сек.

Результати теоретичних розрахунків параметрів роботи СП – динамічної температури та часу спрацювання СП порівняно з експериментальними даними отриманими для СПТМ-70 – динамічної температури, часу спрацювання, інерційності сповіщувача, швидкості зростання температури, показано у табл.1 та на рис. 1.

Табл. 1. Параметри спрацювання СП

$(dT/d\tau), ^\circ C/хв$	0,2	5	10	20	30
$T_{СТАТ\ ЕКСП}, ^\circ C$	66				
$T_{ДИН\ ЕКСП}, ^\circ C$		68,2	71,1	75,1	76,8
$T_{ДИН\ РОЗР}, ^\circ C$		67,6	69,7	75,1	78,3
Відносна погрішність $\overline{\Delta x T_{ДИН}}, \%$		0,46	3,78	3,14	4,35
тексперимент, с		437	236	124	90
трозрахунок, с		430	229	129	94
Відносна погрішність $\overline{\Delta x \tau_{СПР}}, \%$		1,83	2,97	4,03	4,44
Тексперимент, с		24			

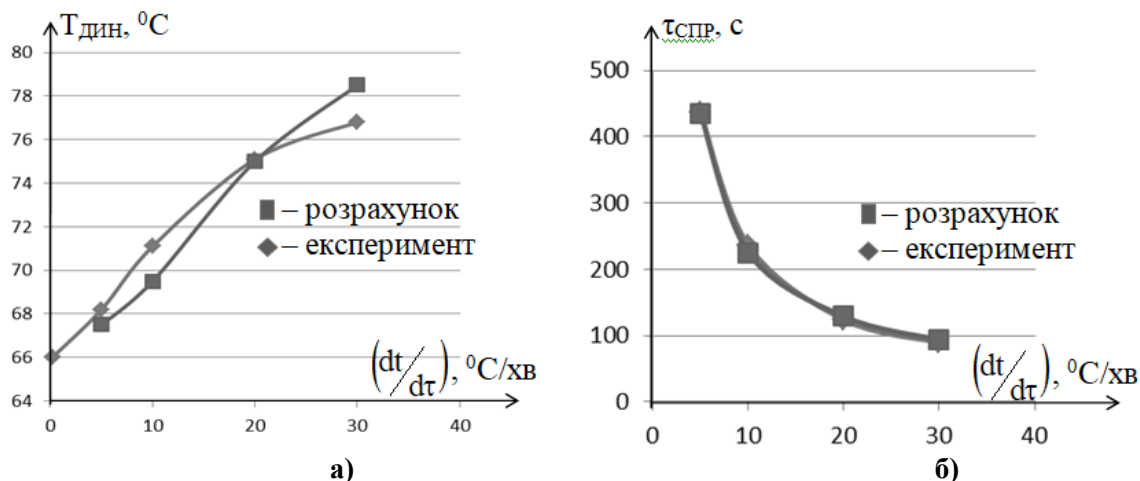


Рис. 1. Параметри роботи теплового СП: а) – динамічна температура спрацювання; б) – час спрацювання

Таким чином отримано рівняння динаміки та проведено дослідження роботи теплового СП, в якому застосовано принцип залежності магнітних властивостей ЧЕ від температури. Форма рівнянь відповідає інерційній позиційній ланці першого порядку, записаній з постійними коефіцієнтами та відносними змінними. Рівняння динаміки урахують залежність намагніченості контактів ЧЕ від температури у межах $(20 \div 80)^\circ\text{C}$, з урахуванням типу та структури речовини контактів: намагніченість м'якого фериту Mn-Zn (11), намагніченість м'яких феритів на основі кобальту (14), намагніченість м'яких феритів, що відповідають умовам закону Блоху і тепловим властивостям (17), намагніченість ФН, які задовольняють вимогам рівнянь Ейлера-Маклорена (20).

Рівняння динаміки є зручними для дослідження параметрів роботи теплових СП, відносна погрішність складає до 5 %.

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

Створено математичну модель теплового СП з залежністю магнітних властивостей від температури. Особливістю розробленої математичної моделі є урахування впливу матеріалу контактів ЧЕ на параметри спрацювання СП.

