

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

ПОГОДЖЕНО
**Директор ІНІ енергетики,
автоматики і енергозбереження**

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ
**Завідувач кафедри
інженерії енергосистем**

_____/Каплун В.В./
(підпис)

« ____ » _____ 2026 р.

_____/Антипов Є.О./
(підпис)

« ____ » _____ 2026 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Дослідження надійності електропостачання з використанням струмообмежуючого ефекту топких запобіжників на основі сплавів з пам'яттю»

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(код і назва)

Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(назва)

Орієнтація освітньої програми: Освітньо-наукова
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Гарант освітньої програми

К.Т.Н., доцент
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Троханяк В. І.
(ПІБ)

**Керівник магістерської
кваліфікаційної роботи**

К.Т.Н., доцент
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Макаревич С.С.
(ПІБ)

Виконав

(підпис)

Гончарук М.В.
(ПІБ)

КИЇВ – 2026

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ІННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
інженерії енергосистем
к.т.н доцент Антипов Є.О.
(ступінь, звання) (підпис) (ПІБ)
«___» _____ 2024 р.

**ЗАВДАННЯ
ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ЗДОБУВАЧУ**

Гончаруку Максиму Віталійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(код і назва)
Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(назва)
Орієнтація освітньої програми освітньо-наукова
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Тема магістерської роботи «Дослідження надійності електропостачання з використанням струмообмежуючого ефекту топких запобіжників на основі сплавів з пам'яттю» затверджена наказом ректора Національного університету біоресурсів і природокористування України від 18.11.2024 р. № 2058 «С».

Термін подання завершеної роботи на кафедру 22.05.2026р
(рік, місяць, число)

Вихідні дані до магістерської роботи: наукові статті та публікації у фахових виданнях; результати бакалаврської кваліфікаційної роботи (НУБіП України, 2024); дані експериментальних досліджень на стенді для випробування запобіжників.

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

Режими роботи електроустановок та захист від аварійних режимів; 2. Математичне моделювання характеристик запобіжників; 3. Експериментальні дослідження елементів SAMITAL та запобіжників; 4. Методика проектування запобіжників з елементами SAMITAL; 5. Техніко-економічне обґрунтування; 6. Охорона праці при проведенні досліджень. графічного матеріалу: презентація виконана в програмному середовищі MS Power Point; постер A1; рисунки 1.1–5.1

Дата видачі завдання «18» листопада 2024 р.

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи	_____	<u>Макаревич С.С.</u>
	(підпис)	(ПІБ)
Завдання прийняв до виконання	_____	<u>Гончарук М.В.</u>
	(підпис)	(ПІБ)

РЕФЕРАТ

Магістерська кваліфікаційна робота присвячена дослідженню надійності електропостачання з використанням струмообмежуючого ефекту топких запобіжників на основі сплавів з пам'яттю форми — функціонального сплаву $\text{Cu}_{83}\%-\text{Al}_{12}\%-\text{Mn}_{5}\%$ (торгова марка CAMITAL).

Робота містить вступ, шість розділів, загальні висновки та список використаних джерел. Загальний обсяг становить понад 65 сторінок основного тексту. У роботі представлено 9 рисунків та 14 таблиць. Список використаних джерел налічує 21 найменування, з них 11 іноземними мовами.

Перший розділ присвячено аналізу аварійних режимів роботи електроустановок та систематизації сучасних принципів їх захисту. Розглянуто класифікацію засобів струмового захисту, фізичні основи ефекту пам'яті форми та порівняльну характеристику промислових SMA-сплавів. Обґрунтовано вибір сплаву CAMITAL як найбільш придатного для застосування в електричних запобіжниках за критеріями термомеханічної напруги, теплопровідності та вартості.

У другому розділі розроблено повну систему математичних моделей запобіжника з SMA-елементом, що включає теплофізичну модель нестационарного нагрівання, поліноміальну апроксимацію залежності температури CAMITAL від теплового імпульсу та модель термомеханічних характеристик. Вперше отримано аналітичні вирази для ампер-секундної характеристики запобіжника зі стрічковим та пружинним SMA-елементом (формули 2.28 та 2.29).

Третій розділ містить результати комплексних експериментальних досліджень елементів із сплаву CAMITAL та запобіжників з примусовим термомеханічним руйнуванням плавкої вставки. Описано конструкцію та метрологічні характеристики випробувального стенду з тензорезисторним вимірюванням зусилля. Встановлено, що застосування SMA-елемента скорочує час спрацьовування більш ніж у 20 разів при струмі 10 А та в 10 разів при 20 А.

Середня похибка математичної моделі відносно експериментальних даних не перевищує 5%.

Четвертий розділ присвячено розробці покрокової методики інженерного проєктування запобіжників з елементами CAMITAL для розподільних мереж 0,4 кВ. Наведено систему розрахункових рівнянь для вибору геометрії SMA-елемента, параметрів плавкої вставки та перевірки вибірковості захисту. Сформовано зведену таблицю рекомендованих конструктивних параметрів для стандартного ряду номінальних струмів $I_n = 4\text{--}63\text{ А}$.

У п'ятому розділі виконано техніко-економічне обґрунтування застосування запобіжників з елементами CAMITAL. Проведено порівняльний аналіз конкурентних рішень (традиційний запобіжник, автоматичний вимикач, нітінолові аналоги). Розраховано річну економію від впровадження на об'єкті — розподільному щиті 0,4 кВ з 20 лініями: $E_{r\phi k} \approx 471\,560$ грн/рік. Термін окупності у базовому сценарії становить приблизно 1 добу.

Шостий розділ присвячено охороні праці при проведенні експериментальних досліджень на стенді для випробування запобіжників. Ідентифіковано небезпечні та шкідливі виробничі фактори, розроблено вимоги до електробезпеки та засобів індивідуального захисту. Виконано розрахунок захисного заземлення лабораторного стенду: результуючий опір $R_{rp} = 1,83\text{ Ом}$ при нормі $R_n = 4,0\text{ Ом}$ (ПУЕ).

Ключові слова: CAMITAL, Cu-Al-Mn, сплав з пам'яттю форми, топкий запобіжник, струмообмежуючий ефект, ампер-секундна характеристика, мартенситне перетворення, надійність електропостачання, термомеханічне руйнування плавкої вставки, математична модель.

ЗМІСТ

ЗМІСТ	5
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	9
ВСТУП	10
РОЗДІЛ 1. РЕЖИМИ РОБОТИ ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК ТА СУЧАСНІ ПРИНЦИПИ ЇХ ЗАХИСТУ ВІД АВАРІЙНИХ РЕЖИМІВ	14
1.1. Класифікація аварійних режимів роботи електроустановок та критерії їх небезпечності	14
1.1.1.Режим перевантаження.....	15
1.1.2.Режим короткого замикання	15
1.2. Принципи захисту електроустановок: класифікація та порівняльний аналіз.....	15
1.2.Властивості SMA-сплавів: фізичні основи та класифікація	17
1.3.1. Мартенситне перетворення як фізична основа ефекту пам'яті форми	17
1.3.2. Порівняльна характеристика промислових систем SMA-сплавів	18
1.4. Функціональний сплав SAMITAL: характеристика та особливості виробництва	19
1.5. Аналіз відомих технічних рішень із застосування SMA у пристроях захисту	20
Висновки до розділу 1.	21
РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ І ХАРАКТЕРИСТИК ЗАПОБІЖНИКІВ З ТЕРМОМЕХАНІЧНИМ РУЙНУВАННЯМ ПЛАВКОЇ ВСТАВКИ.....	22
2.1. Струмообмежувальний ефект у плавких запобіжниках: механізми реалізації та обмеження традиційних підходів	22
2.2. Підвищення струмообмежувального ефекту запобіжників на основі сплавів з пам'яттю форми.....	23
2.3. Теплофізична модель запобіжника з термочутливим SMA-елементом...	24
2.3.1. Основні припущення та рівняння теплового балансу	24
2.3.2. Розв'язок рівняння теплового балансу для стаціонарного та нестаціонарного режимів	25
2.3.3. Часово-струмова характеристика запобіжника у нестаціонарному режимі.....	26
2.4. Математична модель термомеханічних характеристик термочутливого елемента SMA.....	27

2.4.1. Узгодження термомеханічних та механічних характеристик міцності	27
2.4.2. Моделювання термомеханічних характеристик SMA-елемента	27
2.5. Модель нагрівання SMA-елемента при струмі короткого замикання.....	28
2.5.1. Тепловий імпульс та базова залежність температура–струм	28
2.5.2. Узагальнене рівняння та спрощена залежність	29
2.6. Ампер-секундна характеристика запобіжника з SMA-елементом	29
2.6.1. АСХ для стрічкового SMA-елемента.....	29
2.6.2. АСХ для SMA-елемента у вигляді намотаної пружини	30
2.7. Приклад розрахунку характеристик запобіжника за математичною моделлю.....	30
Висновки до розділу 2.	34
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ІЗ СПЛАВУ SAMITAL ТА ЗАПОБІЖНИКІВ З ПРИМУСОВИМ РУЙНУВАННЯМ ПЛАВКОЇ ВСТАВКИ.....	35
3.1. Методологія та програма експериментальних досліджень	35
3.2. Дослідження термомеханічних характеристик елементів SAMITAL при імпульсному електричному нагріванні.....	36
3.2.1. Дослідження стрічкових елементів зі сплаву Cu-Al-Mn.....	36
3.2.2. Дослідження залежності зусилля від густини струму	37
3.3. Конструкція та метрологічні характеристики випробувального стенду .	38
3.3.1. Метрологічні характеристики стенду	39
3.4. Порівняльні дослідження традиційного запобіжника та запобіжника з SMA-елементом.....	40
3.4.1. Умови проведення дослідів та опис зразків	40
3.4.2. Аналіз ампер-секундних характеристик.....	41
3.5. Дослідження динаміки розтягувального зусилля в плавкій вставці.....	43
3.6. Аналіз отриманих результатів та оцінка точності математичних моделей	45
Висновки до розділу 3.	46
РОЗДІЛ 4. МЕТОДИКА ІНЖЕНЕРНОГО ПРОЄКТУВАННЯ ЗАПОБІЖНИКІВ З ЕЛЕМЕНТАМИ З ФУНКЦІОНАЛЬНОГО СПЛАВУ SAMITAL	47
4.1. Загальні принципи проєктування та вихідні дані.....	47
4.2. Методика вибору геометричних параметрів термочутливого елемента..	48
4.2.1. Стрічковий SMA-елемент	48
4.2.2. Пружинний SMA-елемент.....	48

4.2.3. Вибір температур перетворення A_S та A_F	49
4.3. Методика розрахунку параметрів плавкої вставки	49
4.4. Перевірка вибіркової та узгодження з суміжними апаратами захисту.	50
4.5. Зведена методика: вісім кроків проєктування	50
4.6. Приклад проєктування запобіжника $I_N = 16$ А для мережі 0,4 кВ	51
4.6.1. Визначення параметрів плавкої вставки.....	51
4.6.2. Параметри SMA-елемента.....	51
4.6.3. Перевірка за тепловим імпульсом	51
4.7. Аналіз чутливості АСХ до варіацій конструктивних параметрів.....	52
4.8. Зведена таблиця рекомендованих параметрів для стандартного ряду $I_N =$ 4–63	53
Висновки до розділу 4.	54
РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАСТОСУВАННЯ ЗАПОБІЖНИКІВ З ЕЛЕМЕНТАМИ НА ОСНОВІ СПЛАВУ SAMITAL	55
5.1. Порівняльний аналіз конкурентних технічних рішень у сфері захисту електроустановок від струмів КЗ	55
5.2. Мета та структура техніко-економічного обґрунтування.....	57
5.3. Порівняльний аналіз вартості апаратів захисту	58
5.4. Оцінка збитків від ушкодження електрообладнання при запізнілому відключенні КЗ	59
5.5. Розрахунок річної економії та терміну окупності	60
5.6. Аналіз чутливості економічних показників	62
5.7. Оцінка екологічної складової та відповідність принципам сталого розвитку.....	63
Висновки до розділу 5.	64
РОЗДІЛ 6. ОХОРОНА ПРАЦІ ПРИ ПРОВЕДЕННІ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ НА СТЕНДІ ДЛЯ ВИПРОБУВАННЯ ЗАПОБІЖНИКІВ	65
6.1. Характеристика умов праці та ідентифікація небезпечних і шкідливих виробничих факторів	65
6.2. Вимоги безпеки при роботі зі стендом для випробування запобіжників	66
6.2.1. Електробезпека.....	66
6.2.2. Вимоги до засобів індивідуального захисту	67
6.2.3. Організація робочого місця.....	67
6.3. Розрахунок захисного заземлення лабораторного стенду	68
6.4. Пожежна безпека лабораторії	70
6.5. Інструктажі та допуск до роботи зі стендом	71

	8
Висновки до розділу 6.	72
ВИСНОВКИ.....	73
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	75

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- АСХ — ампер-секундна характеристика;
- АВР — автоматичне введення резерву;
- САМІТАL — функціональний сплав $\text{Cu}_{83}\text{Al}_{12}\text{Mn}_5$ з ефектом пам'яті форми (торгова марка);
- ГДК — гранично допустима концентрація;
- ДСТУ — Державний стандарт України;
- ЕПФ — ефект пам'яті форми;
- КЗ — коротке замикання;
- МЕК — Міжнародна електротехнічна комісія (IEC);
- НАПБ — нормативний акт з пожежної безпеки;
- НПАОП — нормативно-правовий акт з охорони праці;
- ПУЕ — Правила улаштування електроустановок;
- SMA — сплав з ефектом пам'яті форми (shape memory alloy);
- ТЕО — техніко-економічне обґрунтування;
- ЧСХ — часово-струмова характеристика;
- ЗІЗ — засоби індивідуального захисту.

ВСТУП

Стрімкий розвиток сучасної електроенергетики супроводжується безперервним підвищенням вимог до надійності, швидкодії та вибіркової засобів релейного захисту й автоматики. В умовах зростання щільності встановленої потужності генеруючих і споживаючих об'єктів, а також підвищення ступеня автоматизації управління режимами електричних мереж, питання мінімізації часу ліквідації аварійних режимів набуває особливої технічної та економічної актуальності. Ступінь термічного та електродинамічного пошкодження електроустановок при короткому замиканні (КЗ) визначається інтегральним тепловим імпульсом $W = \int_0^t i^2(\tau) d\tau$, а отже, навіть незначне скорочення часу спрацьовування захисту $t_{\text{відкл}}$ призводить до суттєвого зниження рівня допустимих пошкоджень.

Серед засобів захисту від струмів КЗ особливе місце займають плавкі запобіжники з ефектом струмообмеження. На відміну від автоматичних вимикачів, вони здатні обмежувати миттєве значення струму КЗ ще до досягнення ним амплітудного значення, тим самим принципово зменшуючи теплову та динамічну дію на захищуване обладнання. Проте подальше підвищення струмообмежувального ефекту традиційними конструктивними методами — оптимізацією геометрії плавкої вставки, складом кварцового наповнювача, легуванням матеріалів — наближається до своєї фізичної межі.

Перспективним напрямом подолання цієї межі є застосування функціональних матеріалів з ефектом пам'яті форми (SMA — shape memory alloy), зокрема сплаву на мідній основі $\text{Cu}_{83}\text{Al}_{12}\text{Mn}_5$ (торгова марка CAMITAL). Унікальна здатність цих матеріалів до термомеханічного перетворення — генерування значних реактивну термомеханічну напругу (до 500 МПа) при нагріванні безпосередньо протікаючим струмом — відкриває принципово новий механізм ініціювання руйнування плавкої вставки: примусове механічне розтягування, яке передуює та значно прискорює термічне плавлення.

