

В.В. Козирський, Т. Нурек, Я. Слома, В.Я. Бунько, М.В. Гончарук

## Використання сплавів з пам'яттю форми у запобіжниках для захисту електричних установок

**Проблема.** Ступінь пошкодження електроустановок при коротких замиканнях залежить від часу спрацювання захисту. Ефективним способом покращення струмообмежуючого ефекту в електричних запобіжниках (зменшення часу їх спрацювання) може бути застосування елементів із сплавів з ефектом пам'яті форми. Проте, це потребує ретельного вивчення та дослідження. **Метою** роботи є встановлення закономірностей покращення струмообмежувального ефекту запобіжника (зменшення часу спрацювання) при застосуванні термочутливих елементів із сплаву з пам'яттю форми (SMA – shape memory alloy). Досягнення мети базується на аналізі проведених авторами експериментальних досліджень і побудованих математичних моделях характеристик запобіжника, що містить елемент SMA. **Методика.** У статті представлено математичне моделювання параметрів і характеристик запобіжників з термомеханічним руйнуванням запобіжного елемента, а також теплофізичну модель запобіжника з термочутливим елементом SMA. У статті представлені **результати** експериментальних досліджень традиційного запобіжника та запобіжника, оснащеного термочутливим елементом SMA. Для кожного струму час спрацювання модифікованого запобіжника був коротшим, ніж у традиційного запобіжника. Використання термочутливого елемента скоротило час спрацювання більш ніж у 20 разів для струму 10 А і приблизно в 10 разів (з 0,257 с до 0,0244 с) для струму 20 А. Для найбільшого випробуваного струму (90 А) час спрацювання запобіжника був удвічі меншим, ніж у традиційного запобіжника. Наведено результати розрахунків характеристик запобіжника за допомогою математичної моделі та порівняння з результатами експериментальних досліджень. **Наукова новизна.** Розроблені математичні моделі характеристик запобіжників, що містять елементи SMA, дозволили вперше обґрунтувати взаємозв'язки параметрів (геометричних розмірів і характеристик елементів SMA, плавких вставок запобіжників) зі струмовими навантаженнями електроустановок. **Практична значимість** роботи полягає у пропонуваному використанні термочутливих елементів з функціональних матеріалів для підвищення струмообмежувальної дії запобіжників для захисту електроустановок при коротких замиканнях. Бібл. 19, табл. 2, рис. 7.

**Ключові слова:** функціональні матеріали, запобіжник, сплав з пам'яттю форми, термочутливий елемент.

**Вступ.** Низка електротехнічних апаратів є особливо чутливими до перевантаження (наприклад, трансформатори напруги [1] у засобах автоматичного вводу резерву й секціонування [2]), відповідно, для їхнього захисту використовують плавкі запобіжники зі струмообмежуючим ефектом. Струмообмежуючий ефект у сучасних запобіжниках створюється шляхом розчинення більш тугоплавких металів у менш тугоплавких, застосування сплаву плавких вставок, точкового зменшення площі поперечного перерізу плавких вставок, прискореного гасіння електричної дуги кварцовим наповнювачем тощо.

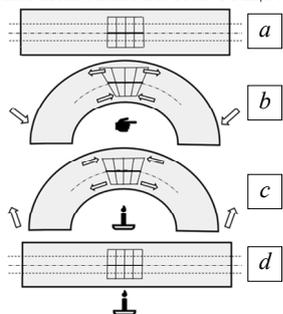


Рис. 1. Інтерпретація властивості виробу зі сплаву з ефектом пам'яті форми: *a* – початкова форма виробу; *b* – примусова деформація виробу (деформація структури мартенситу); *c* – нагрівання виробу й початок відновлення форми (термопружна зворотна деформація структури мартенситу); *d* – завершення відновлення форми до початкового стану

виконувати функції як датчика, так і виконавчого механізму [3, 4].

Два найпоширеніші SMA з точки зору застосування та досліджень – це Ni-Ti, також відомий як нітинол, та сплави на основі міді, такі як Cu-Al-Mn [4–6]. Одним із варіантів SMA на основі міді є Samital [7].

Відновлення форми виробів з SMA може бути досягнуто при непрямому нагріванні джерелом тепла і безпосередньо – під дією електричного струму. Виріб з SMA може перетворювати теплову енергію в механічну роботу, значення якої залежить головним чином від складу сплаву і геометрії виробу [3, 8, 9].

Процес пам'яті форми включає мартенситні перетворення двох типів: прямі та зворотні. Кожне з них проявляється в певному діапазоні температур:  $M_S$  та  $M_F$  – початкова та кінцева температури мартенситного перетворення при охолодженні;  $A_S$  та  $A_F$  – початкова та кінцева температури зворотного мартенситного перетворення при нагріванні відповідно. Температури мартенситних перетворень є функцією марки сплаву (системи сплаву) та його хімічного складу. Незначні зміни хімічного складу сплаву (навмисні або внаслідок дефектів) спричиняють зміну характерних температур перетворення. Звідси впливає необхідність збереження точного хімічного складу для функціонального прояву ефекту пам'яті форми з запрограмованими параметрами та характеристиками, що ставить металургійне виробництво SMA у сферу високих технологій [3, 4].

Експериментальні дослідження виробів з SMA показали [3, 10, 11], що з точки зору економічних показників, а також фізичних властивостей і характеристик, сплав на основі міді Cu (83 %)-Al (12 %)-Mn (5 %) є найбільш придатним для вирішення різних інженерних завдань, наприклад, в електроустановках та інших областях. Велике значення має його вартість, яка майже в 20 разів нижча порівняно з нітинолом Ni-Ti.

Унікальною фізичною особливістю SMA є залежна від часу характеристика відновлення форми при прямому нагріванні виробів електричним струмом, що дозволяє створювати високочутливі електричні пристрої захисту електроустановок від перевантажень і коротких замикань [9, 12].

Показники, отримані авторами під час попередніх експериментальних досліджень часу відновлення

© В.В. Козирський, Т. Нурек, Я. Слома, В.Я. Бунько, М.В. Гончарук

форми термочутливого елемента, що нагрівається безпосередньо електричним струмом, а також реактивної сили та її поведінки під час збільшення електричного струму, підтверджують можливість проектування пристроїв захисту та контролю [3].