Характерною ознакою розробленої моделі СП є урахування властивостей контактної групи ЧЕ, які не досліджувалися раніше: контакти на основі м'яких марганець-цинкових феритів, м'яких феритів на основі кобальту, м'якого фериту з відповідністю умовам закону Блоху і теплових властивостей, феритні наночастки що задовольняють рівнянням Ейлера-Маклорена. При порівнянні розробленої моделі СП з відомими моделями сповіщувача з залежністю магнітної індукції від температури, представлена математична модель теплового СП урахує структуру контактної групи ЧЕ. Так в м'якому марганець-цинковому фериті урахуються: намагніченість насичення м'якого фериту M_{SAT} , зовнішнє магнітне поле H , постійна Больцмана k_B , поточна температура контактів T , маса контактів m , теплоємність матеріалу контактів C , площа контактів F . Для СП з контактами із м'якого фериту на основі кобальту – намагніченість при початковій температурі M_{S0} , постійна що урахує структуру матеріалу C , число Авогадро N , енергетичні рівні ячійки фериту E_1 та E_2 , постійна Больцмана k_B , поточна температура контактів T , маса контактів m , теплоємність матеріалу контактів C , площа контактів F . Контакти з м'якого фериту що урахують закон Блоха і температурні властивості – початкова намагніченість M_0 , фактор (критерій) Блоха VL , атомний об'єм ФН V_0 , діаметр ФН D , коефіцієнт Больцмана k_B , температурний коефіцієнт C_{NB} , поточна температура контактів T , маса контактів m , теплоємність матеріалу контактів C , площа контактів F . Контакти з феритних наночасток що задовольняють рівнянням Ейлера-Маклорена – функція Рімана ζ , параметри структури решітки наночасток фериту J , S , N , постійна Больцмана k_B , поточна температура контактів T , маса контактів m , теплоємність матеріалу контактів C , площа контактів F .

Отримані рівняння динаміки СП урахують характеристики матеріалів контактної групи ЧЕ та залежність їх намагніченості від температури і відповідають інерційній позиційній ланці першого порядку, записаній з постійними коефіцієнтами та відносними змінними. Рівняння дозволяють проводити дослідження параметрів роботи СП з залежністю магнітних властивостей від зміни температури оточуючого середовища. Значення відносної погрішності результатів теоретичних розрахунків параметрів роботи СП, відрізняється від значень отриманих в експери-

ментах для СПТМ-70 на величину менше 5 %.

Результати розрахунків підтверджують, що намагніченість контактів ЧЕ залежить від комплексного урахування структури речовини контактів і зміни магнітних характеристик контактів ЧЕ від зміни температури. Вказані фактори визначають вплив динамічних властивостей СП на параметри спрацювання.

В якості обмежень використання представлених моделей сповіщувача з залежністю магнітної індукції від температури є виключна можливість їх застосування тільки при визначених початковій намагніченості, рівня магнітного впливу постійного магніту ЧЕ та відомих параметрах структури контактної групи.

Також недоліком розробленої моделі виступає неможливість урахування гармонійної зміни величини магнітного впливу постійного магніту, що розташовано на герконі та зміну магнітного моменту контактної групи ЧЕ при коливанні температури навколишнього середовища в діапазоні понад 80 °С.

Подальший розвиток наведеного підходу з розробки математичної моделі СП є визначення параметрів намагніченості при початковій температурі, рівня магнітного поля постійного магніту та закону його зміни, визначення магнітного моменту контактів в межах температур, що перевищують прийнятий діапазон. Урахування вказаних параметрів знизить погрішність теоретичних розрахунків, але приведе до значного ускладнення математичної моделі СП за рахунок додавання нелінійних параметрів, лінеаризація яких є окремим складним завданням. В свою чергу, більш загальний підхід в моделюванні роботи СП створює можливість отримати універсальні результати, що спрощує дослідження їх роботи. Проте погрішності отриманих за такими моделями результатів не завжди дозволяють провести якісні дослідження параметрів роботи для СП з контактами ЧЕ різних типів.

Отже, отримані результати застосування розробленої моделі теплового сповіщувача повністю підтвердили справедливість обраної гіпотези, а визначені параметри роботи пожежного сповіщувача співпадають з даними, отриманими в експерименті. Метою дослідження, таким чином, слід вважати досягнутою, а результати виконаних досліджень можна застосувати для формування рекомендацій щодо вибору параметрів динаміки перспективних сповіщувачів. Це дозволяє покращити параметри роботи існуючих сповіщувачів: в першу чергу температури та часу спрацювання.

Таким чином, отримані результати моделювання роботи СП підтверджують правильність обраної гіпотези, а визначені параметри роботи СП співпадають з експериментальними даними. Отже, слід вважати мету роботи досягнутою. Результати проведених досліджень дозволяють надати рекомендації по вибору параметрів роботи СП, що покращить якість їх спрацювання: статичну та динамічну температури спрацювання, інерційність, час спрацювання.