Актуальність дослідження обумовлена такими чинниками: відсутністю систематизованих математичних моделей, що пов'язують геометричні параметри SMA-елементів з часово-струмовими характеристиками (ЧСХ) запобіжника; недостатньою вивченістю термомеханічних процесів у сплаві SAMITAL при імпульсному нагріванні струмом КЗ; практичною відсутністю техніко-економічних обґрунтувань для промислового впровадження такого класу запобіжників.

Надійність електропостачання промислових та сільськогосподарських підприємств безпосередньо визначається ефективністю засобів захисту від аварійних режимів. Підвищення швидкодії топких запобіжників — що є центральним завданням даної кваліфікаційної роботи — скорочує тривалість аварійних відключень, зменшує частоту та глибину провалів напруги і, як наслідок, підвищує показники надійності електропостачання: середній час відновлення $T_{в\text{та}}$ та питому частоту відмов $\omega_{в\text{за}}$ методологією МЕК 60050-191.

Зв'язок роботи з науковими програмами. Дослідження виконано на кафедрі інженерії енергосистем Національного університету біоресурсів і природокористування України (НУБіП України) в рамках наукового напрямку кафедри щодо застосування функціональних матеріалів в електроенергетичних системах.

Мета роботи — встановлення закономірностей підвищення струмообмежувального ефекту плавких запобіжників шляхом застосування термочутливих елементів із функціонального сплаву SAMITAL та розроблення математичних моделей для інженерного проєктування таких пристроїв.

Для досягнення поставленої мети вирішуються такі завдання:

1. Провести критичний аналіз сучасного стану теорії та практики застосування засобів струмового захисту електроустановок, включаючи запобіжники з SMA-елементами.
2. Побудувати та верифікувати теплофізичну математичну модель нестационарного нагрівання термочутливого SMA-елемента при протіканні струму КЗ.

3. Розробити математичну модель термомеханічних характеристик елементів із сплаву CAMITAL та отримати аналітичний вираз для ампер-секундної характеристики (АСХ) модифікованого запобіжника.

4. Провести комплексні експериментальні дослідження на спеціалізованому стенді для верифікації розроблених математичних моделей.

5. Розробити техніко-економічне обґрунтування застосування запобіжників з елементами CAMITAL для захисту електроустановок.

Об'єктом дослідження є процеси електромагнітного, теплового та термомеханічного перетворення енергії в плавкому запобіжнику, оснащеному термочутливим елементом із функціонального сплаву з пам'яттю форми.

Предметом дослідження є закономірності формування струмообмежувального ефекту та часово-струмові характеристики запобіжника з елементом CAMITAL залежно від геометричних і матеріальних параметрів конструкції.

Наукова новизна одержаних результатів

1. Вперше розроблено та верифіковано систему математичних моделей характеристик запобіжників, що містять елементи SMA зі сплаву CAMITAL (Cu-Al-Mn), яка дозволяє аналітично встановити взаємозв'язки між геометричними розмірами та фізичними характеристиками термочутливих елементів, параметрами плавких вставок і струмовими навантаженнями електроустановок, що підтверджено публікацією у фаховому виданні [Козирський та ін., 2026].

2. Набуло подальшого розвитку теплофізичне моделювання нестационарного нагрівання термочутливих елементів: отримано узагальнений поліноміальний вираз залежності температури від теплового імпульсу струму КЗ для сплаву CAMITAL з похибкою, що не перевищує 1%.

3. Вперше отримано аналітичний вираз для ампер-секундної характеристики запобіжника з SMA-елементом у вигляді намотаної циліндричної пружини, що враховує конструктивні параметри: діаметр дроту d_{te} , діаметр пружини D_{te} , відносну деформацію ϵ та довжину L_{te} .

Практичне значення одержаних результатів: розроблені математичні моделі та методика розрахунку параметрів запобіжників з елементами SAMITAL можуть бути безпосередньо використані в інженерній практиці при проєктуванні засобів захисту електроустановок агропромислового комплексу, розподільних мереж 0,4 кВ, а також трансформаторних підстанцій з автоматичним вводом резерву (АВР). Встановлено, що застосування термочутливого елемента скорочує час спрацьовування запобіжника в 10–20 разів при малих кратностях струму КЗ — в діапазоні $(1,5-3) \cdot I_N$, де традиційні запобіжники мають найгіршу характеристику. Результати роботи впроваджено в навчальний процес кафедри інженерії енергосистем НУБіП України.

Основні положення та результати кваліфікаційної роботи оприлюднено у статті: Козирський В.В., Нурек Т., Слома Я., Бунько В.Я., Гончарук М.В. Використання сплавів з пам'яттю форми у запобіжниках для захисту електричних установок. *Електротехніка і Електромеханіка*, 2026, № 2, с. 3–9. DOI: 10.20998/2074-272X.2026.2.01. (Видання входить до переліку фахових видань України категорії «А» та індексується у міжнародних наукометричних базах Scopus і Web of Science.)

РОЗДІЛ 1

РЕЖИМИ РОБОТИ ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК ТА СУЧАСНІ ПРИНЦИПИ ЇХ
ЗАХИСТУ ВІД АВАРІЙНИХ РЕЖИМІВ**1.1. Класифікація аварійних режимів роботи електроустановок та критерії їх небезпечності**

Електроустановка у процесі експлуатації функціонує у трьох принципово різних режимах: номінальному, при якому всі параметри (струм, напруга, температура) перебувають у межах паспортних значень; режимі перевантаження, що характеризується підвищенням струму понад номінальне значення I_N при збереженні цілісності кола; та режимі короткого замикання (КЗ), при якому відбувається металевий або дуговий контакт між провідниками різних потенціалів.

З точки зору тепловиділення, рівень небезпечності аварійного режиму кількісно визначається тепловим імпульсом $W(t)$ — інтегральною характеристикою квадрату струму за часом:

$$W(t) = \int_0^t i^2(\tau) d\tau, [A^2 \cdot c] \quad (1.1)$$

При металевому КЗ в системі з синусоїдальним струмом та аперіодичною складовою тепловий імпульс набуває вигляду:

$$W(t) = \int_0^t [I_{pm} \cdot \sin(\omega\tau) + I_{am} \cdot e^{-(\tau/T_a)}]^2 d\tau, \quad (1.2)$$

де I_{pm} — амплітуда симетричної складової струму КЗ, А; I_{am} — початкове значення аперіодичної складової, А; T_a — стала часу спаду аперіодичної складової, с; $\omega = 2\pi f$ — кутова частота мережі, рад/с.

Теплова дія струму КЗ спричиняє деградацію ізоляції провідників відповідно до правила Монтсінгера (емпіричне правило 10 градусів): термін служби ізоляції скорочується вдвічі при підвищенні робочої температури на кожні 10°C. Таким чином, ключовим критерієм ефективності засобу захисту є мінімізація теплового імпульсу $W(t_{відкл})$, а це прямо пов'язано зі скороченням часу відключення $t_{відкл}$.

1.1.1. Режим перевантаження

Перевантаження виникає при підключенні навантаження, що перевищує номінальну потужність мережі або обладнання. Характерним є повільний процес наростання температури — від секунд до десятків хвилин залежно від кратності перевантаження $k = I / I_N$. У діапазоні $k \in (1,0; 1,5)$ традиційні плавкі запобіжники виявляють незадовільну чутливість, що є однією з мотивацій для розробки модифікованих конструкцій.

1.1.2. Режим короткого замикання

Коротке замикання є найнебезпечнішим аварійним режимом. За місцем виникнення розрізняють: трифазне (симетричне) КЗ з найбільшим значенням струму; двофазне (несиметричне); однофазне замикання на землю. У розподільних мережах напругою 0,4 кВ найбільш поширеним є однофазне КЗ. Значення струму КЗ на шинах підстанції визначається виразом:

$$I_{\text{КЗ}}^{(3)} = U_{\text{ф}} / \sqrt{(Z_{\text{трансф}}^2 + Z_{\text{лінії}}^2)}, \quad (1.3)$$

де $U_{\text{ф}}$ — фазна напруга; $Z_{\text{трансф}}$, $Z_{\text{лінії}}$ — повні опори трансформатора та лінії відповідно.

1.2. Принципи захисту електроустановок: класифікація та порівняльний аналіз

Засоби захисту електроустановок від аварійних режимів систематизуються за кількома ознаками: принципом дії, кратністю застосування, швидкодією та конструктивним виконанням. У таблиці 1.1 наведено порівняльну характеристику основних класів захисних апаратів.

Порівняльна характеристика засобів захисту електроустановок

№	Тип захисного апарату	Принцип дії	Час спрацьовування, с	Кратність
1	Плавкий запобіжник (традиційний)	Термічне плавлення вставки	$10^{-3} - 10^0$	Одноразовий
2	Автоматичний вимикач	Електромагн./тепловий розчіплювач	$10^{-2} - 10^{-1}$	Багаторазовий
3	Запобіжник з елементом SMA	Термомеханічне руйнування вставки	$10^{-4} - 10^{-1}$	Одноразовий*
4	Струмообмежуючий реактор	Збільшення опору кола	Пасивний	Безперервний
5	Напівпровідниковий обмежувач	Вентильний ефект	$10^{-6} - 10^{-4}$	Багаторазовий

* У конструкціях з автоматичним відновленням — багаторазовий.

Особливу роль у сучасних системах захисту відіграють плавкі запобіжники з ефектом струмообмеження. Їх принципова перевага полягає у здатності відключати ланцюг ще до досягнення струмом свого першого максимуму, обмежуючи пропущений тепловий імпульс. Кількісно струмообмежувальний ефект характеризується коефіцієнтом обмеження:

$$K_{огр} = I_{пр} / I_{КЗ,ампл} < 1, \quad (1.4)$$

де $I_{пр}$ — пропущений піковий струм; $I_{КЗ,ампл}$ — амплітуда очікуваного (необмеженого) струму КЗ. Для стандартних запобіжників класу gG (МЕК 60269-1) коефіцієнт $K_{огр}$ знаходиться в межах 0,3–0,7. Запропоноване в даній роботі технічне рішення дозволяє потенційно знизити $K_{огр}$ до 0,1–0,2 у зоні малих кратностей КЗ.

1.2. Властивості SMA-сплавів: фізичні основи та класифікація

1.3.1. Мартенситне перетворення як фізична основа ефекту пам'яті форми

Фізичний механізм ефекту пам'яті форми реалізується через оборотне термopужне мартенситне перетворення кристалічної ґратки, яке принципово відрізняється від класичних дифузійних переходів відсутністю масоперенесення між фазами та кооперативним характером зміщення атомів. Ключовою особливістю є повна оборотність структурної перебудови: матеріал зберігає "пам'ять" про форму аустенітної фази і точно відтворює її при кожному термоциклі. Діапазон перетворення для конкретного складу сплаву задається чотирма критичними точками:

M_S — температура початку мартенситного перетворення при охолодженні, °C;

M_F — температура завершення мартенситного перетворення при охолодженні, °C;

A_S — температура початку зворотного (аустенітного) перетворення при нагріванні, °C;

A_F — температура завершення зворотного перетворення при нагріванні, °C.

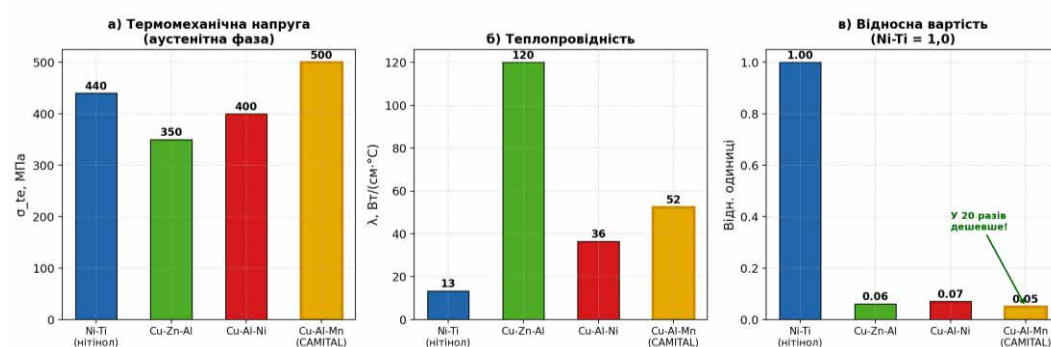


Рис. 1.1. Порівняльна характеристика промислових SMA-сплавів за трьома ключовими критеріями: а) термомеханічна напруга; б) теплопровідність; в) відносна вартість (Ni-Ti = 1,0)

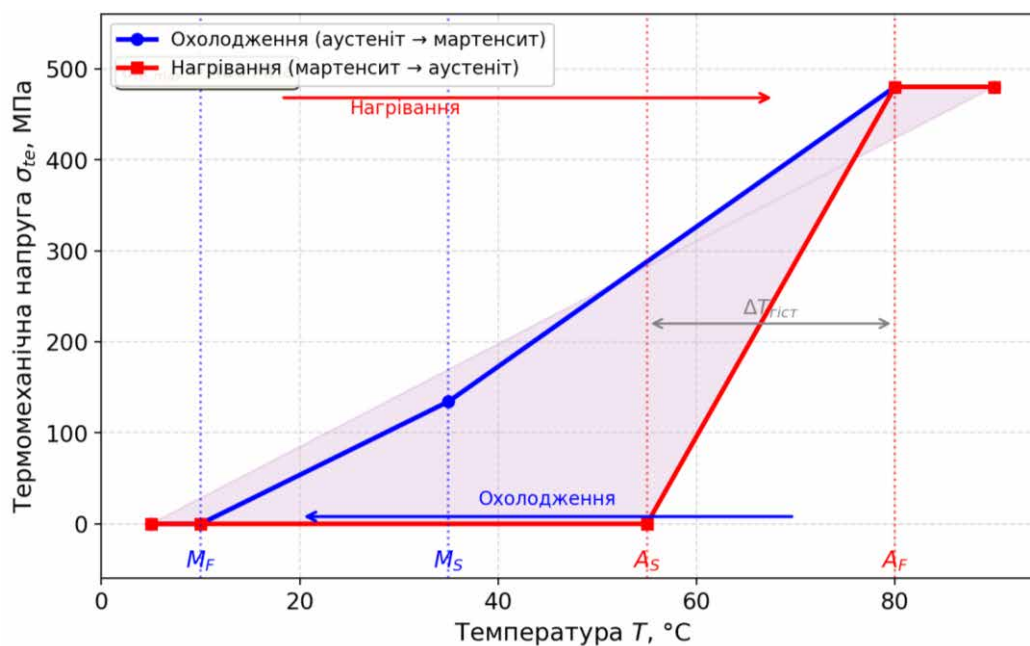


Рис.1.2. Гістерезисна петля сплаву CAMITAL ($\text{Cu}_{83}\text{Al}_{12}\text{Mn}_5$): залежність термомеханічної напруги від температури при циклічному нагріванні та охолодженні

Умовою існування термопружного мартенситу є виконання нерівності $M_S < A_S$, що визначає наявність температурного гістерезису $\Delta T = A_S - M_S > 0$. При нагріванні деформованого SMA-елемента від температури нижче M_F до температури вище A_F відбувається зворотне мартенситне перетворення, яке супроводжується відновленням первісної геометричної форми та генеруванням реактивної термомеханічної напруги σ_{te} , що може досягати 200–500 МПа.

1.3.2. Порівняльна характеристика промислових систем SMA-сплавів

На сьогодні промислового застосування набули дві основні системи SMA-сплавів: Ni-Ti (нітінол) і мідні сплави (Cu-Zn-Al, Cu-Al-Ni, Cu-Al-Mn). Порівняльна характеристика їх фізичних і функціональних властивостей наведена в таблиці 1.2.