Існує два класичних принципи конструкції запобіжників: плавкий тип з термічним руйнуванням запобіжного елемента та багаторазовий контактний тип з біметалевим термочутливим елементом [13].

На основі електротермомеханічних властивостей застосування SMA в цьому дослідженні було реалізовано новий принцип конструкції запобіжника (рис. 2). Робота даного запобіжника базується на примусовому механічному руйнуванні запобіжного елемента термочутливим натяжним елементом при заданому значенні струму [14].

Струм, що протікає через елемент запобіжника та термочутливий елемент, нагріває їх. Термочутливий елемент 1 змінює (відновлює) свою форму під впливом температури, викликаючи механічне розтягування в елементі запобіжника 2. Якщо натяг досягає межі механічної міцності, запобіжний елемент спочатку руйнується механічно, а потім термічно завдяки електричній дузі, яка розтягується між частинами розірваного запобіжного елемента, що зменшує час спрацювання запобіжника.

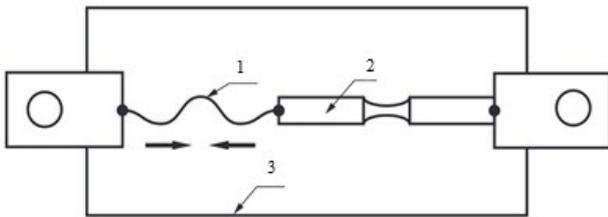


Рис. 2. Схематичне зображення запобіжника з примусовим руйнуванням запобіжного елемента: 1 – термочутливий елемент SMA; 2 – запобіжний елемент; 3 – корпус [14]

Отже, метою роботи є встановлення закономірностей покращення струмообмежувального ефекту запобіжника (зменшення часу спрацювання) при застосуванні термочутливих елементів із сплаву з пам'яттю форми. Досягнення мети базується на аналізі проведених авторами експериментальних досліджень і побудованих математичних моделях характеристик запобіжника, що містить елемент SMA.

**Математичне моделювання параметрів і характеристик запобіжників з термомеханічним руйнуванням запобіжного елемента.** Припустимо, що термочутливий елемент розташований в однорідному обмеженому середовищі з низьким тепловим опором таким чином, що градієнт температури в середині цього елемента дуже малий, а між термочутливим елементом і його середовищем існує ідеальний тепловий контакт. Коефіцієнт теплопередачі не залежить від температури [15, 16]. Коли протікає електричний струм, тепло, що продукується в термочутливому елементі, витрачається на нагрівання як цього елемента, так і його контактної середовища. У такому випадку рівняння теплового балансу має вигляд [17, 18]:

$$(c_1 m_1 + c_2 m_2) \frac{d\theta}{dt} + \alpha S (\theta - \theta_0) = I^2 R_0 (1 + \beta \theta), \quad (1)$$

де  $\theta$  – температура термочутливого елемента, °С;  $c_1$  – питома теплоємність сплаву термочутливого еле-

мента, Дж/(кг·К);  $c_2$  – питома теплоємність середовища, в якому знаходиться термочутливий елемент, Дж/(кг·К);  $m_1$  – маса термочутливого елемента, кг;  $m_2$  – маса середовища, кг;  $R_0$  – електричний опір термочутливого елемента при 0 °С;  $S$  – поверхня охолодження, м<sup>2</sup>;  $I$  – електричний струм, що протікає через термочутливий елемент, А;  $\beta$  – коефіцієнт температурного опору, К<sup>-1</sup>;  $\alpha$  – коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\theta_0$  – температура навколишнього середовища, °С.

За таких умов розв'язок диференціального рівняння (1) для постійного струму  $I$  та початкової умови  $\theta|_{t=0} = \theta_0$  є таким [3]:

$$\theta = \frac{\frac{I^2 R_0}{\alpha S} + \theta_0}{1 - \frac{I^2 R_0}{\alpha S} \beta} - \frac{\frac{I^2 R_0}{\alpha S} (1 + \beta \theta_0)}{1 - \frac{I^2 R_0}{\alpha S} \beta} \exp \left[ - \frac{t \left( 1 - \frac{I^2 R_0}{\alpha S} \beta \right) \alpha S}{c_1 m_1 + c_2 m_2} \right]. \quad (2)$$

Характеристики запобіжника в стаціонарному стані, якщо  $\frac{I^2 R_0}{\alpha S} \beta < 1$ , то згідно з (2), коли  $t \rightarrow \infty$ , температура термочутливого елемента наближатиметься до значення  $\theta_{es}$ , яке виражається як:

$$\theta_{es} = \left( \frac{I^2 R_0}{\alpha S} + \theta_0 \right) / \left( 1 - \frac{I^2 R_0}{\alpha S} \beta \right). \quad (3)$$

Якщо в (3) температурний коефіцієнт опору  $\beta = 0$ , то залежність заданої температури від струму буде визначатися виразом:

$$\theta_{es} = \frac{I^2 R_0}{\alpha S} + \theta_0. \quad (4)$$

Номинальний струм запобіжника  $I_N$  визначається з (3) за умови, що:

$$\theta_{es} = A_s, \quad (5)$$

де  $A_s$  – температура початку відновлення форми термочутливого елемента, °С.