8. Висновки

1. Розроблено математичну модель сповіщувача з залежністю магнітних властивостей від температури. Контакти чутливого елемента в моделях мають структуру м'яких феритів на основах марганець-цинку і кобальту та феритних наночастинок з урахуванням вимог закону Блоху і Ейлера-Маклорена. Теоретично визначено та експериментально підтверджено, що при дослідженні магнітних властивостей контактної групи на параметри спрацювання сповіщувача, разом з показниками намагніченості контактів, індукції, магнітного поля постійного магніту і параметрів конвекційного теплообміну з середовищем, математична модель спо-

віщувача повинна враховувати структуру матеріалу контактів. Так модель намагніченості з м'якими марганець-цинковими феритовими контактами враховує 7 факторів: намагніченість насичення м'якого фериту, зовнішнє магнітне поле, постійну Больцмана, поточну температуру контактів, масу матеріалу контактів, теплоємність матеріалу контактів, площу контактної групи. Для контактів м'якого фериту на основі кобальту враховує 10 факторів: намагніченість при початковій температурі, постійну що враховує структуру матеріалу, число Авогадро, два енергетичні рівні ячійки фериту, постійну Больцмана, поточну температуру контактів, масу контактів, теплоємність матеріалу контактів, площу контактів. Контакти з м'якого фериту по закону Блоха і температурними властивостями враховує 10 факторів: намагніченість при початковій температурі, фактор Блоха, діаметр наночастки фериту, атомний об'єм феритової наночастки, постійну Больцмана, температурний коефіцієнт, поточну температуру контактів, масу контактів, теплоємність матеріалу контактів, площу контактів. Контакти з феритних наночасток що задовольняють рівнянням Ейлера-Маклорена враховує 9 факторів: функцію Рімана, три параметри структури решітки наночасток фериту, постійну Больцмана, поточну температуру контактів, масу контактів, теплоємність матеріалу контактів, площу контактів.

2. Отримано рівняння динаміки сповіщувача та досліджено параметри його роботи. Рівняння враховують тип, структуру речовини контактної групи, залежність магнітних властивостей від температури. Відхилення результатів теоретичних розрахунків від даних експерименту менше 5 %. Рекомендацією для покращення параметрів роботи сповіщувача є доцільність застосовування теплового радіатора та збільшення загальної площі контактної групи для поліпшення умов конвекційного теплообміну з навколишнім середовищем. Доречне врахування в моделі сповіщувача характеристик початкової намагніченості контактної групи, величини магнітного поля і моменту постійного магніту, розширення діапазону робочих температур, характеристик матеріалу 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. 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. Samir Ullah, 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. Mahmoudi M., Kavanlouei M. Temperature and frequency dependence of electromagnetic properties of sintering Li–Zn ferrites with nano SiO₂ additivet. Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2015. Vol. 384. P. 276–283. doi: 10.1016/j.jmmm.2015.02.053

9. 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

10. Cojocar 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., Малярів М. В., Корнієнко Р. В. Математична модель магнітноконтактного 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. 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

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

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

National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine

DEVELOPMENT OF THE MATHEMATICAL MODEL OF THE MAGNETO-CONTACT THERMAL FIRE ALARM

Mathematical models of a fire detector have been developed taking into account the dependence of the magnetization of the contacts of the sensitive element on the temperature and the parameters of the contact material. The obtained equations of the dynamics of the SP take into account the type and structure of the materials of the contact elements of the ЧЗ and the dependence of their magnetization on the temperature and correspond to the inertial positional link of the first order, written in relative variables with constant coefficients. As a result of studying the current literature, the characteristics of the material of the magnetic contacts have been taken into account in the models to determine its optimal dynamic parameters. The mathematical model of the detector is a system of equations consisting of the heat balance equation under conditions of non-stationary heat exchange with the assumption of uniform heating of the contacts of the sensitive element over the entire depth. The second is the equation of the relationship between the magnetization of contacts soldered in a reed switch and temperature. The obtained detector dynamics equations take into account the type and structure of the materials of the contact elements and the dependence of their magnetization on temperature and correspond to the inertial positional link of the first order. The variables of the equations are relative to the linearization point, with constant coefficients. The equations allow to study the detector operation parameters with the principle of the dependence of magnetic induction on temperature. The dynamics equations allow to study the dynamic parameters of the operation of thermal fire detectors, the relative error of the results does not exceed 5 %. The obtained results of the simulation of the fire detector operation confirm the correctness of the chosen hypothesis, and the determined parameters of the fire detector operation coincide with the experimental data. The results of the conducted studies allow to provide recommendations on the selection of the detector operation parameters, which will improve the

quality of their operation: static and dynamic operation temperatures, inertia, operation time.

Keywords: fire detector, sensitive element, mathematical model, 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. 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
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: 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. Samir, U., 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. Mahmoudi, M., Kavanlouei, M. (2015). Temperature and frequency dependence of electromagnetic properties of sintering Li–Zn ferrites with nano SiO₂ additivet. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 384, 276–283. doi: 10.1016/j.jmmm.2015.02.053
9. 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
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 mahnitnokontaktynoho teplovoho pozhezhnogo spovishchuvacha. *Problemy nadzvychnykh 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-seredovischi-matlab.html>

Надійшла до редколегії: 11.10.2024

Прийнята до друку: 12.11.2024