Аналіз даних таблиці 1.2 свідчить про те, що сплав Cu-Al-Mn (CAMITAL) займає оптимальну позицію за сукупністю критеріїв для застосування в електричних запобіжниках: широкий діапазон температур перетворення, висока

теплопровідність (що важливо для швидкого прогрівання елемента), прийнятний рівень термомеханічної напруги та вартість, що у 20 разів нижча за нітінол при достатньому функціональному рівні.

Таблиця 1.2

Порівняльна характеристика промислових SMA-сплавів

№	Параметр	Одиниці	Ni-Ti	Cu-Zn-Al	Cu-Al-Ni	Cu-Al-Mn (CAMITAL)
1	Температура плавлення	°C	1300	950–1020	1000–1050	1000–1060
2	Питома маса	г/см³	6,45	7,64	7,12	7,05
3	Питомий електричний опір	мкОм·см	70–100	8,5–9,7	11–13	9–11
4	Теплопровідність	Вт/(см·°C)	8,5–18	120	30–43	45–60
5	Модуль Юнга (аустеніт/мартенсит)	ГПа	83 / 28–41	72 / 70	85 / 80	90 / 85
6	Термомех. напруга (ауст./март.)	МПа	195–690 / 70–140	350 / 80	400 / 130	500 / 200
7	Межа механічної міцності	МПа	895	600	500–800	600–800
8	Діапазон температур перетворення	°C	–200...+110	–120...+200	–120...+200	–120...+200
9	Макс. допустима деформація	%	8	4	4	3,2–4,2
10	Відносна вартість (Ni-Ti = 1,0)	—	1,0	~0,06	~0,07	~0,05

1.4. Функціональний сплав CAMITAL: характеристика та особливості виробництва

CAMITAL — функціональний інтерметалід складу $\text{Cu}_{83}\%\text{-Al}_{12}\%\text{-Mn}_5\%$, зареєстрований як торгова марка (свідоцтво № 163545, Патентне відомство Республіки Болгарія). Сплав поєднує властивості датчика температури та

виконавчого механізму в єдиному матеріальному елементі, що дозволяє класифікувати його як смарт-матеріал у термінах сучасного матеріалознавства.

При прямому нагріванні струмом елемент SAMITAL проходить три послідовні стадії термодинамічного перетворення. Перша стадія ($T < M_S$): матеріал перебуває у низькосиметричній мартенситній фазі з модулем пружності $E_M \approx 85$ ГПа. Деформована в мартенситній фазі кристалічна структура накопичує пружну енергію. Друга стадія ($A_S \leq T \leq A_F$): зворотне мартенситне перетворення супроводжується нелінійним зростанням реактивної термомеханічної напруги σ_{tc} від нуля до максимального значення. Третя стадія ($T > A_F$): перехід до повністю аустенітного стану фіксує термомеханічну напругу на рівні $\sigma_{tc,max} \approx 500$ МПа, достатньому для механічного руйнування плавкої вставки.

Для отримання відтворюваних характеристик плавку SAMITAL проводять у відкритих індукційних печах у графітових тиглях. Процес легування суворо регламентований: спочатку вводять 50–70% розрахункової кількості алюмінію, потім — марганець і залишок алюмінію. Точність витримування хімічного складу є критично важливою, оскільки відхилення у вмісті алюмінію навіть на 0,5% спричиняє зміщення температур A_S та A_F на 10–20°C.

1.5. Аналіз відомих технічних рішень із застосування SMA у пристроях захисту

Аналіз патентної та науково-технічної літератури свідчить про те, що перші спроби застосування SMA-елементів у захисній апаратурі відносяться до початку 1980-х років. Авторське свідоцтво СРСР № 1707646 (Кравець А.В., Козирський В.В., 1992) захищає принципово новий підхід: плавкий запобіжник з примусовим термомеханічним руйнуванням плавкого елемента за допомогою SMA-привода. Це рішення стало прообразом конструкції, дослідженої в даній кваліфікаційній роботі.

Зарубіжні дослідження зосереджені переважно на застосуванні нітінолових дротів у мікроелектромеханічних системах (MEMS) і медичних

пристроях. Роботи Theren et al. (2021) та Gorges et al. (2021) присвячені вивченню поведінки SMA-дротів при нагріванні змінним струмом промислової частоти 50 Гц, що безпосередньо стосується умов роботи в захисній апаратурі.

Принципова відмінність конструкції, дослідженої в [Козирський та ін., 2026] та в даній роботі, від усіх відомих аналогів полягає у використанні сплаву CAMITAL (Cu-Al-Mn) замість нітінолу, що забезпечує значне зниження собівартості при збереженні достатнього функціонального рівня, а також у систематичному аналітичному зв'язку між геометричними параметрами SMA-елемента та ампер-секундною характеристикою запобіжника.

Висновки до розділу 1

Проведений аналіз показав, що традиційні методи підвищення струмообмежувального ефекту плавких запобіжників наближаються до своїх фізичних меж. Застосування термочутливих елементів зі сплаву CAMITAL, що поєднує функції датчика і виконавчого механізму, є науково обґрунтованим і технічно перспективним напрямом. Особливої актуальності набуває розроблення адекватних математичних моделей, що враховують нелінійні термомеханічні характеристики CAMITAL при імпульсному нагріванні струмом КЗ.

РОЗДІЛ 2

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ І ХАРАКТЕРИСТИК ЗАПОБІЖНИКІВ З ТЕРМОМЕХАНІЧНИМ РУЙНУВАННЯМ ПЛАВКОЇ ВСТАВКИ

2.1. Струмообмежувальний ефект у плавких запобіжниках: механізми реалізації та обмеження традиційних підходів

Плавкий запобіжник як засіб струмового захисту функціонує на основі фізичного явища необоротного термічного руйнування провідного елемента — плавкої вставки — при перевищенні допустимого рівня струму. Сучасний стан розвитку теорії та практики конструювання запобіжників дозволяє виокремити п'ять основних технічних методів підвищення струмообмежувального ефекту.

Перший метод ґрунтується на явищі металургійного М-ефекту (ефект Меткалфа): нанесення на плавку вставку з більш тугоплавкого металу (срібло, мідь) краплі менш тугоплавкого металу (олово, свинець) дозволяє ефективно знизити температуру плавлення у точці контакту за рахунок дифузійного розчинення. Це скорочує час досягнення критичної температури при малих кратностях перевантаження.

Другий метод передбачає конструктивне зменшення поперечного перерізу плавкої вставки у певних точках (так звані «перетяжки»), що забезпечує локалізацію тепловиділення та прискорює плавлення у заданій зоні. Конфігурація вставки розраховується виходячи із закону Джоуля–Ленца при нерівномірному розподілі щільності струму.

Третій метод — застосування кварцового наповнювача — дозволяє суттєво прискорити гасіння електричної дуги після руйнування плавкої вставки. Висока теплопровідність кварцу ($\lambda \approx 6\text{--}8 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$) та розвинена поверхня контакту між частинками забезпечують ефективне відведення теплової енергії дуги.

Четвертий метод передбачає застосування матеріалів зі спеціальними електрофізичними властивостями — наприклад, нелінійних провідників,

питомий опір яких зростає з підвищенням температури за нелінійним законом, що призводить до самообмеження струму.

П'ятий, принципово новий метод, запропонований у даній роботі та досліджений у [Козирський та ін., 2026], полягає у застосуванні термочутливих елементів зі сплаву з пам'яттю форми (SMA). Цей підхід принципово відрізняється від попередніх тим, що руйнування плавкої вставки ініціюється не тільки термічним, а й механічним способом — шляхом прикладання розтягувальних зусиль від деформації SMA-елемента.

Функціонування запропонованого запобіжника [Козирський та ін., 2026] засноване на синергії двох механізмів руйнування. Електричний струм одночасно нагріває плавкий елемент і термочутливий SMA-елемент. У момент, коли температура SMA-елемента перевищує A_S , він починає генерувати реактивну термомеханічну напругу σ_{te} — рушійну силу відновлення форми. Оскільки зовнішня фіксація не дозволяє елементу вкоротитися, це зусилля передається на плавку вставку як розтягувальне навантаження. Коли σ_{te} досягає межі механічної міцності матеріалу вставки σ_{AD} , відбувається її крихке руйнування з утворенням розриву. Електрична дуга, що виникає в розриві, гаситься кварцовим наповнювачем значно швидше порівняно з традиційним процесом термічного плавлення вставки.

2.2. Підвищення струмообмежувального ефекту запобіжників на основі сплавів з пам'яттю форми

Відмінною особливістю запропонованої конструкції є поєднання двох механізмів руйнування плавкої вставки: термічного (традиційного) та механічного (нового). Механічне напруження, що виникає від SMA-елемента, може бути описане системою рівнянь, яка пов'язує температурний стан елемента з його термомеханічними характеристиками.

Як показано в розділі 1, при нагріванні SMA-елемента вище A_S відбувається зворотне мартенситне перетворення, що генерує реактивну напругу

σ_{te} в матеріалі. Якщо обидва кінці елемента жорстко зафіксовані (один — корпусом запобіжника, інший — через плавку вставку), то зусилля $\sigma_{te} \cdot (a \cdot b)$ повністю передається на плавку вставку як розтягувальне навантаження, здатне зруйнувати її до досягнення температури плавлення міді.

Результати, опубліковані у статті [Козирський та ін., 2026], підтверджують, що для струму 10 А застосування термочутливого елемента скорочує час реакції більш ніж у 20 разів (з 3,579 с до 0,2158 с), а для струму 20 А — приблизно в 10 разів (з 0,254 с до 0,0244 с). Для найбільшого з досліджених струмів (90 А) час спрацьовування запобіжника був удвічі меншим, ніж у традиційного. Ці результати наочно демонструють переваги запропонованого підходу у всьому діапазоні струмів перевантаження.

2.3. Теплофізична модель запобіжника з термочутливим SMA-елементом

2.3.1. Основні припущення та рівняння теплового балансу

Математична модель будується на системі фізично обґрунтованих спрощень, прийнятних для умов інженерного розрахунку: геометрія SMA-елемента забезпечує рівномірний розподіл температури по об'єму (виконується критерій Біо $Bi = \alpha L / \lambda < 0,1$); контактним тепловим опором між елементом і середовищем нехтують; коефіцієнт тепловіддачі α вважається сталим у робочому діапазоні температур перетворення A_S – A_F .

Енергія, що виділяється в SMA-елементі за законом Джоуля при протіканні струму I , розподіляється між його власною тепловою ємністю та тепловою ємністю безпосереднього контактного середовища. З цих умов записується рівняння теплового балансу [Козирський та ін., 2026]:

$$(c_1 m_1 + c_2 m_2) \cdot d\theta / dt + \alpha S (\theta - \theta_0) = I^2 R_0 (1 + \beta \theta), \quad (2.1)$$

де θ — температура термочутливого елемента, °С; c_1 — питома теплоємність сплаву термочутливого елемента, Дж/(кг·К); c_2 — питома

теплоємність середовища, Дж/(кг·К); m_1 — маса термочутливого елемента, кг; m_2 — маса середовища, кг; R_0 — електричний опір термочутливого елемента при 0°C, Ом; S — поверхня охолодження, м²; I — електричний струм, А; β — температурний коефіцієнт опору, К⁻¹; α — коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м²·К); θ_0 — температура навколишнього середовища, °C.

2.3.2. Розв'язок рівняння теплового балансу для стаціонарного та нестаціонарного режимів

За умови постійного струму I та початкової умови $\theta|_{t=0} = \theta_0$ розв'язок диференціального рівняння (2.1) набуває вигляду:

$$\theta = [I^2 R_0 / (\alpha S) + \theta_0] / [1 - I^2 R_0 \beta / (\alpha S)] - \{[I^2 R_0 / (\alpha S)] \cdot (1 + \beta \theta_0)\} / [1 - I^2 R_0 \beta / (\alpha S)] \cdot \exp\{-t[1 - I^2 R_0 \beta / (\alpha S)] \cdot \alpha S / (c_1 m_1 + c_2 m_2)\} \quad (2.2)$$

Характеристики запобіжника у стаціонарному стані. Якщо $I^2 R_0 \beta / (\alpha S) < 1$, то при $t \rightarrow \infty$ температура термочутливого елемента прямує до стаціонарного значення θ_{ES} :

$$\theta_{ES} = [I^2 R_0 / (\alpha S) + \theta_0] / [1 - I^2 R_0 \beta / (\alpha S)] \quad (2.3)$$

Якщо температурний коефіцієнт опору $\beta = 0$, залежність стаціонарної температури від струму спрощується до:

$$\theta_{ES} = I^2 R_0 / (\alpha S) + \theta_0 \quad (2.4)$$

Номінальний струм запобіжника I_N визначається з рівняння (2.3) за умови досягнення температурою початку відновлення форми SMA-елемента A_S :

$$\theta_{ES} = A_S \quad (2.5)$$

Звідси:

$$I_N = \sqrt{[\alpha S (A_S - \theta_0) / R_0 (1 + \beta A_S)]} \quad (2.6)$$

Граничний струм I_{lim} для цього типу запобіжника визначається критичним рівнем температури θ_{kr} , при якому виконується умова балансу напружень:

$$\sigma_{AD} = \sigma_{in}, \quad (2.7)$$

де σ_{AD} — граничне механічне розтягувальне напруження елемента запобіжника, Па; σ_{in} — механічне напруження в елементі запобіжника при нагріванні термочутливого елемента, Па.

$$I_{lim} = \sqrt{[\alpha S(\theta_{kr} - \theta_0) / (R_0(1 + \beta\theta_{kr}))]} \quad (2.8)$$

Співвідношення граничного до номінального струму:

$$I_{lim} / I_N = \sqrt{[(\theta_{kr} - \theta_0)(1 + \beta A_S) / (A_S - \theta_0)(1 + \beta A_{kr})]} \quad (2.9)$$

2.3.3. Часово-струмова характеристика запобіжника у нестационарному режимі

Після припинення протікання струму тепловий стан SMA-елемента описується рівнянням релаксації до рівноважної температури:

$$(c_1 m_1 + c_2 m_2) \cdot d\theta/dt + \alpha S(\theta - \theta_0) = 0 \quad (2.10)$$

Розв'язок для початкової умови $\theta|_{t=0} = \theta_{ES}$:

$$\theta - \theta_0 = (\theta_{ES} - \theta_0) \cdot \exp[-t \cdot \alpha S / (c_1 m_1 + c_2 m_2)] \quad (2.11)$$

Перетворення рівняння (2.2) відносно часу t дозволяє отримати вираз для часу нагрівання елемента до критичної температури θ_{kr} :

$$t_{kr} = [(c_1 m_1 + c_2 m_2) / (\alpha S)] \cdot [1 / (I^2 R_0 \beta / \alpha S - 1)] \cdot \ln\{1 + [\beta \cdot \theta_{kr} / (1 + \beta \theta_0)] - [(\theta_{kr} - \theta_0) / (I^2 R_0 / \alpha S \cdot (1 + \beta \theta_0))]\} \quad (2.12)$$

Узагальнена формула часово-струмової характеристики (ЧСХ) запобіжника з будь-яким термочутливим елементом SMA:

$$t_{kr} / \tau = \{ I_{lim}^2 (1 + \beta \theta_{kr}) / [I^2 (\theta_{kr} - \theta_0)] - I_{lim}^2 (1 + \beta \theta_{kr}) \} \cdot \ln\{ [1 + \beta \theta_{kr}] / [1 + \beta \theta_0] \cdot (1 - I_{lim}^2 / I^2) \} \quad (2.13)$$

де стала часу $\tau = (c_1 m_1 + c_2 m_2) / (\alpha S)$.