Отже, номинальний струм запобіжника:

$$I_N = \sqrt{\frac{\alpha S (A_s - \theta_0)}{R_0 (1 + \beta A_s)}}. \quad (6)$$

Граничний струм ( $I_{lim}$ ) для цього типу запобіжника буде визначатися критичним рівнем температури  $\theta_{kr}$ , при якому буде виконуватися умова:

$$\sigma_{ad} = \sigma_{in}, \quad (7)$$

де  $\sigma_{ad}$  – граничне механічне розтягуюче напруження елемента запобіжника, Па;  $\sigma_{in}$  – механічне напруження в елементі запобіжника при нагріванні термочутливого елемента, Па:

$$I_{lim} = \sqrt{\frac{\alpha S (\theta_{kr} - \theta_0)}{R_0 (1 + \beta \theta_{kr})}}. \quad (8)$$

Співвідношення граничного струму до номинального струму буде визначатися критичною температурою і температурою відновлення форми термочутливого елемента SMA.

$$I_{lim} / I_N = \sqrt{\frac{(\theta_{kr} - \theta_0) (1 + \beta A_s)}{(A_s - \theta_0) (1 + \beta \theta_{kr})}}. \quad (9)$$

Характеристики запобіжника в нестабільному режимі. Диференціальне рівняння, що описує процес охолодження термочутливого елемента, має вигляд:

$$(c_1 m_1 + c_2 m_2) \frac{d\theta}{dt} + \alpha S (\theta - \theta_0) = 0, \quad (10)$$

а його розв'язок для початкової умови  $\theta|_{t=0} = \theta_{es} \in [3]$ :

$$\theta - \theta_0 = (\theta_{es} - \theta_0) e^{-t/\left[\frac{(c_1 m_1 + c_2 m_2)}{\alpha S}\right]}. \quad (11)$$

Оскільки формула (2) показує залежність температури термочутливого елемента від часу протікання струму, її можна перетворити для визначення часу, необхідного для нагрівання елемента до заданої температури і, зокрема, до критичної температури:

$$t_{kr} = \frac{c_1 m_1 + c_2 m_2}{\alpha S \left( \frac{I^2 R_0}{\alpha S} \beta - 1 \right)} \ln \left[ \frac{1 + \beta \theta_{kr}}{1 + \beta \theta_0} \cdot \frac{\theta_{kr} - \theta_0}{\frac{I^2 R_0}{\alpha S} (1 + \beta \theta_0)} \right]. \quad (12)$$

Формула часово-струмової характеристики запобіжника з будь-яким термочутливим елементом SMA має вигляд:

$$\frac{t_{kr}}{\tau} = \frac{I_{lim}^2 (1 + \beta \theta_{kr})}{I^2 (\theta_{kr} - \theta_0) - I_{lim}^2 (1 + \beta \theta_{kr})} \ln \left[ \frac{1 + \beta \theta_{kr}}{1 + \beta \theta_0} \left( 1 - \frac{I_{lim}^2}{I^2} \right) \right], \quad (13)$$

де стала часу дорівнює:

$$\tau = \frac{c_1 m_1 + c_2 m_2}{\alpha S}.$$

Термомеханічні характеристики термочутливого SMA елемента і характеристики механічної міцності запобіжника, захисні характеристики запобіжника з термомеханічним руйнуванням запобіжника можна отримати, виконавши умову (7).

Оскільки запобіжник використовує принцип механічного руйнування запобіжного елемента, рівняння максимальної межі механічної міцності запобіжного елемента буде таким:

$$F_{ad} = \sigma_{AD} \pi \frac{d_{je}^2}{4}, \quad (14)$$

де  $d_{je}$  – діаметр запобіжного елемента, м.

Відповідно, сила, що виникає в термочутливому елементі (SMA) запобіжника, дорівнює:

$$F_{te}(t, I) = ab \sigma_{te}(t, I), \quad (15)$$

де  $a$ ,  $b$  – ширина і товщина SMA, відповідно, м;  $\sigma_{te}(t, I)$  – термомеханічна напружка, що виникає в термочутливому елементі при прямому нагріванні (функція часу  $t$  і струму  $I$ ), Па.

Тоді рівняння балансу межі механічної міцності буде таким:

$$\sigma_{te}(t, I) ab - \sigma_{ad} \pi \frac{d_{je}^2}{4} = 0. \quad (16)$$

Моделювання термомеханічної міцності в термочутливому елементі SMA можна виконати за допомогою таких рівнянь:

$$\sigma_{te}(t) = \text{if}[\theta(t) \geq 90, M_{te}(t), K_{te}(t)]; \quad (17)$$

$$M_{te}(t) = (1 - e^{-\theta(t) A_1}) A_2 L_0 - A_3 L_0; \quad (18)$$

$$K_{te}(t) = A_4 \theta(t)^4 L, \quad (19)$$

де  $\sigma_{te}$  – термомеханічна напружка, Па;  $t$  – час, с;  $\theta$  – температура, °C;  $A_1 - A_4$ ,  $L_0$ ,  $L$  – коефіцієнти, розраховані на основі експериментальних вимірювань термомеха-

нічних характеристик зразків SMA. Розмірності коефіцієнтів:  $L$  – [Па/К<sup>4</sup>];  $L_0$  – [Па];  $A_1$  – [1/К];  $A_2 - A_4$  – безрозмірні величини.

Залежність температури термочутливого елемента від струму та його часу протікання базується на відомій залежності [3, 9]:

$$\theta = \frac{\rho}{C} 10^6 (I/q)^2 t, \quad (20)$$

де  $\rho$  – питомий електричний опір SMA, Ом м;  $C$  – питома об'ємна теплоємність матеріалу провідника, Дж/(м<sup>3</sup>·К);  $I$  – струм, кА;  $q$  – площа поперечного перерізу провідника, м<sup>2</sup>;  $t$  – час, с.

Для сплаву Samital зміна температури SMA в часі при нагріванні струмом короткого замикання може бути представлена виразом [3]:

$$\theta(t, I) = 5,328 \cdot 10^{-7} \frac{W(t)}{q^2} + 1,28 \cdot 10^{-18} \frac{W(t)^2}{q^4} + 4,014 \cdot 10^{-29} \frac{W(t)^4}{q^6} + \theta_0, \quad (21)$$

де  $W(t)$  – тепловий імпульс, А<sup>2</sup>·с;  $q$  – площа поперечного перерізу термочутливого елемента, м<sup>2</sup>.

Тепловий імпульс, що утворюється в термочутливому елементі під час протікання струму короткого замикання, обчислюється за формулою [3, 9]:

$$W(t) = \int_0^t [I_{pm} \sin(\omega t) + I_{am} e^{-t/T_a}]^2 dt, \quad (22)$$

де  $I_{pm}$ ,  $I_{am}$  – періодична та аперіодична складові струму короткого замикання, відповідно, кА;  $T_a$  – стала часу спаду аперіодичної складової струму короткого замикання, с.

Для отримання узагальненого рівняння захисних характеристик запобіжника взаємозв'язок між температурою нагрівання термочутливого елемента та струмом і часом його протікання апроксимується наступним поліномом (в основу покладені експериментальні дані вимірювань):

$$\theta(t, I) = 5,328 \cdot 10^{-7} I^2 \frac{t}{q^2} + 1,28 \cdot 10^{-18} I^4 \frac{t^2}{q^4} + 4,014 \cdot 10^{-29} I^6 \frac{t^4}{q^6} + \theta_0. \quad (23)$$

Оскільки другий і третій доданки у (23) приймають значення, близькі до нуля, то можна використати спрощену залежність при похибці <1 %:

$$\theta(t, I) = 5,328 \cdot 10^{-7} I^2 \frac{t}{q^2} + \theta_0. \quad (24)$$

Тоді модель термомеханічних характеристик набуває такого вигляду:

$$\sigma_{te}(t, I) = \text{if}[\theta(t, I) \geq 90, M_{te}(t, I), K_{te}(t, I)]; \quad (25)$$

$$M_{te}(t, I) = \left[ 1 - e^{-\left(5,328 \cdot 10^{-7} I^2 \frac{t}{q^2} + \theta_0\right) A_1} \right] A_2 L_0 - A_3 L_0; \quad (26)$$

$$K_{te}(t, I) = A_4 \left( 5,328 \cdot 10^{-7} I^2 \frac{t}{q^2} + \theta_0 \right)^4 L. \quad (27)$$

Після перетворення (24) відносно часу  $t$  і врахування рівняння термомеханічних характеристик термочутливого елемента отримуємо ампер-секундну характеристичну (математичну модель) запобіжника з натяжним елементом, виготовленим із сплаву з пам'яттю форми:

$$t(I) = 1,87 \cdot 10^6 \frac{q_{te}^2}{I^2} \left[ 4 \sqrt{\pi \sigma_{fe} \frac{d_{fe}^2}{ALq}} - \theta_0 \right], \quad (28)$$

де  $A = 4 \cdot A_4$  – безрозмірна величина.

У випадку SMA у вигляді намотаної пружини отримуємо:

$$t(I) = 1,87 \cdot 10^6 \frac{q_{te}^2}{I^2} \left[ \sqrt{d_{fe} d_{te} \sqrt{\sigma_{fe} \pi \frac{D_{te}}{2A_4 L L_{te} \ln(1+\varepsilon)}}} - \theta_0 \pi^2 d_{te} \right], \quad (29)$$

де  $d_{te}$  – діаметр дроту SMA, м;  $L_{te}$  – довжина дроту SMA, м;  $D_{te}$  – діаметр пружини SMA, м;  $\varepsilon$  – відносна деформація пружини, безрозмірна величина;  $C/\rho = 1,87 \cdot 10^6 [A^2 \cdot c / (m^4 \cdot K)]$ .

**Конструкція випробувального стенду.** Для проведення випробувань з метою перевірки розробленої математичної моделі створено спеціальний випробувальний стенд. Його функціональна схема показана на рис. 3, на рис. 4 наведено вимірювальний блок, а на рис. 5 – загальний вигляд.

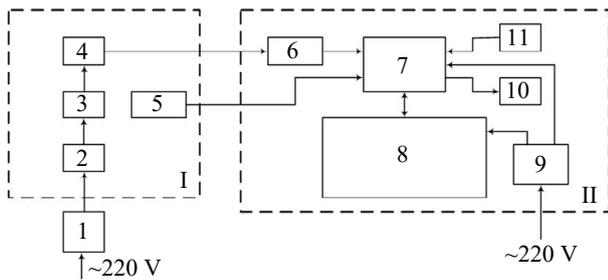


Рис. 3. Функціональна схема стенду: I – вимірювальний прилад; II – блок відображення та зберігання інформації; 1 – регульований блок живлення; 2 – запобіжник; 3 – тензодатчик; 4 – датчик струму; 5 – аналого-цифрові перетворювачі; 6 – мікроконтролер; 7 – сенсорний екран; 8 – блок живлення; 9 – пристрій зберігання інформації; 10 – датчик температури навколишнього середовища

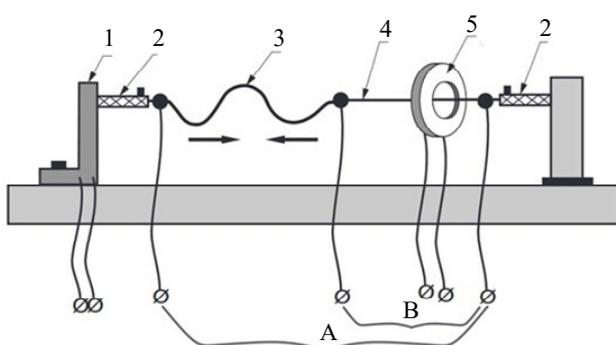


Рис. 4. Вимірювальний блок експериментального стенду: 1 – кріплення тензодатчика; 2 – ізолюючі кріплення; 3 – термочутливий елемент SMA; 4 – запобіжний елемент; 5 – індукційна котушка, елемент вимірювання струму; А – схема живлення при випробуванні запобіжника з термочутливим елементом SMA; В – схема живлення при випробуванні традиційного запобіжника

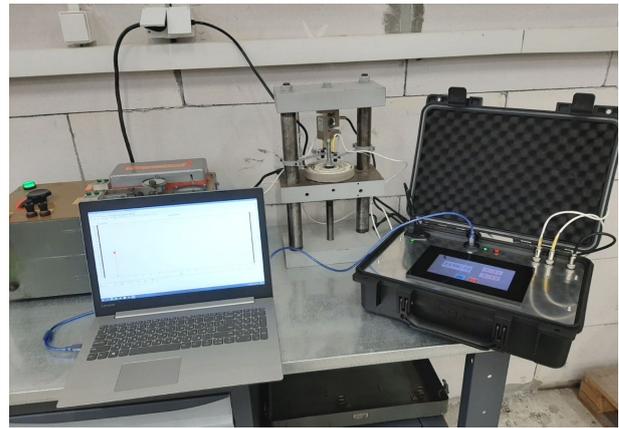


Рис. 5. Загальний вигляд експериментальної установки для дослідження термочутливих елементів з пам'яттю форми та запобіжників [19]