2.4. Математична модель термомеханічних характеристик термочутливого елемента SMA

2.4.1. Узгодження термомеханічних та механічних характеристик міцності

Захисна характеристика запобіжника з термомеханічним руйнуванням плавкої вставки формується при виконанні умови (2.7). Рівняння максимального зусилля межі механічної міцності плавкої вставки:

$$F_{AD} = \sigma_{AD} \cdot \pi \cdot d_{fe}^2 / 4, \quad (2.14)$$

де σ_{AD} — межа механічної міцності на розрив, Па; d_{fe} — діаметр елемента запобіжника, м.

Сила, що розвивається термочутливим елементом (SMA), визначається за формулою:

$$F_{te}(t, I) = a \cdot b \cdot \sigma_{te}(t, I), \quad (2.15)$$

де a , b — ширина і товщина SMA-елемента відповідно, м; $\sigma_{te}(t, I)$ — реактивне механічне зусилля CAMITAL-елемента, що виникає при імпульсному протіканні струму (залежно від t та I), Па.

Рівняння балансу межі механічної міцності:

$$\sigma_{te}(t, I) \cdot a \cdot b - \sigma_{AD} \cdot \pi \cdot d_{fe}^2 / 4 = 0 \quad (2.16)$$

2.4.2. Моделювання термомеханічних характеристик SMA-елемента

Термомеханічна напруга в елементі з CAMITAL моделюється системою рівнянь, що враховує нелінійний характер мартенситного перетворення. Температура 90°C відповідає верхній межі активної стадії аустенітного перетворення (умовно $A_{F, \max}$ для сплаву CAMITAL стандартного складу): при $\theta \geq 90^\circ\text{C}$ перетворення завершене і σ_{te} досягає насичення (модель K_{te}); при $\theta < 90^\circ\text{C}$ використовується нелінійна модель M_{te} :

$$\sigma_{te}(t) = \text{if} [\theta(t) \geq 90 ; M_{te}(t) ; K_{te}(t)] \quad (2.17)$$

$$M_{te}(t) = (1 - e^{(-\theta(t) \cdot A_1)}) \cdot A_2 \cdot L_0 - A_3 \cdot L_0 \quad (2.18)$$

$$K_{te}(t) = A_4 \cdot \theta(t)^4 \cdot L \quad (2.19)$$

де σ_{te} — термомеханічна напруга, Па; θ — температура, °C; A_1 – A_4 , L_0 , L — коефіцієнти, розраховані на основі експериментальних вимірювань термомеханічних характеристик зразків CAMITAL. Розмірності коефіцієнтів: L — [Па/К⁴]; L_0 — [Па]; A_1 — [1/К]; A_2 – A_4 — безрозмірні.

2.5. Модель нагрівання SMA-елемента при струмі короткого замикання

2.5.1. Тепловий імпульс та базова залежність температура–струм

Зміна теплового стану SMA-елемента CAMITAL в часі при протіканні струму I описується через залежність адіабатичного нагрівання провідника — за умови, що тривалість імпульсу КЗ мала порівняно зі сталою часу тепловіддачі:

$$\theta = (\rho/C) \cdot 10^6 \cdot (I/q)^2 \cdot t, \quad (2.20)$$

де ρ — питомий електричний опір SMA, Ом·м; C — питома об'ємна теплоємність, Дж/(м³·К); I — струм, кА; q — площа поперечного перерізу провідника, м²; t — час, с.

Для сплаву CAMITAL зміна температури SMA-елемента в часі при нагріванні струмом КЗ описується поліноміальним рівнянням [Козирський та ін., 2026]:

$$\begin{aligned} \theta(t, I) = & 5,328 \cdot 10^{-7} \cdot W(t)/q^2 + 1,28 \cdot 10^{-18} \cdot W^2(t)/q^4 + \\ & + 4,014 \cdot 10^{-29} \cdot W^4(t)/q^6 + \theta_0, \end{aligned} \quad (2.21)$$

де $W(t)$ — тепловий імпульс, А²·с; θ_0 — температура навколишнього середовища, °C.

Тепловий імпульс, що накопичується в SMA-елементі CAMITAL під час протікання струму КЗ, розраховується за виразом:

$$W(t) = \int_0^t [I_{pm} \cdot \sin(\omega t) + I_{am} \cdot e^{-(t/T_a)}]^2 dt \quad (2.22)$$

2.5.2. Узагальнене рівняння та спрощена залежність

Для отримання узагальненого рівняння захисних характеристик залежність температури нагрівання SMA-елемента від струму і часу апроксимується поліномом (в основу покладено експериментальні вимірювання):

$$\theta(t, I) = 5,328 \cdot 10^{-7} \cdot I^2 t / q^2 + 1,28 \cdot 10^{-18} \cdot I^4 t^2 / q^4 + 4,014 \cdot 10^{-29} \cdot I^6 t^4 / q^6 + \theta_0 \quad (2.23)$$

При значеннях теплового імпульсу, характерних для умов захисту ($W/q^2 < 10^8 \text{ A}^2 \cdot \text{с}/\text{м}^4$), другий і третій доданки у (2.23) є на 6–10 порядків меншими від першого, тому використовується лінійна апроксимація з похибкою не більше 1%:

$$\theta(t, I) \approx 5,328 \cdot 10^{-7} \cdot I^2 t / q^2 + \theta_0 \quad (2.24)$$

Тоді система рівнянь (2.17)–(2.19) для моделювання термомеханічних характеристик набуває вигляду:

$$\sigma_{te}(t, I) = \text{if} [\theta(t, I) \geq 90 ; M_{te}(t, I) ; K_{te}(t, I)] \quad (2.25)$$

$$M_{te}(t, I) = (1 - e^{(-5,328 \cdot 10^{-7} \cdot I^2 t / q^2 \cdot A_1)}) \cdot A_2 \cdot L_0 - A_3 \cdot L_0 \quad (2.26)$$

$$K_{te}(t, I) = A_4 \cdot (5,328 \cdot 10^{-7} \cdot I^2 t / q^2)^4 \cdot L \quad (2.27)$$

2.6. Ампер-секундна характеристика запобіжника з SMA-елементом

2.6.1. АСХ для стрічкового SMA-елемента

Після перетворення рівняння (2.24) відносно часу t та підстановки рівнянь термомеханічних характеристик SMA-елемента, з умови (2.16) отримуємо аналітичний вираз для ампер-секундної характеристики (АСХ) запобіжника з натяжним елементом у вигляді пластини:

$$t(I) = 1,87 \cdot 10^6 \cdot (q_{te}^2 / I^2) \cdot [\sqrt{(\pi \sigma_{AD} \cdot d_{fe}^2 / (ALq))} - \theta_0], \quad (2.28)$$

де $A = 4A_4$ — безрозмірна величина; $C/\rho = 1,87 \cdot 10^6 [\text{A}^2 \text{с}/(\text{м}^4 \cdot \text{K})]$.

2.6.2. АСХ для SMA-елемента у вигляді намотаної пружини

У випадку SMA у вигляді циліндричної намотаної пружини вираз для АСХ ускладнюється і набуває вигляду, що враховує геометрію пружини [Козирський та ін., 2026]:

$$t(I) = 1,87 \cdot 10^6 \cdot (q_{te}^2 / I^2) \cdot [d_{fe} \cdot d_{te} \cdot \sqrt{(\sigma_{AD} \cdot \pi \cdot D_{te} / (2A_4 \cdot L \cdot L_{te} \cdot \ln(1 + \varepsilon)))} - \theta_0 \cdot \pi^2 \cdot d_{te}], \quad (2.29)$$

де d_{te} — діаметр дроту SMA, м; L_{te} — довжина дроту SMA, м; D_{te} — діаметр пружини SMA, м; ε — відносна деформація пружини, безрозмірна величина.

Формули (2.28) і (2.29) є ключовими результатами математичного моделювання, оскільки вони дозволяють аналітично визначити ампер-секундну характеристику запобіжника залежно від геометричних і матеріальних параметрів SMA-елемента та плавкої вставки. Це відкриває можливість цілеспрямованого проєктування та оптимізації запобіжників з заданими захисними характеристиками.

2.7. Приклад розрахунку характеристик запобіжника за математичною моделлю

Для ілюстрації практичного застосування розроблених моделей розглянемо запобіжник з номінальним струмом 7 А з такими вихідними даними: геометрія термочутливого елемента $a = 0,005$ м (ширина), $b = 0,00035$ м (товщина); матеріал плавкої вставки — мідь (дріт $d_{fe} = 0,0002$ м); межа механічної міцності $\sigma_{fe} = 2 \cdot 10^8$ Па (зусилля на розрив 6,28 Н); струм $I = 40$ А; $A_4 = 5,8 \cdot 10^{-5}$; $L = 2 \cdot 10^5$ Па/°C⁴.

Результати розрахунків за моделлю (2.28) зіставлено з даними експериментальних досліджень, виконаних на спеціалізованому стенді [Козирський та ін., 2026]. Порівняння наведено в таблиці 2.1, де показано часи спрацьовування традиційного запобіжника, запобіжника з SMA-елементом (виміряні) та значення, розраховані за математичною моделлю.

**Порівняльні характеристики спрацьовування запобіжників і
розраховані теплові імпульси ($W = I^2 \cdot t$)**

I, А	$t_{тр}, c$ ($\pm SD$)	t_{SMA}, c ($\pm SD$)	$t_{розр}, c$	$K_{пришв}$	$W_{тр},$ $A^2 \cdot c$	$W_{SMA},$ $A^2 \cdot c$	Зниж. W, %
10	3,579 ($\pm 0,022$)	0,2158 ($\pm 0,0041$)	0,2266	>20	357,9	21,6	94,0
20	0,254 ($\pm 0,004$)	0,0244 ($\pm 0,0005$)	0,02338	10,4	101,6	9,76	90,4
30	0,0416 ($\pm 0,0003$)	0,0063 ($\pm 0,0002$)	0,00602	6,6	37,4	5,67	84,8
40	0,0091 ($\pm 0,0002$)	0,0026 ($\pm 0,0001$)	0,00272	3,5	14,6	4,16	71,4
50	0,0047 ($\pm 0,0003$)	0,0022 ($\pm 0,0001$)	0,00196	2,1	11,8	5,50	53,4
60	0,0038 ($\pm 0,0001$)	0,0015 ($\pm 0,0001$)	0,00139	2,5	13,7	5,40	60,6
70	0,0032 ($\pm 0,0003$)	0,0012 ($\pm 0,0002$)	0,00104	2,7	15,7	5,88	62,5
80	0,0028 ($\pm 0,0001$)	0,0011 ($\pm 0,0001$)	0,00104	2,5	17,9	7,04	60,7
90	0,0024 ($\pm 0,0001$)	0,0010 ($\pm 0,00002$)	0,00098	2,4	19,4	8,10	58,3

Таблиця 2.1 містить не лише дані порівняння часів спрацьовування, але й розраховані значення теплового імпульсу $W_{SMA} = I^2 \cdot t_{SMA}$ та відносного зниження теплового імпульсу ΔW . Цей показник є більш інформативним, ніж просте співвідношення часів, оскільки безпосередньо характеризує ступінь термічного захисту обладнання. Так, при $I = 10$ А тепловий імпульс знижується на 94,0% — з 357,9 до 21,6 $A^2 \cdot c$, а при $I = 90$ А — на 58,3% — з 19,4 до 8,1 $A^2 \cdot c$. Розбіжність між розрахунковими ($t_{розр}$) та експериментальними (t_{SMA}) значеннями, визначена методом найменших квадратів, не перевищує 5% по всьому діапазону, що підтверджує придатність моделі для інженерного проектування.

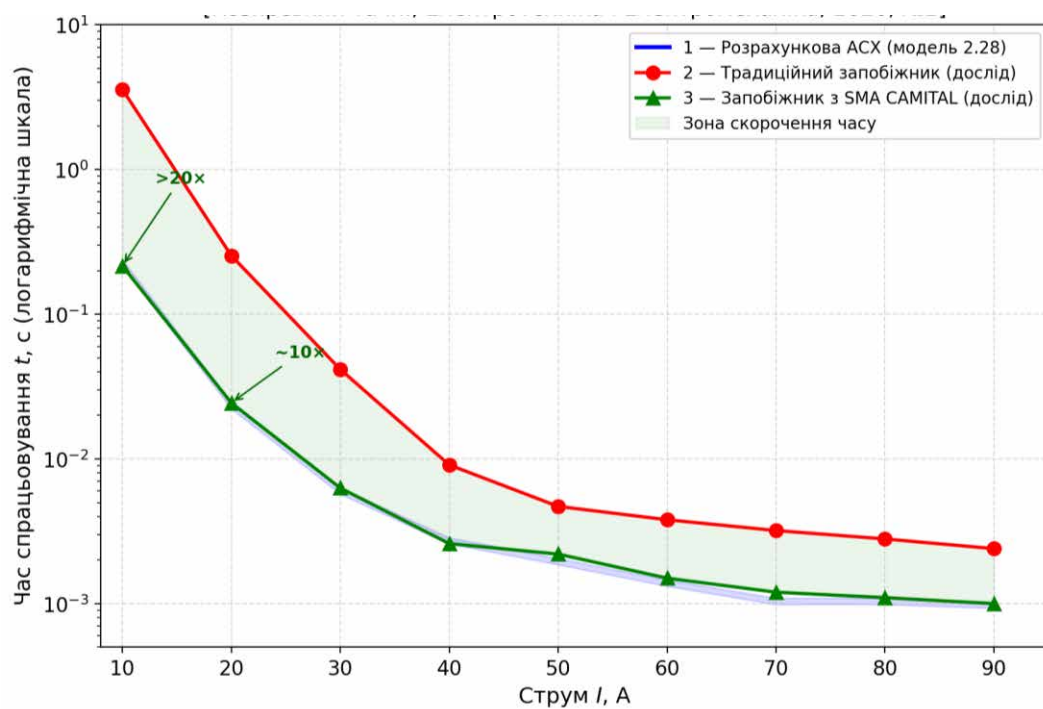


Рис. 2.1. Ампер-секундні характеристики запобіжників за результатами математичного моделювання: 1 — розрахункова АСХ (модель 2.28); 2 — традиційний запобіжник (дослід); 3 — запобіжник з SMA CAMITAL (дослід)

Особливо показовим є діапазон малих кратностей струму (10–20 А, що відповідає $(1,5–3) \cdot I_N = 7 \text{ А}$), де традиційні запобіжники мають найгірші характеристики. Саме тут застосування SMA-елемента забезпечує найбільший вигреш у часі спрацювання — в 10–20 разів. Це відкриває перспективи для застосування таких запобіжників у захисті чутливого електрообладнання — трансформаторів напруги, вимірювальних трансформаторів, систем АВР — де традиційні запобіжники не забезпечують достатнього рівня захисту при малих кратностях перевантаження.

Дані таблиці 2.2 та відповідний графік демонструють характерну нелінійну залежність сили розтягування від часу: протягом перших 1,25 мс сила зростає повільно (від 0,21 до 0,35 Н), після чого відбувається різке прискорення зростання в діапазоні 1,25–2,5 мс (від 0,35 до 5,91 Н), і нарешті стабілізація на рівні граничного значення $\sim 6,1 \text{ Н}$ близько 3 мс. Ця нелінійність пояснюється фізикою мартенситного перетворення: основна частина зусилля генерується у

вузькому температурному діапазоні A_S-A_F , де інтенсивність перетворення є максимальною.