Стенд може використовуватися для випробування як традиційних запобіжників, так і запобіжників з елементом SMA. У першому випадку напруга подається на схему В, і струм протікає тільки через елемент 4. У другому випадку напруга подається на схему А, і струм протікає як через традиційний елемент запобіжника 4, так і через термочутливий елемент 3. Термочутливий елемент нагрівається і, змінюючи свою форму, збільшує механічне навантаження на частину 4 запобіжника. Система тензодатчиків вимірює збільшення сили розтягування до моменту перевищення межі міцності і руйнування запобіжного елемента. Струм вимірюється за допомогою індуктивного датчика УТТ-6М2 з класом точності 0,2 (5) і системи контролю та вимірювання. Точність вимірювання розривної сили становить 2 %.

Характеристики запобіжника з номінальним струмом 7 А, що передбачають термомеханічне руйнування запобіжного елемента, можна проаналізувати на прикладі з такими вихідними даними: геометрія термочутливого елемента  $a = 0,005$  м (ширина),  $b = 0,00035$  м (товщина); мідний запобіжний елемент – дріт діаметром  $d = 0,0002$  м; межа механічної міцності на розрив запобіжного елемента  $\sigma_{fe} = 2 \cdot 10^8$  Па (зусилля на розрив 6,28 Н); струм  $I = 40$  А;  $A_4 = 5,8 \cdot 10^{-5}$ ;  $L = 2 \cdot 10^5$  Па/К<sup>4</sup>. Результати розрахунків наведені на рис. 6, 7.

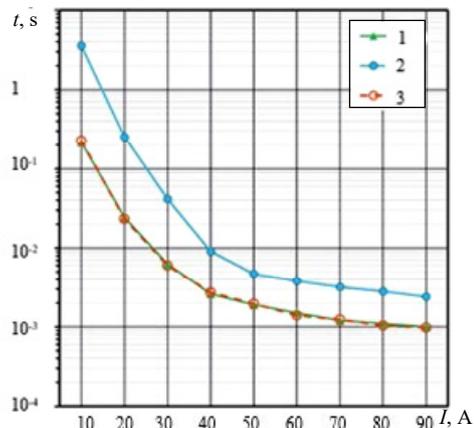


Рис. 6. Ампер-секундні характеристики запобіжників: 1 – термомеханічне руйнування запобіжного елемента (розраховане); 2 – експериментальні захисні характеристики традиційного запобіжника; 3 – експериментальні захисні характеристики запобіжника з термочутливим елементом SMA

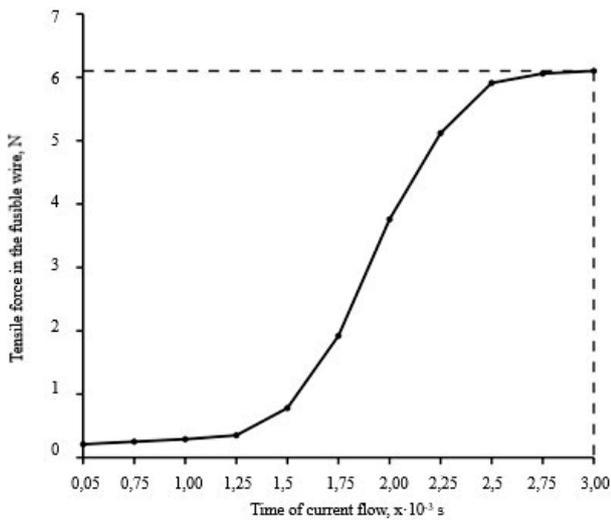


Рис. 7. Динаміка зміни сили розтягування, що діє на плавкий елемент запобіжника (мідний дріт)

**Результати та обговорення.** У табл. 1 наведено результати вимірювань для традиційного запобіжника та запобіжника SMA, оснащеного термочутливим елементом. Для кожного значення струму час спрацьовування модифікованого запобіжника був коротшим, ніж у традиційного запобіжника. Використання термочутливого елемента скоротило час реакції більш ніж у 20 разів для струму 10 А і приблизно в 10 разів (з 0,257 с до 0,0244 с) для струму 20 А. Скорочення часу реакції зменшувалося із збільшенням струму. Для найвищого з випробуваних струмів (90 А) час спрацьовування запобіжника був менше половини значення для традиційного запобіжника.

Таблиця 1  
Час спрацьовування запобіжника для різних значень струму (SD – стандартне відхилення)

Струм, А	Традиційний запобіжник	Запобіжник з елементом SMA	Значення, розраховані для запобіжника з елементом SMA
	Час руйнування запобіжного елемента, середнє значення ( $\pm$ SD), с		
10	3,579 ( $\pm$ 0,0224)	0,2158 ( $\pm$ 0,0041)	0,2266
20	0,254 ( $\pm$ 0,0044)	0,0244 ( $\pm$ 0,0005)	0,02338
30	0,0416 ( $\pm$ 0,0003)	0,0063 ( $\pm$ 0,0002)	0,00602
40	0,0091 ( $\pm$ 0,0002)	0,0026 ( $\pm$ 0,0001)	0,00272
50	0,0047 ( $\pm$ 0,0003)	0,0022 ( $\pm$ 0,0001)	0,00196
60	0,0038 ( $\pm$ 0,0001)	0,0015 ( $\pm$ 0,0001)	0,00139
70	0,0032 ( $\pm$ 0,0003)	0,0012 ( $\pm$ 0,0002)	0,00104
80	0,0028 ( $\pm$ 0,0001)	0,0011 ( $\pm$ 0,0001)	0,00104
90	0,0024 ( $\pm$ 0,0001)	0,0010 ( $\pm$ 0,00002)	0,00098

Таблиця 2 містить розрахункові значення з математичної моделі, описаної в методології дослідження, які близькі до результатів вимірювань. Залежності часу спрацьовування запобіжника для різних значень струму в трьох варіантах показані на рис. 6.