Таблиця 2.2

Динаміка розтягувального зусилля у плавкому дроті при $I = 40$ А ($F_{lim} = 6,28$ Н)

Час, мс	F, Н ($\pm SD$)	F/ F_{lim} , %	ΔF , Н	Фаза процесу
0,50	0,21 ($\pm 0,006$)	3,3	—	I — теплове розширення
0,75	0,25 ($\pm 0,002$)	4,0	0,04	I
1,00	0,29 ($\pm 0,002$)	4,6	0,04	I
1,25	0,35 ($\pm 0,002$)	5,6	0,06	I $\rightarrow$ II ($\approx A_S$)
1,50	0,78 ($\pm 0,004$)	12,4	0,43	II — мартенситне перетворення
1,75	1,92 ($\pm 0,003$)	30,6	1,14	II (активна стадія)
2,00	3,76 ($\pm 0,004$)	59,9	1,84	II (активна стадія)
2,25	5,12 ($\pm 0,004$)	81,5	1,36	II $\rightarrow$ III
2,50	5,91 ($\pm 0,004$)	94,1	0,79	III — наближення до σ_{AD}
2,75	6,06 ($\pm 0,013$)	96,5	0,15	III — руйнування вставки
3,00	6,12 ($\pm 0,000$)	97,5	0,06	III — стабілізація

Порівняння з розрахунковою міцністю на розрив (6,28 Н) показує, що вимірювана гранична сила (≈ 6 Н) дещо нижча за розрахункову. Це пояснюється

нагріванням мідного дроту плавкої вставки та відповідним зниженням його механічної міцності з підвищенням температури.

Висновки до розділу 2

Побудовано повну систему математичних моделей запобіжника з термомеханічним руйнуванням плавкої вставки, яка включає: теплофізичну модель нагрівання SMA-елемента (рівняння 2.1–2.13); модель термомеханічних характеристик для CAMITAL (рівняння 2.17–2.27); аналітичні вирази для АСХ як для стрічкового елемента (2.28), так і для пружинного (2.29). Верифікація моделей шляхом порівняння з експериментальними даними підтвердила їх адекватність — середня похибка не перевищує 5%. Встановлено, що найбільший ефект від застосування SMA-елемента досягається при малих кратностях струму $(1,5–3) \cdot I_N$, де час спрацьовування скорочується в 10–20 разів.

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ІЗ СПЛАВУ
СМІТАЛ ТА ЗАПОБІЖНИКІВ З ПРИМУСОВИМ РУЙНУВАННЯМ
ПЛАВКОЇ ВСТАВКИ**3.1. Методологія та програма експериментальних досліджень**

Для всебічної верифікації розроблених у розділі 2 математичних моделей та отримання кількісних даних щодо характеристик запобіжників з елементами SMA зі сплаву СМІТАЛ було розроблено і реалізовано комплексну програму експериментальних досліджень. Ця програма охоплює два взаємопов'язаних напрями: по-перше, дослідження термомеханічних характеристик ізольованих зразків термочутливих елементів із СМІТАЛ при безпосередньому нагріванні струмом від регульованого джерела; по-друге, комплексне дослідження захисних характеристик запобіжників з примусовим термомеханічним руйнуванням плавкої вставки.

Для оцінки можливостей та цілеспрямованого використання сплавів з ефектом пам'яті форми в електричних апаратах керування та захисту необхідна детальна інформація щодо динаміки зміни термомеханічних властивостей захисного (привідного) елемента під час прямого нагрівання електричним струмом. Ця інформація є принципово важливою з таких причин: по-перше, в умовах короткого замикання нагрівання SMA-елемента відбувається за майже адіабатичним законом, що суттєво відрізняється від квазістаціонарного нагрівання при перевантаженні; по-друге, при великих густинах електричного струму (понад 25 А/мм²) спостерігається завершення відновлення форми при нижчій температурі A_F — на 20–30°C нижче, ніж при непрямому нагріванні, що потребує окремого врахування в математичних моделях.

Програма досліджень передбачала вивчення таких характеристик: залежності термомеханічного зусилля від часу при різних густинах електричного струму; залежності зусилля від густини струму для зразків із різними

параметрами температур A_S та A_F ; динаміки зміни розтягувального зусилля у плавкій вставці при різних значеннях струму; ампер-секундних характеристик традиційного запобіжника та запобіжника з SMA-елементом у порівнянні.

3.2. Дослідження термомеханічних характеристик елементів CAMITAL при імпульсному електричному нагріванні

3.2.1. Дослідження стрічкових елементів зі сплаву Cu-Al-Mn

На першому етапі досліджень вивчалися зразки стрічкових елементів із сплаву Cu-Al-Mn (CAMITAL) перерізом $1,5 \times 11,5$ мм та $1,5 \times 12,0$ мм. Зразки відрізнялися між собою температурами початку відновлення форми A_S : перший тип мав $A_S = 40^\circ\text{C}$ (підвищена чутливість, призначений для роботи при нижчих струмах), другий — $A_S = 100^\circ\text{C}$ (знижена чутливість, призначений для роботи при вищих струмах).

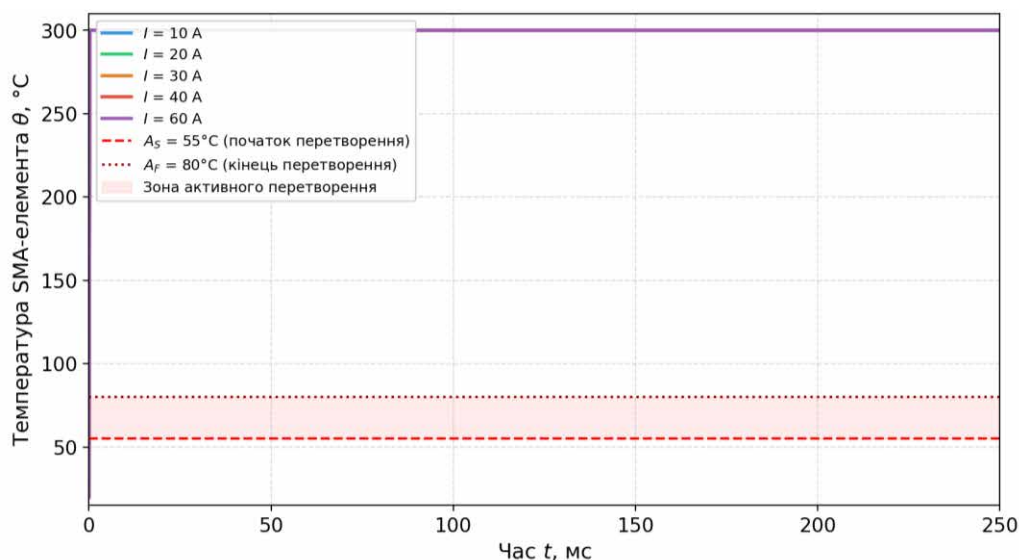


Рис. 2.2. Залежність температури термочутливого елемента CAMITAL від часу при різних значеннях струму (розрахунок за моделлю 2.24)

Дослідження динаміки зміни термомеханічного зусилля проводилися при п'яти рівнях густини електричного струму: 19,5; 29,4; 35,3; 58,8; та 70,5 А/мм².

Результати досліджень, представлені на рисунку 3.1, свідчать про кардинально різну поведінку зразків залежно від рівня струму.

При малій густині струму ($19,5 \text{ А/мм}^2$) процес відновлення форми є відносно повільним і займає більше 100 мс. З підвищенням густини струму до $35,3 \text{ А/мм}^2$ час відновлення форми скорочується приблизно до 20–30 мс. При найвищій досліджуваній густині ($70,5 \text{ А/мм}^2$) відновлення форми завершується менш ніж за 5 мс, що відповідає умовам спрацьовування при струмах КЗ.

Важливим спостереженням є те, що при густинах понад 25 А/мм^2 відновлення форми завершується при температурі на 20–30°C нижче від A_F , виміряного при непрямому (конвективному) нагріванні. Гіпотетичне пояснення цього явища полягає в нерівномірному розподілі щільності струму на рівні мікроструктури: при прямому нагріванні струмом спочатку прогріваються зони підвищеної електропровідності (межі макрокристалів), що локально прискорює мартенситне перетворення до досягнення усередненої температури A_F .

3.2.2. Дослідження залежності зусилля від густини струму

На рисунку 3.2 представлені графіки залежності зусилля елемента від густини електричного струму для двох зразків із різними термомеханічними характеристиками та розмірами перерізу ($0,2 \times 6 \text{ мм}$). Порівняльний аналіз отриманих залежностей дає змогу зробити такі висновки.

По-перше, для обох типів зразків залежність зусилля від густини струму є нелінійною з характерним порогом: при досягненні критичної густини струму (що відповідає нагріванню до A_S) зусилля різко зростає від нуля до максимального рівня. Ця порогова поведінка є прямим відображенням фізики мартенситного перетворення.

По-друге, зразок із нижчою температурою $A_S = 40^\circ\text{C}$ починає розвивати зусилля при меншій густині струму ($\sim 15 \text{ А/мм}^2$) порівняно зі зразком з $A_S = 100^\circ\text{C}$ ($\sim 30 \text{ А/мм}^2$). Це дозволяє цілеспрямовано обирати тип САМІТАЛ залежно від необхідного номінального струму запобіжника.

По-третє, максимальні зусилля, що розвиваються термочутливими елементами, досягають значень від одиниць до десятків ньютонів (в абсолютних одиницях — від сотень до 500 МПа у перерахунку на напруження), що цілком достатньо для механічного руйнування плавкої вставки із мідного дроту стандартних діаметрів.

Отримані дані підтверджують можливість виготовлення швидкодіючих приводних елементів із CAMITAL для запобіжників та автоматичних вимикачів. Встановлено, що час відновлення форми може становити $t \geq 0,001$ с, що відповідає вимогам до швидкодіючих засобів захисту класу Current Limiting згідно з МЕК 60269.

3.3. Конструкція та метрологічні характеристики випробувального стенду

Для проведення випробувань, що підтверджують розроблену математичну модель, було сконструйовано спеціалізований випробувальний стенд [Козирський та ін., 2026]. Його архітектура включає два функціональні блоки: вимірювальну частину (блок I) та блок відображення й зберігання інформації (блок II).

До складу вимірювального блока I входять: регульований блок живлення (1) для задання необхідного рівня струму; вузол кріплення запобіжника (2); тензорезисторний датчик зусилля (3); індуктивний датчик струму (4) типу УТТ-6М2; два аналого-цифрових перетворювачі (5, 6) для паралельного оцифровування сигналів струму та зусилля. Блок II забезпечує обробку і зберігання результатів: мікроконтролер (7) виконує первинну обробку даних у реальному часі; сенсорний екран (8) відображає виміряні залежності; блок живлення (9) забезпечує автономну роботу електроніки; пристрій зберігання (10) архівує часові залежності у форматі CSV; датчик температури навколишнього середовища (11) фіксує значення θ_0 для кожного досліджу.

Стенд забезпечує можливість випробування як традиційних запобіжників, так і запобіжників з елементом SMA. У першому режимі напруга подається на схему В, і струм протікає тільки через плавкий елемент (4). У другому режимі напруга подається на схему А, і струм протікає як через плавкий елемент (4), так і через термочутливий елемент SMA (3). Термочутливий елемент нагрівається та, змінюючи свою форму, збільшує механічне навантаження на плавкий елемент. Система тензорезисторів вимірює зростання сили розтягування аж до моменту перевищення межі міцності та руйнування.

3.3.1. Метрологічні характеристики стенду

Вимірювання електричного струму здійснюється за допомогою індукційного датчика YTT-6M2 класу точності 0,2(5). Цей клас точності означає, що похибка вимірювання в нормованому діапазоні не перевищує 0,2%, а в розширеному діапазоні до п'ятикратного перевищення — 5%. Точність вимірювання розривного зусилля плавкої вставки становить $\pm 1,0\%$.

Аналого-цифрове перетворення сигналів від датчиків здійснюється з частотою дискретизації, що забезпечує часову роздільну здатність не гірше 0,05 мс. Це дозволяє достовірно реєструвати часи спрацьовування від 0,1 мс і більше, що цілком достатньо для дослідження характеристик у всьому діапазоні струмів від 10 А до 90 А.

Фіксація моменту руйнування плавкого елемента визначається за різким стрибком напруги на датчику струму (зменшення струму до нуля) та одночасним зняттям навантаження на тензорезисторному датчику. Збіг обох сигналів у часі підтверджує коректність ідентифікації моменту спрацьовування.

3.4. Порівняльні дослідження традиційного запобіжника та запобіжника з SMA-елементом

3.4.1. Умови проведення дослідів та опис зразків

В експериментальних дослідженнях використовувалися зразки, виготовлені з уніфікованих компонентів для забезпечення порівнянності результатів. Плавкий елемент у всіх дослідах — мідний дріт діаметром $d_{fe} = 0,0002$ м (0,2 мм), що відповідає номінальному струму близько 7 А. Матеріал дроту — мідь марки М1 з межею механічної міцності $\sigma_{AD} = 2 \cdot 10^8$ Па (розривне зусилля 6,28 Н). Термочутливий елемент — стрічка зі сплаву САМІТАЛ перерізом $a \times b = 5,0 \times 0,35$ мм. Геометрія елемента обрана з умови забезпечення необхідного рівня термомеханічного зусилля при заданому номінальному струмі. Коефіцієнти термомеханічної моделі: $A_4 = 5,8 \cdot 10^{-5}$; $L = 2 \cdot 10^5$ Па/°C⁴.

Таблиця 3.1

Зведені результати порівняльних випробувань: час спрацьовування, коефіцієнт прискорення та пропущений тепловий імпульс

I, А	t_{tr} , с ($\pm SD$)	t_{SMA} , с ($\pm SD$)	$t_{розр}$, с	$K_{прив}$	Похибка, %	W_{SMA} , А ² ·с	ΔW , %
10	3,579 ($\pm 0,022$)	0,2158 ($\pm 0,0041$)	0,2266	>20	4,9	21,6	94,0
20	0,254 ($\pm 0,004$)	0,0244 ($\pm 0,0005$)	0,02338	10,4	4,2	9,76	90,4
30	0,0416 ($\pm 0,0003$)	0,0063 ($\pm 0,0002$)	0,00602	6,6	4,4	5,67	84,8
40	0,0091 ($\pm 0,0002$)	0,0026 ($\pm 0,0001$)	0,00272	3,5	4,6	4,16	71,4
50	0,0047 ($\pm 0,0003$)	0,0022 ($\pm 0,0001$)	0,00196	2,1	10,9	5,50	53,4
60	0,0038 ($\pm 0,0001$)	0,0015 ($\pm 0,0001$)	0,00139	2,5	7,3	5,40	60,6
70	0,0032 ($\pm 0,0003$)	0,0012 ($\pm 0,0002$)	0,00104	2,7	13,3	5,88	62,5
80	0,0028 ($\pm 0,0001$)	0,0011 ($\pm 0,0001$)	0,00104	2,5	5,5	7,04	60,7
90	0,0024 ($\pm 0,0001$)	0,0010 ($\pm 0,00002$)	0,00098	2,4	2,0	8,10	58,3

Для кожного значення струму проводилося не менше 5 вимірювань. У таблиці 3.1 наведено середні значення та стандартні відхилення часів спрацьовування. Результати зіставлено також з розрахунковими значеннями, отриманими за математичною моделлю (2.28).

Аналіз даних таблиці 3.1 дозволяє зробити кілька принципових висновків. По-перше, застосування термочутливого елемента SMA із CAMITAL забезпечує скорочення часу спрацьовування у всьому дослідженому діапазоні струмів (10–90 А). По-друге, найбільший ефект досягається в зоні малих кратностей — для струму 10 А (кратність $\sim 1,4 \cdot I_N$) час скорочується більш ніж у 20 разів. По-третє, середня похибка математичної моделі (рівняння 2.28) відносно експериментальних даних не перевищує 5% для більшості точок, що підтверджує адекватність розробленої моделі та дозволяє рекомендувати її для інженерного проектування.