Таблиця 2  
Динаміка змін сили розтягування, що діє на плавкий дріт (SD – стандартне відхилення)

Час протікання струму, мс	Сила, що діє на плавкий дріт	
	Середнє значення ( $\pm$ SD), Н	
0,5	0,21 ( $\pm$ 0,006)	
0	0,25 ( $\pm$ 0,002)	
1	0,29 ( $\pm$ 0,002)	
1,25	0,35 ( $\pm$ 0,002)	
1,5	0,78 ( $\pm$ 0,004)	
1,75	1,92 ( $\pm$ 0,003)	
2	3,76 ( $\pm$ 0,004)	
2,25	5,12 ( $\pm$ 0,004)	
2,5	5,91 ( $\pm$ 0,004)	
2,75	6,06 ( $\pm$ 0,013)	
3	6,12 ( $\pm$ 0,000)	

В експериментальних дослідженнях використовувався один і той самий елемент запобіжника (мідний дріт діаметром  $d = 0,0002$  м). Положення характеристик, отриманих з розрахунків і експериментів у координатній сітці (рис. 6), підтверджують позитивний вплив термочутливого елемента SMA на чутливість запобіжника і підвищення струмообмежувального ефекту. Розбіжність між розрахунковими (1) та експериментальними результатами (3) на рис. 6, оцінена за методом найменших квадратів, в середньому не перевищує 5 %.

Відповідно до методики дослідження проводились вимірювання зміни сили розтягування при різних струмах. Результати наведені в табл. 2 та показані на рис. 7. За цих умов при струмі  $I = 40$  А сила розтягування досягала граничного значення через  $\approx 3$  мс. Такий час спрацьовування запобіжника досягається завдяки використанню термочутливого елемента SMA і значно підвищує клас струмового захисту, забезпечуючи задовільну безпеку для більшості електричного обладнання. Міцність на розрив запобіжного елемента становила  $\approx 6$  Н і була дещо нижчою за розрахункову міцність на розрив, що наведено вище (6,28 Н). Ця різниця зумовлена нагріванням запобіжного елемента і зміною його механічних характеристик.

#### Висновки.

1. Використання термочутливого елемента зі сплаву з пам'яттю форми (SMA) для забезпечення термомеханічного руйнування плавкого елемента запобіжника є високоєфективним способом покращення його струмообмежувального ефекту. Експериментально доведено, що модифікований запобіжник демонструє значно коротший час спрацьовування порівняно з традиційним: скорочення часу реакції становило більш ніж у 20 разів для струму 10 А і приблизно в 10 разів для струму 20 А.

2. Розроблена математична модель адекватно описує теплові, електричні та термомеханічні процеси в запобіжнику з SMA елементом; розбіжність між розрахунковими та експериментальними ампер-секундними характеристиками не перевищує 5 %, що підтверджує можливість її використання для інженерного проектування та оптимізації параметрів запобіжників.

3. Для реалізації нового принципу конструкції запобіжника доцільним є використання функціонального сплаву на основі міді, наприклад Cu-Al-Mn (Camital). Цей вибір обумовлений не лише його при-

датними фізичними властивостями та характеристиками, але й значно нижчою вартістю порівняно з нітиномом Ni-Ti, що підвищує практичну значимість пропонуваного рішення.

**Конфлікт інтересів.** Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Grechko O., Baida Y., Sereda O., Sereda O., Pantelyat M., Dryvetskiy S. Improvement of Fuses to Increase the Efficiency of Medium Voltage Instrument Transformers Protection. *2025 IEEE 6th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, 2025, pp. 1-4. doi: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek61436.2025.11288696>.
2. Kozyrskiy V., Gay O., Synyavskiy O., Savchenko V., Makarevych S. Optimization of sectionalisation parameters of distributive electric networks. *Handbook of Research on Smart Computing for Renewable Energy and Agro-Engineering*, 2020, pp. 78-105. doi: <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-1216-6.ch004>.
3. Козирський В., Каплун В., Фірстов Г., Ліхачов О. *Монографія. Електротехнічне обладнання на основі функціональних матеріалів*. К.: НУБІП України, 2014. 409 с.
4. Sharma N., Jangra K., Raj T. Applications of Nickel-Titanium Alloy. *Journal of Engineering and Technology*, 2015, vol. 5, no. 1, pp. 1-7. doi: <https://doi.org/10.4103/0976-8580.149472>.
5. Bublely I.R., Koval Y.N., Likhachev A.A., Sych T.G., Zatsarnaya A.V. Investigation at Aging of Functional Properties of Alloy of Cu-Al-Mn System Alloyed with Co. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*, 2021, vol. 43, no. 12, pp. 1627-1637. doi: <https://doi.org/10.15407/mfint.43.12.1627>.
6. Sun S., Yu J., Chang Y., Zheng Y., Wang C. Effect of Al content and quenching on the microstructure and mechanical properties of as-cast Cu-Al-Mn shape memory alloy. *Materials Chemistry and Physics*, 2025, vol. 345, art. no. 131282. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2025.131282>.
7. CAMITAL brand registration certificate no. 163545. Available at: <https://alotek.international/uploads/230/1jgmO5anW3WCOVP22n2bZsx7RSeMc9-metaQ2FtaXRhbCDQodCy0LjQtNC10YLOtdC70YHRgtCy0L4r0LfQsCvRgNC10LPQuNGB0YLRgNCw0YbQuNGPLnBkZg==.pdf> (Accessed 20 May 2025).
8. Theren B., Schmelter T., Chromik P., Kuhlenkötter B. Investigations Regarding the Longterm Behaviour of Electrically Heated SMA Wires Using Alternating Current. *Proceedings of ASME 2021 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems, SMASIS 2021*, art. no. V001T06A003. doi: <https://doi.org/10.1115/SMASIS2021-67649>.
9. Panciroli R. Influence of electric current on the thermo-mechanical static and fatigue properties of shape memory NiTi wires. *Smart Materials and Structures*, 2020, vol. 29, no. 11, art. no. 115046. doi: <https://doi.org/10.1088/1361-665X/abb986>.
10. Kozyrskiy V., Bunko V. Experimental Studies of Elements from the Functional Intermetallic Cu-Al-Mn for Construction of a Heat Engine and Power Plant. *Problems of the Regional Energetics*, 2025, vol. 3, no. 67, pp. 162-173. doi: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2025.3-67.14>.
11. Бунько В.Я., Козирський В.В. Дослідження елементів з ефектом пам'яті форми та визначення їх термомеханічних характеристик при різних температурах загартування. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова*, 2024, № 1 (494), с. 69-73.
12. Gorges T., Seelecke S., Motzki P. Alternating current activation of SMA wires. *GMM-Fachberichte*, 2021, vol. 2021-February, no. 98, pp. 149-151.
13. EATON. *High speed fuse application guide*. 2016. 44 p. Available at: <https://www.eaton.com/content/dam/eaton/products/electrical-circuit-protection/bussmann-iec-high-speed-semi-conductors-fuses/eaton-bussmann-series-high-speed-fuses-application-guide-br132015en-en-us.pdf> (Accessed 20 May 2025).