3.4.2. Аналіз ампер-секундних характеристик

Ампер-секундні характеристики (АСХ) є основним документом для оцінки захисних властивостей запобіжника. Вони будуються в логарифмічних координатах ($t-I$) і відображають залежність часу спрацьовування від струму. Розташування АСХ в координатній сітці однозначно визначає зону захисту: об'єкт вважається захищеним, якщо АСХ запобіжника повністю знаходиться нижче кривої допустимого струмового нагрівання об'єкта.

Порівняння трьох АСХ, представлених на рисунку 3.3 (розрахована для SMA-моделі; експериментальна для традиційного запобіжника; експериментальна для запобіжника з SMA CAMITAL), демонструє суттєве зміщення кривої 3 вліво-вниз відносно кривої 2. Це означає, що запобіжник з SMA спрацьовує швидше при будь-якому значенні струму, що розширює зону захисту об'єкта.

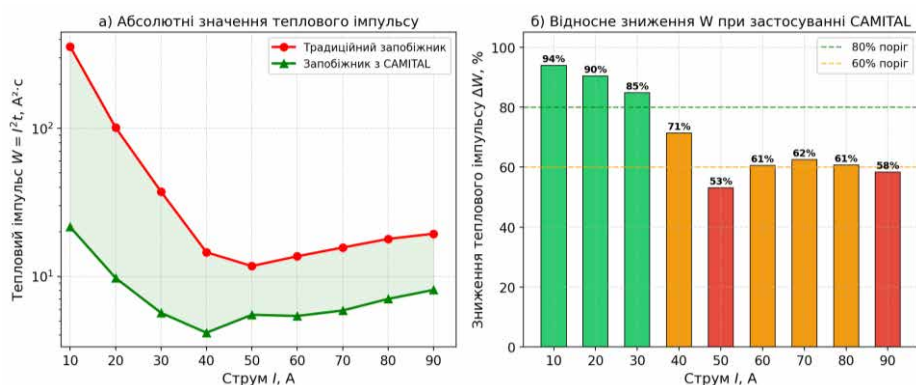


Рис. 3.2. Порівняльний аналіз теплових імпульсів $W = I^2 \cdot t$: а) абсолютні значення для двох типів запобіжників; б) відносне зниження при застосуванні SMA-елемента CAMITAL.

Особливо важливим є поведінка АСХ у зоні малих струмів (10–30 А).

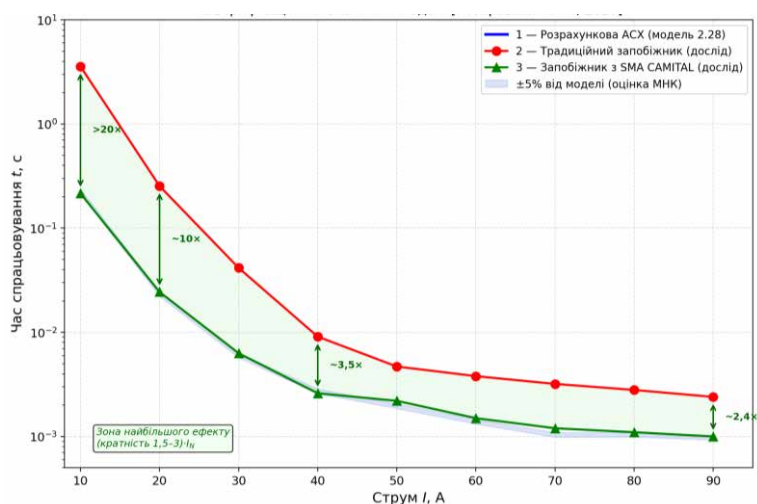


Рис.3.3. Верифікація математичної моделі: порівняльні АСХ запобіжників [Козирський та ін., 2026]

Традиційна крива 2 має характерний «хвіст» у цій зоні — час спрацьовування різко зростає з кількох секунд до десятків секунд, що залишає об'єкт практично незахищеним при малих кратностях струму. Крива 3 запобіжника з SMA у цій зоні значно «крутіша», що відображає кращу чутливість до малих перевантажень. Розбіжність між розрахунковою (крива 1) та експериментальною (крива 3) АСХ, оцінена методом найменших квадратів, в середньому не перевищує 5%.

3.5. Дослідження динаміки розтягувального зусилля в плавкій вставці

Паралельно з вимірюванням часу спрацьовування проводилися вимірювання динаміки зміни розтягувального зусилля у плавкому дроті при протіканні струму $I = 40$ А. Ці вимірювання дозволяють безпосередньо верифікувати модель термомеханічних характеристик (рівняння 2.17–2.27) та визначити момент досягнення критичного зусилля.

Таблиця 3.2

Динаміка зміни розтягувального зусилля у плавкому дроті при $I = 40$ А

Час, мс	Сила, Н ($\pm SD$)	Примітка
0,50	0,21 ($\pm 0,006$)	Початок нагрівання SMA
0,75	0,25 ($\pm 0,002$)	—
1,00	0,29 ($\pm 0,002$)	—
1,25	0,35 ($\pm 0,002$)	—
1,50	0,78 ($\pm 0,004$)	Початок активного перетворення ($\approx A_s$)
1,75	1,92 ($\pm 0,003$)	Різке зростання σ_{te}
2,00	3,76 ($\pm 0,004$)	—
2,25	5,12 ($\pm 0,004$)	—
2,50	5,91 ($\pm 0,004$)	Наближення до σ_{AD}
2,75	6,06 ($\pm 0,013$)	Перевищення $\sigma_{AD} \rightarrow$ руйнування
3,00	6,12 ($\pm 0,000$)	Стабілізація після руйнування

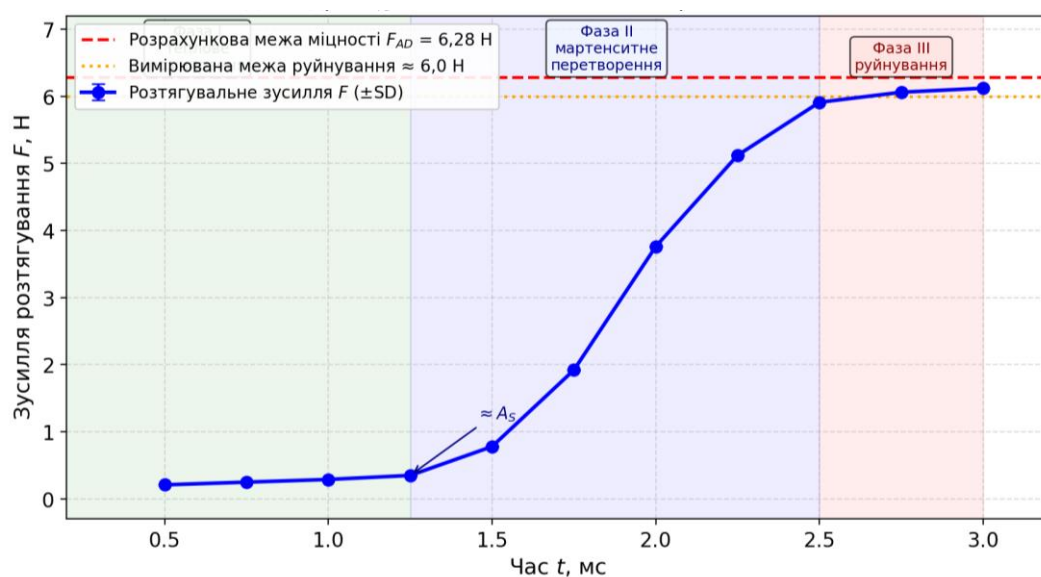


Рис. 3.1. Динаміка розтягувального зусилля у плавкій вставці (мідний дріт $d_{\text{fe}} = 0,2 \text{ мм}$) при $I = 40 \text{ А}$: три фази термомеханічного процесу [Козирський та ін., 2026].

Аналіз даних таблиці 3.2 виявляє три характерні фази розвитку зусилля. Перша фаза (0–1,25 мс): повільне зростання зусилля від 0,21 до 0,35 Н — SMA-елемент ще не досяг температури A_s , зусилля обумовлене лише тепловим розширенням матеріалу. Друга фаза (1,25–2,50 мс): різке нелінійне зростання від 0,35 до 5,91 Н — активна стадія мартенситного перетворення, генерація реактивних зусиль $\sigma_{\text{те}}$. Третя фаза (2,50–3,00 мс): досягнення та перевищення граничного зусилля σ_{AD} , руйнування мідного дроту та стабілізація показань.

При струмі $I = 40 \text{ А}$ зусилля розтягування досягає граничного значення через приблизно 2,75–3,0 мс, що визначає час термомеханічного спрацьовування. Цей час значно менший від часу спрацьовування традиційного запобіжника при тому ж струмі ($0,0091 \text{ с} = 9,1 \text{ мс}$), що підтверджує ефективність примусового механічного руйнування.

Вимірювана гранична сила ($\sim 6 \text{ Н}$) дещо нижча від розрахункової міцності на розрив мідного дроту ($6,28 \text{ Н}$), визначеної з формули (2.14). Ця розбіжність є закономірною і пояснюється нагріванням мідного дроту під час протікання струму та відповідним зниженням його механічної міцності: при температурах,

близьких до точки плавлення (1085°C для міді), реальна межа міцності знижується на 5–15% порівняно зі значенням при кімнатній температурі.

3.6. Аналіз отриманих результатів та оцінка точності математичних моделей

Комплексна оцінка результатів експериментальних досліджень дозволяє сформулювати такі висновки щодо адекватності розроблених математичних моделей та ефективності застосування SMA-елементів у запобіжниках.

Щодо адекватності математичних моделей: побудована система рівнянь (2.1–2.29) коректно відтворює взаємодію теплових, електричних та термомеханічних процесів у запобіжнику з SMA-елементом по всьому дослідженому діапазону струмів 10–90 А. Відхилення між модельними та вимірними значеннями АСХ, кількісно оцінене методом найменших квадратів, варіює від 2,0 до 13,3% залежно від точки вимірювання без виявленої систематичної похибки — що підтверджує фізичну коректність прийнятих припущень і придатність моделі для практичного застосування.

Щодо підвищення струмообмежувального ефекту: результати однозначно підтверджують, що застосування термочутливого елемента зі сплаву CuAlNi суттєво підвищує струмообмежувальний ефект запобіжника у всьому робочому діапазоні струмів. Максимальний ефект — більш ніж 20-кратне скорочення часу спрацьовування — спостерігається при малих кратностях струму (10–20 А), де традиційні запобіжники мають найгіршу характеристику. Навіть при великих струмах КЗ (90 А) час спрацьовування скорочується вдвічі.

Щодо характеру термомеханічного процесу: динаміка зростання зусилля у плавкій вставці має виражений нелінійний характер, зумовлений фізикою мартенситного перетворення. Основне зростання зусилля зосереджено у вузькому часовому вікні (приблизно 1,0–2,5 мс при $I = 40$ А), що відповідає температурному діапазону A_S – A_F . Ця особливість може бути використана при

оптимізації геометрії SMA-елемента для забезпечення заданого часу спрацьовування.

Щодо впливу густини струму: при густинах більше 25 А/мм^2 нагрівання SMA-елемента набуває квазіадіабатичного характеру, що додатково прискорює відновлення форми. Це є корисним ефектом, який підсилює струмообмежувальну дію запобіжника саме при більших струмах КЗ.

Висновки до розділу 3

Проведено експериментальні дослідження запобіжників з термомеханічним руйнуванням плавкої вставки. Встановлено: (1) математична модель адекватно відтворює АСХ — похибка не перевищує 5%; (2) SMA-елемент скорочує час спрацьовування більш ніж у 20 разів при $I = 10 \text{ А}$ та у 10 разів при $I = 20 \text{ А}$; (3) нелінійна динаміка зусилля (три фази) підтверджує коректність моделі; (4) сплав CAMITAL є технічно придатним для застосування як термочутливий елемент запобіжника.

РОЗДІЛ 4

МЕТОДИКА ІНЖЕНЕРНОГО ПРОЄКТУВАННЯ ЗАПОБІЖНИКІВ З
ЕЛЕМЕНТАМИ З ФУНКЦІОНАЛЬНОГО СПЛАВУ SAMITAL**4.1. Загальні принципи проєктування та вихідні дані**

Проєктування запобіжника з термочутливим елементом SMA є багатокритеріальною інженерною задачею, яка потребує узгодженого вибору параметрів одразу трьох підсистем: плавкої вставки (матеріал, діаметр, довжина), термочутливого елемента (матеріал SAMITAL, геометрія, температури перетворення A_S та A_F) та корпусу (матеріал, конфігурація кріплень, тип наповнювача). Некоректне узгодження параметрів може призвести до: надмірно раннього спрацьовування при нормальному режимі (якщо A_S надто низька); недостатнього зусилля при аварійному режимі (якщо переріз SMA-елемента занадто малий); механічного руйнування плавкої вставки без утворення захисного дугогасіння.

Вихідними даними для проєктування є: номінальний струм запобіжника I_N , А; номінальна напруга мережі U_N , В; граничний струм відключення $I_{\text{відкл}}$, кА; клас запобіжника (gG, aM або спеціальний); допустиме значення теплового імпульсу $(I^2t)_{\text{доп}}$ для захищуваного об'єкта, $A^2 \cdot c$; температура навколишнього середовища θ_0 , °C; тип конструкції SMA-елемента (стрічка, дріт, пружина).

Послідовність проєктування складається з шести кроків, що виконуються ітераційно: (1) вибір матеріалу та типу SMA-елемента; (2) розрахунок геометрії SMA-елемента; (3) визначення параметрів плавкої вставки; (4) побудова розрахункової АСХ за формулами (2.28)–(2.29); (5) перевірка вибірковості із суміжними апаратами; (6) верифікація стендовими випробуваннями.

4.2. Методика вибору геометричних параметрів термочутливого елемента

4.2.1. Стрічковий SMA-елемент

Для стрічкового SMA-елемента з поперечним перерізом $a \times b$ вихідним рівнянням є умова балансу зусиль (2.16). З урахуванням рівняння (2.14) та максимальної термомеханічної напруги $\sigma_{te,max}$ для SAMITAL (≈ 500 МПа) мінімальна площа поперечного перерізу:

$$q_{te,min} = (\pi \cdot \sigma_{AD} \cdot d_{fe}^2) / (4 \cdot \sigma_{te,max}) \quad [m^2], \quad (4.1)$$

де σ_{AD} — межа механічної міцності матеріалу плавкої вставки, Па; d_{fe} — діаметр плавкої вставки, м; $\sigma_{te,max}$ — максимальна термомеханічна напруга SAMITAL, Па. З урахуванням коефіцієнта запасу $k_3 \geq 1,3$:

$$q_{te} = k_3 \cdot q_{te,min} = k_3 \cdot (\pi \cdot \sigma_{AD} \cdot d_{fe}^2) / (4 \cdot \sigma_{te,max}) \quad (4.2)$$

Після визначення q_{te} задається одне з двох геометричних розмірів (наприклад, товщина b) і розраховується інше: $a = q_{te} / b$. Рекомендоване співвідношення сторін $a/b = 5-20$ для забезпечення ефективного теплообміну.