14. Кравец А.В., Козырский В.В. АС СССР № 1707646, Н01Н 85/36, 85/02. *Плавающий предохранитель*. Оpubл. 23.01.92, бюл. № 3, с. 14.

15. Chiriac G. Thermal analysis of fuses with variable cross-section fuselinks. *Electric Power Systems Research*, 2012, vol. 92, pp. 73-80. doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2012.06.010>.

16. Todorov G., Kamberov K. EV fuse design cost reduction based on Thermal-Electric Conduction analyses. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2020, vol. 21, art. no. 100692. doi: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100692>.

17. Fernandez E., Torres E., Zamora I., Mazon A.J., Albizu I. Thermal model for current limiting fuses installed in vertical position. *Electric Power Systems Research*, 2014, vol. 107, pp. 167-174. doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2013.10.004>.

18. Torres E., Mazón A.J., Fernández E., Zamora I., Pérez J.C. Thermal performance of back-up current-limiting fuses. *Electric Power Systems Research*, 2010, vol. 80, no. 12, pp. 1469-1476. doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2010.06.010>.

19. *Thermal relay. Alotek Technology*. Available at: [https://alotek.international/components/termorele\\_vid\\_alotek\\_technology](https://alotek.international/components/termorele_vid_alotek_technology) (Accessed 20 May 2025).

#### REFERENCES

1. Grechko O., Baida Y., Sereda O., Sereda O., Pantelyat M., Dryvetskiy S. Improvement of Fuses to Increase the Efficiency of Medium Voltage Instrument Transformers Protection. *2025 IEEE 6th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, 2025, pp. 1-4. doi: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek61436.2025.11288696>.
2. Kozyrskiy V., Gay O., Synyavskiy O., Savchenko V., Makarevych S. Optimization of sectionalisation parameters of distributive electric networks. *Handbook of Research on Smart Computing for Renewable Energy and Agro-Engineering*, 2020, pp. 78-105. doi: <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-1216-6.ch004>.
3. Kozyrskiy V., Kaplun V., Firstov G., Likhachov O. *Monograph. Electrical equipment based on functional materials*. Kyiv, NUBIP Publ., 2014. 409 p. (Ukr).
4. Sharma N., Jangra K., Raj T. Applications of Nickel-Titanium Alloy. *Journal of Engineering and Technology*, 2015, vol. 5, no. 1, pp. 1-7. doi: <https://doi.org/10.4103/0976-8580.149472>.
5. Bublely I.R., Koval Y.N., Likhachev A.A., Sych T.G., Zatsarnaya A.V. Investigation at Aging of Functional Properties of Alloy of Cu-Al-Mn System Alloyed with Co. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*, 2021, vol. 43, no. 12, pp. 1627-1637. doi: <https://doi.org/10.15407/mfint.43.12.1627>.
6. Sun S., Yu J., Chang Y., Zheng Y., Wang C. Effect of Al content and quenching on the microstructure and mechanical properties of as-cast Cu-Al-Mn shape memory alloy. *Materials Chemistry and Physics*, 2025, vol. 345, art. no. 131282. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2025.131282>.
7. CAMITAL brand registration certificate no. 163545. Available at: <https://alotek.international/uploads/230/1jgmO5anW3WCOVP22n2bZsx7RSeMc9-metaQ2FtaXRhbCDQodCy0LjQtNC10YLOtdC70YHRgtCy0L4r0LfQsCvRgNC10LPQuNGB0YLRgNCw0YbQuNGPLnBkZg==.pdf> (Accessed 20 May 2025).
8. Theren B., Schmelter T., Chromik P., Kuhlenkötter B. Investigations Regarding the Longterm Behaviour of Electrically Heated SMA Wires Using Alternating Current. *Proceedings of ASME 2021 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems, SMASIS 2021*, art. no. V001T06A003. doi: <https://doi.org/10.1115/SMASIS2021-67649>.
9. Panciroli R. Influence of electric current on the thermo-mechanical static and fatigue properties of shape memory NiTi wires. *Smart Materials and Structures*, 2020, vol. 29, no. 11, art. no. 115046. doi: <https://doi.org/10.1088/1361-665X/abb986>.
10. Kozyrskiy V., Bunko V. Experimental Studies of Elements from the Functional Intermetallic Cu-Al-Mn for Construction of a Heat Engine and Power Plant. *Problems of the Regional Energetics*, 2025, vol. 3, no. 67, pp. 162-173. doi: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2025.3-67.14>.

11. Bunko V.Ya., Kozyrskyi V.V. Research of elements with shape memory effect and determination of their thermo-mechanical characteristics at different hardening temperatures. *Collection of Scientific Papers of Admiral Makarov National University of Shipbuilding*, 2024, no. 1 (494), pp. 69-73. (Ukr).

12. Gorges T., Seelecke S., Motzki P. Alternating current activation of SMA wires. *GMM-Fachberichte*, 2021, vol. 2021-February, no. 98, pp. 149-151.

13. EATON. *High speed fuse application guide*. 2016. 44 p. Available at: <https://www.eaton.com/content/dam/eaton/products/electrical-circuit-protection/bussmann-iec-high-speed-semi-conductors-fuses/eaton-bussmann-series-high-speed-fuses-application-guide-br132015en-en-us.pdf> (Accessed 20 May 2025).

14. Kravets A.V., Kozyrskyi V.V. *Fuse*. Patent USSR no. 1707646, 1992, bulletin no. 3. 14 p. (Rus).

15. Chiriac G. Thermal analysis of fuses with variable cross-section fuselinks. *Electric Power Systems Research*, 2012, vol. 92, pp. 73-80. doi: <https://doi.org/10.1016/j.epr.2012.06.010>.

16. Todorov G., Kamberov K. EV fuse design cost reduction based on Thermal-Electric Conduction analyses. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2020, vol. 21, art. no. 100692. doi: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100692>.

17. Fernandez E., Torres E., Zamora I., Mazon A.J., Albizu I. Thermal model for current limiting fuses installed in vertical position. *Electric Power Systems Research*, 2014, vol. 107, pp. 167-174. doi: <https://doi.org/10.1016/j.epr.2013.10.004>.

18. Torres E., Mazón A.J., Fernández E., Zamora I., Pérez J.C. Thermal performance of back-up current-limiting fuses. *Electric Power Systems Research*, 2010, vol. 80, no. 12, pp. 1469-1476. doi: <https://doi.org/10.1016/j.epr.2010.06.010>.

19. *Thermal relay*. Alotek Technology. Available at: [https://alotek.international/components/termorele\\_vid\\_alotek\\_tech\\_nology](https://alotek.international/components/termorele_vid_alotek_tech_nology) (Accessed 20 May 2025).

Надійшла (Received) 17.10.2025

Прийнята (Accepted) 30.11.2025

Опублікована (Published) 02.03.2026

Козирський Володимир Вікторович<sup>1</sup>, д.т.н., проф.,

Нурек Томаш<sup>2</sup>, доктор наук, проф.,

Слома Яцек<sup>2</sup>, PhD,

Бунько Василь Ярославович<sup>3</sup>, к.т.н., доц.,

Гончарук Максим Віталійович<sup>4</sup>, магістрант,

<sup>1</sup>ALOTEK Technology sp.z.o.o.,

Zadabrowie 311, Krakowska 11, 37-716, Orly, Poland.

<sup>2</sup>Department of Biosystem Engineering,

Institute of Mechanical Engineering,

Warsaw University of Life Sciences,

Nowoursynowska 166, 02-787, Warsaw, Poland.

<sup>3</sup>Відокремлений підрозділ Національного університету

біоресурсів та природокористування України

«Бережанський агротехнічний інститут»,

47501, Тернопільська обл., м. Бережани, вул. Академічна, 20,

e-mail: vbunko@gmail.com (Corresponding Author)

<sup>4</sup>Національний університет біоресурсів

та природокористування України,

03041, Київ, вул. Героїв Оборони, 15.

*How to cite this article:*

Kozyrskyi V.V., Nurek T., Sloma J., Bunko V.Ya., Goncharuk M.V. The use of shape memory alloys in fuses for the protection of electrical installations. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2026, no. 2, pp. 3-9. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2026.2.01>

V.V. Kozyrskyi<sup>1</sup>, Doctor of Technical Science, Professor,

T. Nurek<sup>2</sup>, Full Professor,

J. Sloma<sup>2</sup>, PhD,

V.Ya. Bunko<sup>3</sup>, PhD, Associate Professor,

M.V. Goncharuk<sup>4</sup>, Master Student,

<sup>1</sup>ALOTEK Technology sp.z.o.o.,

Zadabrowie 311, Krakowska 11, 37-716, Orly, Poland.

<sup>2</sup>Department of Biosystem Engineering,

Institute of Mechanical Engineering,

Warsaw University of Life Sciences,

Nowoursynowska 166, 02-787, Warsaw, Poland.

<sup>3</sup>Separated Subdivision of National University

of Life and Environmental Sciences of Ukraine

«Berezhany Agrotechnical Institute»,

20, Akademichna Str., Berezhany, Ternopil region, Ukraine, 47501.

<sup>4</sup>National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine,

15, Heroyiv Oborony Str., Kyiv, Ukraine, 03041.

**The use of shape memory alloys in fuses for the protection of electrical installations.**

**Problem.** The degree of damage to electrical installations during short circuits depends on the response time of the protection. An

effective way to enhance the current-limiting effect in electrical fuses (reducing their response time) may be the use of shape memory alloy (SMA) elements. However, this requires careful study and research.

The **goal** of the work is to establish the patterns of strengthening the current-limiting effect of a fuse (reducing the response time) when using thermosensitive elements made of shape memory alloys. The

achievement of this goal is based on the analysis of experimental studies conducted by the authors and mathematical models of the characteristics of a fuse containing an SMA element. **Methodology.**

The article presents mathematical modelling of the parameters and characteristics of fuses with thermomechanical destruction of the fuse element, as well as a thermophysical model of a fuse with a

thermosensitive SMA element. The article presents the **results** of experimental studies of a traditional fuse and a fuse equipped with a

thermosensitive SMA element. For each current, the response time of the modified fuse was shorter than that of the traditional fuse. The

use of a thermosensitive element reduced the response time by more than 20 times for a current of 10 A and approximately 10 times (from

0.257 s to 0.0244 s) for a current of 20 A. For the highest tested current (90 A), the fuse response time was half that of a traditional fuse.

The article also presents the results of calculations of fuse characteristics using a mathematical model and a comparison with the results of experimental studies. **Scientific novelty.** The developed mathematical models of the characteristics of electrical fuses containing

SMA elements made it possible for the first time to substantiate the interrelationships between the parameters (geometric dimensions and characteristics of SMA elements, fuse links) with current loads of

electrical installations. The **practical value** of the work lies in the proposed use of thermosensitive elements made of functional materials to increase the current-limiting effect of electrical fuses for

protecting electrical installations during short circuits. References 19, tables 2, figures 7.

**Key words:** functional materials, fuse, shape memory alloy, thermosensitive element.