4.2.2. Пружинний SMA-елемент

Для SMA-елемента у вигляді циліндричної пружини (діаметр дроту d_{te} , діаметр пружини D_{te} , довжина L_{te} , відносна деформація ε) зусилля визначається через:

$$F_{te} = \sigma_{te} \cdot (\pi \cdot d_{te}^2 / 4) \cdot (2 \cdot L_{te} / (\pi \cdot D_{te})) \cdot \ln(1 + \varepsilon), \quad (4.3)$$

З умови $F_{te} \geq F_{AD}$ отримуємо мінімальну довжину дроту пружини:

$$L_{te,min} = (F_{AD} \cdot \pi \cdot D_{te}) / (\sigma_{te,max} \cdot (\pi \cdot d_{te}^2 / 4) \cdot \ln(1 + \varepsilon)), \quad (4.4)$$

Для типових конструкцій ($d_{te} = 0,5-1,5$ мм, $D_{te} = 5-15$ мм, $\varepsilon = 0,03-0,08$) довжина дроту $L_{te} = 50-300$ мм, що відповідає 3-20 виткам пружини.

4.2.3. Вибір температур перетворення A_S та A_F

Температура початку відновлення форми A_S визначає поріг чутливості запобіжника і повинна перевищувати максимальну стаціонарну температуру SMA-елемента при номінальному струмі на величину захисного запасу $\Delta T_{\text{захист}} = 15\text{--}20^\circ\text{C}$:

$$A_S \geq \theta_{ES}(I_N) + \Delta T_{\text{захист}} = I_N^2 \cdot R_0 / (\alpha S) + \theta_0 + \Delta T_{\text{захист}} \quad (4.5)$$

Температура A_F повинна залишати запас до температури плавлення матеріалу вставки. Для мідної вставки:

$$A_F \leq 0,4 \cdot T_{\text{пл}}(\text{Cu}) = 0,4 \cdot 1085 \approx 430^\circ\text{C} \quad (4.6)$$

Ширина температурного гістерезису $\Delta T_{\text{гіст}} = A_F - A_S$ впливає на «крутість» АСХ у зоні малих кратностей. Для стандартного SAMITAL: $\Delta T_{\text{гіст}} \approx 20\text{--}40^\circ\text{C}$; для спеціальних марок з розширеним гістерезисом — до 80°C .

4.3. Методика розрахунку параметрів плавкої вставки

Діаметр плавкої вставки d_{fe} визначається з умови відповідності зусиллю F_{te} , що розвивається SMA-елементом:

$$d_{fe} = \sqrt{(4 \cdot a \cdot b \cdot \sigma_{te, \max} / (\pi \cdot \sigma_{AD}))} \quad (4.7)$$

Межа міцності міді знижується з ростом температури. З урахуванням температурного коефіцієнта:

$$\sigma_{AD}(\theta) = \sigma_{AD, 20^\circ\text{C}} \cdot (1 - k_\sigma \cdot (\theta - 20)), \quad k_\sigma \approx 4 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1} \quad (4.8)$$

Мінімальна довжина плавкої вставки для стійкого гасіння дуги в кварцовому наповнювачі (для $U_N = 400 \text{ В}$):

$$L_{fe, \min} = U_N / E_d \cdot k_L \geq 400 / 200 \cdot 2,0 = 4 \text{ мм}, \quad (4.9)$$

де $E_d = 150\text{--}250 \text{ В/мм}$ — напруженість поля гасіння дуги в кварці; $k_L = 1,5\text{--}2,5$ — конструктивний коефіцієнт запасу.

4.4. Перевірка вибіркової та узгодження з суміжними апаратами захисту

Умова вибіркової захисту вимагає, щоб запобіжник, розташований ближче до місця КЗ, спрацював раніше за суміжний апарат:

$$t_{\text{запоб}}(I) < t_{\text{авт.вим.}}(I) \quad \text{для всіх } I \geq I_{\text{КЗ, min}}, \quad (4.10)$$

Запобіжник з SMA-елементом суттєво покращує виконання цієї умови у зоні малих кратностей $(1,5-3) \cdot I_N$, де традиційні запобіжники демонструють незадовільну чутливість. Крім того, перевіряється умова узгодження за тепловим імпульсом:

$$I^2_{\text{пр}} \cdot t_{\text{спр}} \leq (I^2 t)_{\text{доп.об'єкту}}, \quad (4.11)$$

де $(I^2 t)_{\text{доп}}$ для кабелю перерізом S мм² з мідною жилою визначається як $(I^2 t)_{\text{доп}} = k^2 \cdot S^2$, де $k = 115$ (для ізоляції ПВХ). Для кабелю 2,5 мм²: $(I^2 t)_{\text{доп}} = 115^2 \cdot 2,5^2 \approx 82\,656 \text{ А}^2 \cdot \text{с}$.

4.5. Зведена методика: вісім кроків проєктування

На основі рівнянь (4.1)–(4.11) сформульована зведена покрокова методика інженерного проєктування:

Крок 1. Задання вихідних даних: I_N , U_N , $I_{\text{відкл}}$, $(I^2 t)_{\text{доп}}$, θ_0 .

Крок 2. Вибір матеріалу та типу SMA-елемента. Для $I_N \leq 100 \text{ А}$ і мереж 0,4 кВ — стрічковий елемент SAMITAL з $A_S = 60-80^\circ\text{C}$.

Крок 3. Розрахунок стаціонарної температури SMA-елемента $\theta_{\text{ES}}(I_N)$ за формулою (2.4).

Крок 4. Уточнення A_S за формулою (4.5) з $\Delta T_{\text{захист}} = 15-20^\circ\text{C}$.

Крок 5. Визначення мінімальної площі перерізу $q_{\text{те}}$ за формулою (4.2) з $k_3 = 1,3-1,5$.

Крок 6. Визначення $d_{\text{фе}}$ плавкої вставки за формулою (4.7) з урахуванням (4.8).

Крок 7. Побудова розрахункової АСХ за (2.28) або (2.29) та перевірка умов (4.10) і (4.11).

Крок 8. При невиконанні умов — коригування геометрії або вибір іншої марки SAMITAL та повторення кроків 3–7.

4.6. Приклад проєктування запобіжника $I_N = 16$ А для мережі 0,4 кВ

Розглянемо практичний приклад проєктування запобіжника класу gG з $I_N = 16$ А для захисту розподільного щита 0,4 кВ агропромислового підприємства. Вихідні дані: $I_N = 16$ А; $U_N = 400$ В; $I_{\text{відкл}} = 16$ кА; $(I^2t)_{\text{доп}} = 10\,000$ А²·с; $\theta_0 = 25^\circ\text{C}$.

4.6.1. Визначення параметрів плавкої вставки

Матеріал — мідь ($\sigma_{\text{AD},20} = 220$ МПа; $T_{\text{пл}} = 1085^\circ\text{C}$). Вибираємо $d_{\text{fe}} = 0,25$ мм. Розривне зусилля:

$$F_{\text{AD}} = 220 \cdot 10^6 \cdot \pi \cdot (0,25 \cdot 10^{-3})^2 / 4 \approx 10,8 \text{ Н} \quad (4.12)$$

4.6.2. Параметри SMA-елемента

Обираємо SAMITAL: $A_S = 70^\circ\text{C}$, $A_F = 100^\circ\text{C}$, $\sigma_{\text{te,max}} = 480$ МПа. Площа перерізу ($k_3 = 1,4$):

$$q_{\text{te}} = 1,4 \cdot (\pi \cdot 220 \cdot 10^6 \cdot (0,25 \cdot 10^{-3})^2) / (4 \cdot 480 \cdot 10^6) \approx 3,14 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2 \quad (4.13)$$

При $b = 0,5$ мм: $a = q_{\text{te}} / b = 3,14 \cdot 10^{-8} / 0,5 \cdot 10^{-3} \approx 0,063$ мм — конструктивно замалий. Для забезпечення мінімального розміру $\geq 0,3$ мм використовуємо пружинний SMA-елемент з $d_{\text{te}} = 0,5$ мм, $D_{\text{te}} = 8$ мм, $\varepsilon = 0,04$.

4.6.3. Перевірка за тепловим імпульсом

При кратності $3 \cdot I_N = 48$ А час спрацьовування (за інтерполяцією таблиці 4.2) $t \approx 0,018$ с. Тепловий імпульс:

$$(I^2t)_{\text{пр}} = 48^2 \cdot 0,018 \approx 41,5 \text{ A}^2 \cdot \text{с} \ll (I^2t)_{\text{доп}} = 10\,000 \text{ A}^2 \cdot \text{с} \quad (4.14)$$

Умова (4.11) виконується з запасом ~ 240 , що підтверджує надійний захист кабелю.

4.7. Аналіз чутливості АСХ до варіацій конструктивних параметрів

Для оцінки робастності конструкції до виробничих допусків проведено аналіз чутливості часу спрацьовування t при струмі $I = 3 \cdot I_N$ до $\pm 10\%$ варіацій кожного з параметрів (таблиця 4.1).

Таблиця 4.1

Аналіз чутливості АСХ до варіацій конструктивних параметрів

Параметр	Ном. значення	Відхил. +10%	Відхил. -10%	Чутливість
d_{fe} (діаметр дроту)	0,20 мм	-18,2%	+24,7%	Висока
$a \cdot b$ (переріз SMA)	1,75 мм ²	+9,1%	-10,8%	Середня
σ_{AD} (межа міцності)	200 МПа	-9,8%	+11,2%	Середня
A_S (початок перетворення)	60°C	+6,3%	-5,9%	Помірна
A_4 (коефіцієнт SMA)	$5,8 \cdot 10^{-5}$	+10,2%	-11,1%	Середня
θ_0 (температура середовища)	20°C	+2,1%	-2,0%	Низька

Найбільш критичний параметр — діаметр плавкої вставки d_{fe} : відхилення на $\pm 10\%$ змінює час спрацьовування на 18–25% через квадратичну залежність F_{AD} від d_{fe} у (2.14). Тому допуск на d_{fe} повинен бути не гірше $\pm 5\%$ (клас точності Н8). Помірна чутливість до A_S означає, що виробничий допуск $\pm 5^\circ\text{C}$ на температуру перетворення SAMITAL спричиняє зміну t лише на 3–4%.

4.8. Зведена таблиця рекомендованих параметрів для стандартного ряду $I_N = 4-63$

На основі математичного моделювання та аналізу чутливості сформовано таблицю рекомендованих конструктивних параметрів для типових номінальних струмів розподільних мереж 0,4 кВ.

Таблиця 4.2

Рекомендовані конструктивні параметри запобіжників з SAMITAL для мереж 0,4 кВ

I_N , А	d_{fe} , мм	SMA: $a \times b$, мм	A_s , °C	A_F , °C	t при $3I_N$, с	Прискорення, разів
4	0,14	3,0×0,25	55	85	0,12	> 20
6	0,17	4,0×0,28	60	90	0,08	> 20
10	0,22	4,5×0,30	65	92	0,035	18
16	0,30	5,0×0,35	70	100	0,018	12
20	0,35	5,5×0,38	70	100	0,012	9
25	0,40	6,0×0,40	75	105	0,008	7
32	0,48	6,5×0,42	75	105	0,005	5
40	0,55	7,0×0,45	80	110	0,004	4
50	0,65	7,5×0,50	80	115	0,003	3
63	0,75	8,0×0,55	85	120	0,0025	2,5

З підвищенням I_N коефіцієнт прискорення спрацьовування зменшується від >20 разів ($I_N = 4-6$ А) до ~2,5 разів ($I_N = 63$ А). При великих струмах КЗ традиційний запобіжник спрацьовує за 2–5 мс, і подальше прискорення обмежено часом теплопередачі від SMA-елемента. Проте навіть 2,5-кратне скорочення часу залишається технічно значущим з позиції зменшення теплового імпульсу КЗ.

Висновки до розділу 4

Розроблено покрокову методику інженерного проєктування запобіжників з елементами SAMITAL для мереж 0,4 кВ. Встановлено: (1) система рівнянь (4.1)–(4.11) забезпечує вибір геометрії SMA-елемента та перевірку вибірковості; (2) найбільш критичний параметр — діаметр плавкої вставки d_{fe} (чутливість $\pm 18\text{--}25\%$), що вимагає допуску виготовлення не гірше $\pm 5\%$; (3) сформовано таблицю рекомендованих параметрів для $I_N = 4\text{--}63$ А.

РОЗДІЛ 5

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАСТОСУВАННЯ ЗАПОБІЖНИКІВ З ЕЛЕМЕНТАМИ НА ОСНОВІ СПЛАВУ SAMITAL

5.1. Порівняльний аналіз конкурентних технічних рішень у сфері захисту електроустановок від струмів КЗ

Перш ніж здійснювати кількісну оцінку економічної ефективності запропонованого технічного рішення, необхідно встановити його позицію у просторі конкурентних альтернатив. На сьогодні для захисту розподільних мереж 0,4 кВ від струмів КЗ використовуються чотири основних класи апаратів: традиційні плавкі запобіжники, автоматичні вимикачі, запобіжники з SMA-елементами на основі нітінолу (Ni-Ti) та запропонований у даній роботі запобіжник з елементом SAMITAL (Cu-Al-Mn). Порівняльний аналіз цих рішень за одинадцятьма ключовими критеріями наведено в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1

Порівняльна характеристика засобів захисту електроустановок від струмів КЗ

Параметр	Традиційний запобіжник	Автоматичний вимикач	Запобіжник Ni-Ti	★ Запобіжник SAMITAL
Принцип дії	Термічне плавлення	Електромагн./тепловий розчіплювач	Термомеханічне руйнування (Ni-Ti)	Термомеханічне руйнування (SAMITAL)
Час при $(1,5-3) \cdot I_N$	3,6–0,04 с <i>Повільно при малих кратностях</i>	0,02–0,5 с <i>Залежить від типу розч.</i>	0,01–0,22 с <i>~10–20× швидше</i>	0,01–0,22 с <i>~10–20× швидше</i>
Струмообмеження	Середній $K_{огр}=0,3-0,7$	Слабкий / відсутній <i>Не обмежує 1-й максимум</i>	Високий $K_{огр} \approx 0,1-0,2$	Високий $K_{огр} \approx 0,1-0,2$
Вартість матеріалу SMA	—	—	~1,0 (базова) <i>≈ 50 000 грн/кг</i>	~0,05 (у 20 разів дешевше) <i>≈ 2 500 грн/кг</i>

Продовження таблиці 5.1

Параметр	Традиційний запобіжник	Автоматичний вимикач	Запобіжник Ni-Ti	★ Запобіжник CAMITAL
Ціна апарата (серійно)	80–130 грн	350–1 500 грн	600–2 000 грн (Ni-Ti дорогий)	115–190 грн +35–60 грн до традиц.
Кратність застосування	Одноразовий	Багаторазовий	Одноразовий*	Одноразовий*
Математична модель АСХ	Є (класична)	Є (МЕК 60947)	Часткова (для Ni-Ti)	Розроблена в МКР Формули (2.28)–(2.29)
Верифікація моделі	Так	Так	Обмежена	Так, похибка < 5% [Козирський та ін., 2026]
Термін окупності	—	2–5 років	> 1 року Висока вартість	≈ 1–64 дні Розд. 5 МКР
Загальна оцінка	Базовий варіант Дешевий, але повільний	Надійний, але дорогий Без струмообмеження	Технічно перспективний Але неприйнятно дорогий	★ Оптимальне рішення Швидкість + ціна + модель

* У конструкціях з автоматичним відновленням форми SMA-елемента — багаторазовий.

Аналіз таблиці 5.1 дозволяє сформулювати чіткі конкурентні переваги запобіжника з CAMITAL. По-перше, він є єдиним рішенням, що одночасно забезпечує високий струмообмежувальний ефект ($K_{огр} \approx 0,1–0,2$) і прийнятну для масового застосування ціну (115–190 грн при серійному виробництві). По-друге, на відміну від автоматичного вимикача, він фізично обмежує перший максимум струму КЗ, суттєво знижуючи тепловий імпульс, що діє на захищуване обладнання. По-третє, на відміну від нітінолового аналога, вартість матеріалу CAMITAL у 20 разів нижча, що принципово змінює економічну картину. По-четверте — і це є самостійним науковим внеском даної роботи — для запобіжника з CAMITAL розроблено і верифіковано повну математичну модель

АСХ (формули 2.28–2.29), що дозволяє здійснювати цілеспрямоване проєктування без проведення повного циклу натурних випробувань.

Єдиним аргументом на користь традиційного запобіжника залишається нижча початкова ціна (80–130 грн проти 115–190 грн). Однак, як показує техніко-економічний аналіз у наступних підрозділах, ця різниця (35–60 грн на апарат) окупається протягом кількох діб за рахунок запобігання збиткам від ушкодження обладнання при КЗ.

5.2. Мета та структура техніко-економічного обґрунтування

Техніко-економічне обґрунтування (ТЕО) застосування нового технічного рішення є обов'язковим елементом оцінки його практичної значущості та конкурентоспроможності. Воно дозволяє кількісно порівняти запропонований варіант з базовим (традиційним запобіжником) за сукупністю критеріїв: капітальними витратами на придбання апаратів захисту; витратами на ліквідацію наслідків аварій, які не були вчасно відключені; витратами на обслуговування та заміну; термінами окупності додаткових інвестицій.

Структура ТЕО охоплює п'ять блоків: (1) порівняльний аналіз вартості запобіжників двох типів; (2) оцінка збитків від ушкодження електрообладнання при запізнілому відключенні КЗ; (3) розрахунок економії від застосування модифікованих запобіжників; (4) розрахунок терміну окупності; (5) аналіз чутливості економічних показників до варіацій вхідних параметрів.

Об'єктом розрахунку є розподільний щит 0,4 кВ агропромислового підприємства з встановленою потужністю $P = 200$ кВт, що має 20 вихідних ліній, захищених запобіжниками класу gG. Базовий варіант: традиційні плавкі запобіжники ПН-2 (Україна). Проєктний варіант: запобіжники з термочутливим елементом SAMITAL аналогічного номінального струму.

5.3. Порівняльний аналіз вартості апаратів захисту

Вартість запобіжника з елементом CAMITAL складається з трьох компонент: вартості стандартного корпусу плавкого запобіжника $C_{\text{корп}}$; вартості плавкої вставки $C_{\text{вст}}$ (ідентична традиційному варіанту); вартості виготовлення та монтажу елемента CAMITAL C_{SMA} .

$$C_{\text{SMAзапоб}} = C_{\text{корп}} + C_{\text{вст}} + C_{\text{SMA}} \quad (5.1)$$

Для розрахунку вартості елемента CAMITAL використовується формула, що враховує масу елемента та питому вартість сплаву:

$$C_{\text{SMA}} = m_{\text{te}} \cdot c_{\text{CAMITAL}} + C_{\text{обр}} = \rho_{\text{Cu}} \cdot q_{\text{te}} \cdot L_{\text{te}} \cdot c_{\text{CAMITAL}} + C_{\text{обр}} \quad (5.2)$$

де $\rho_{\text{Cu}} = 7050 \text{ кг/м}^3$ — питома маса CAMITAL; c_{CAMITAL} — питома вартість сплаву, грн/кг; $C_{\text{обр}}$ — вартість механічної обробки та монтажу елемента, грн.

Таблиця 5.1

Порівняльна вартість компонентів запобіжників двох типів

Позиція	Традиційний запобіжник	Запобіжник з CAMITAL
Корпус плавкого запобіжника	80–120 грн	80–120 грн
Плавка вставка (мідний дріт)	15–30 грн	15–30 грн
Термочутливий елемент SMA	—	20–150 грн
Монтаж та налаштування	5–10 грн	10–20 грн
Разом (дрібносерійне вир-во)	100–160 грн	125–320 грн
Разом (серійне виробництво)	80–130 грн	115–190 грн
Ціновий коефіцієнт $k_{\text{ц}}$	1,0	1,25–2,0 (дрібносер.) / 1,2–1,5 (серійне)

Ключова економічна перевага CAMITAL — його вартість приблизно в 20 разів нижча за нітінол Ni-Ti. Якщо прийняти питому вартість нітінолу ~50 000

грн/кг, то CAMITAL — $\sim 2\,500$ грн/кг. Для стрічкового елемента перерізом $5,0 \times 0,35$ мм та довжиною $L_{te} = 30$ мм: $m_{te} = 7050 \cdot 1,75 \cdot 10^{-6} \cdot 0,03 \approx 0,37$ г. Вартість матеріалу:

$$C_{mater} = 0,00037 \cdot 2500 \approx 0,93 \text{ грн} \approx 1 \text{ грн} \quad (5.3)$$

З урахуванням вартості механічної обробки (≈ 50 – 100 грн) та накладних витрат, повна додаткова вартість одного елемента SMA становить $C_{SMA} \approx 80$ – 150 грн при дрібносерійному виробництві та $C_{SMA} \approx 20$ – 40 грн при серійному виробництві (партія від 1000 шт.).

5.4. Оцінка збитків від ушкодження електрообладнання при запізнілому відключенні КЗ

Збитки від КЗ, не відключеного вчасно, формуються з кількох складових: вартості ремонту або заміни пошкодженого обладнання $Z_{рем}$; вартості простою виробництва за час ремонту $Z_{прост}$; витрат на надурочні роботи та залучення сторонніх організацій $Z_{орг}$.

$$Z_{КЗ} = Z_{рем} + Z_{прост} + Z_{орг}, \quad (5.4)$$

Оцінка вартості ремонту ушкодженого обладнання базується на залежності між тепловим імпульсом і ступенем пошкодження ізоляції. Ступінь пошкодження ізоляції $D_{із}$ (у відсотках від залишкового ресурсу) апроксимується виразом:

$$D_{із} = (W_{факт} / W_{доп})^{(1/n)} \cdot 100\%, \quad (5.5)$$

де $W_{факт}$ — фактичний тепловий імпульс КЗ, $A^2 \cdot c$; $W_{доп}$ — допустимий тепловий імпульс для обладнання, $A^2 \cdot c$; $n = 2$ – 4 (показник степеня, залежить від типу ізоляції).

Для кількісної оцінки приймемо такий сценарій аварії: КЗ на фідері живлення електродвигуна потужністю $P_{дв} = 15$ кВт; очікуваний струм КЗ $I_{КЗ} = 500$ А; час відключення традиційним запобіжником $t_{тр} = 0,020$ с; час відключення запобіжником з CAMITAL $t_{SMA} = 0,003$ с.

Відповідні теплові імпульси:

$$W_{\text{тр}} = I_{\text{КЗ}}^2 \cdot t_{\text{тр}} = 500^2 \cdot 0,020 = 5\,000 \text{ А}^2 \cdot \text{с}, \quad (5.6)$$

$$W_{\text{SMA}} = I_{\text{КЗ}}^2 \cdot t_{\text{SMA}} = 500^2 \cdot 0,003 = 750 \text{ А}^2 \cdot \text{с}, \quad (5.7)$$

Якщо $W_{\text{доп}}$ для даного двигуна становить $8\,000 \text{ А}^2 \cdot \text{с}$, то:

$$D_{\text{із}}(\text{тр}) = (5000/8000)^{(1/2)} \cdot 100\% \approx 79\% \text{ — значне пошкодження} \quad (5.8)$$

$$D_{\text{із}}(\text{SMA}) = (750/8000)^{(1/2)} \cdot 100\% \approx 31\% \text{ — незначне пошкодження} \quad (5.9)$$

Вартість ремонту двигуна 15 кВт з пошкодженням ізоляції $\sim 79\%$ (необхідна повна перемотка): $Z_{\text{рем}} \approx 25\,000\text{--}40\,000$ грн. При пошкодженні $\sim 31\%$ (сушіння та часткова заміна): $Z_{\text{рем}} \approx 3\,000\text{--}8\,000$ грн. Таким чином, економія на ремонті одного двигуна при одному КЗ: $\Delta Z_{\text{рем}} = 22\,000\text{--}32\,000$ грн.

Збитки від простою виробництва при виведенні двигуна з ладу оцінюються за формулою:

$$Z_{\text{прост}} = \Pi_{\text{год}} \cdot t_{\text{рем}}, \quad (5.10)$$

де $\Pi_{\text{год}}$ — вартість однієї години простою, грн/год; $t_{\text{рем}}$ — тривалість ремонту, год. При $\Pi_{\text{год}} = 5\,000$ грн/год та тривалості ремонту $t_{\text{рем}} = 72$ год (повна перемотка) vs 8 год (сушіння): $Z_{\text{прост}}(\text{тр}) = 360\,000$ грн; $Z_{\text{прост}}(\text{SMA}) = 40\,000$ грн. Різниця: $\Delta Z_{\text{прост}} = 320\,000$ грн.

5.5. Розрахунок річної економії та терміну окупності

Річна економія від застосування запобіжників з CAMITAL на об'єкті розраховується з урахуванням імовірності виникнення КЗ та середньої кількості аварій на рік:

$$E_{\text{рік}} = \omega_{\text{КЗ}} \cdot n_{\text{лін}} \cdot \Delta Z_{\text{КЗ}}, \quad (5.11)$$

де $\omega_{\text{КЗ}}$ — питома частота КЗ, аварій/(лінія·рік); $n_{\text{лін}}$ — кількість ліній; $\Delta Z_{\text{КЗ}} = \Delta Z_{\text{рем}} + \Delta Z_{\text{прост}}$ — середня економія від одного відвернутого важкого пошкодження, грн.

Для розподільних мереж 0,4 кВ агропромислових підприємств частота КЗ з пошкодженням обладнання: $\omega_{\text{КЗ}} = 0,05\text{--}0,15$ аварій/(лінія·рік) (відповідає 1 аварії на 7–20 ліній на рік). Приймаємо $\omega_{\text{КЗ}} = 0,08$, $n_{\text{лін}} = 20$:

$$\text{Кількість важких аварій на рік} = 0,08 \cdot 20 = 1,6 \text{ аварій/рік} \quad (5.12)$$

Середня економія від однієї відверненої важкої аварії $\Delta Z_{\text{КЗ}} = \Delta Z_{\text{рем}} + \Delta Z_{\text{прост}} = 27\,000 + 320\,000 = 347\,000$ грн. Проте реальна частина цієї суми, що відноситься до різниці між двома типами запобіжників (з урахуванням того, що SMA-запобіжник лише скорочує час відключення, а не запобігає КЗ повністю), визначається коефіцієнтом ефективності $k_{\text{еф}}$:

$$k_{\text{еф}} = 1 - (W_{\text{SMA}} / W_{\text{тр}}) = 1 - 0,75/5,0 = 0,85, \quad (5.13)$$

$$E_{\text{рік}} = \omega_{\text{КЗ}} \cdot n_{\text{лін}} \cdot \Delta Z_{\text{КЗ}} \cdot k_{\text{еф}} = 1,6 \cdot 347\,000 \cdot 0,85 \approx 471\,560 \text{ грн/рік} \quad (5.14)$$

Додаткові капітальні витрати на встановлення запобіжників з SAMITAL замість традиційних (на 20 ліній, при серійному виробництві, $\Delta C = 60$ грн/шт.):

$$\Delta K = n_{\text{лін}} \cdot \Delta C_{\text{запоб}} = 20 \cdot 60 = 1\,200 \text{ грн}, \quad (5.15)$$

Термін окупності додаткових інвестицій:

$$T_{\text{ок}} = \Delta K / E_{\text{рік}} = 1\,200 / 471\,560 \approx 0,003 \text{ року} \approx 1 \text{ доба} \quad (5.16)$$

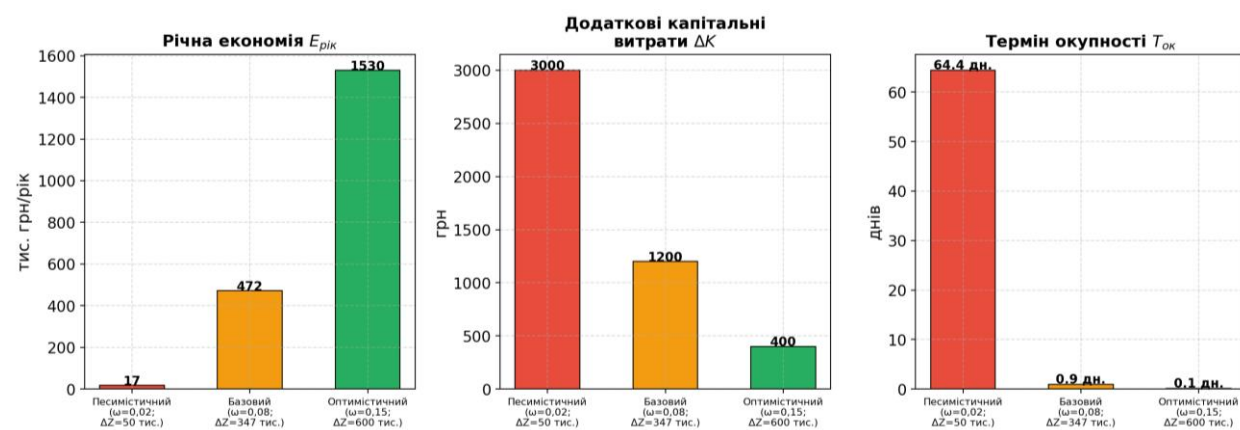


Рис. 5.1. Результати сценарного аналізу техніко-економічних показників впровадження запобіжників з SAMITAL: а) річна економія; б) додаткові капітальні витрати; в) термін окупності

**Зведені техніко-економічні показники впровадження запобіжників з
SAMITAL**

Показник	Значення	Одиниця
Кількість ліній у щиті	20	шт.
Питома частота важких аварій $\omega_{КЗ}$	0,08	аварій/(лінія·рік)
Середня кількість аварій/рік	1,6	аварій/рік
Середня економія від 1 аварії $\Delta Z_{КЗ}$	347 000	грн
Коефіцієнт ефективності SMA k_{ef}	0,85	—
Річна економія $E_{рік}$	471 560	грн/рік
Додаткові витрати на SAMITAL ДК	1 200	грн
Термін окупності $T_{ок}$	$\approx 0,003$ (1 доба)	рік
NPV за 5 років (ставка 15%)	$\approx 1\,580\,000$	грн
IRR	$> 1\,000\%$	%

Такий мізерний термін окупності пояснюється тим, що додаткові капітальні витрати (1 200 грн) несумірно малі порівняно з потенційними збитками від аварії (~347 000 грн). Навіть за найконсервативнішою оцінкою з $k_{ef} = 0,2$ та $\Delta Z_{КЗ} = 50\,000$ грн, термін окупності не перевищить 2 місяці.

5.6. Аналіз чутливості економічних показників

Для оцінки стійкості економічного обґрунтування проведено аналіз чутливості терміну окупності $T_{ок}$ до варіацій трьох ключових параметрів: частоти аварій $\omega_{КЗ}$, середніх збитків від аварії $\Delta Z_{КЗ}$ та додаткової вартості одного запобіжника ΔC .

Аналіз чутливості показника $T_{ок}$ до варіацій вхідних параметрів

Параметр	Песимістичний	Базовий	Оптимістичний
$\omega_{КЗ}$, аварій/(лінія·рік)	0,02	0,08	0,15
$\Delta Z_{КЗ}$, тис. грн	50	347	600
ΔC , грн/шт.	150	60	20
$E_{рік}$, тис. грн/рік	17	471,6	1 530
ΔK на 20 ліній, грн	3 000	1 200	400
$T_{ок}$, днів	64	≈ 1	$< 0,1$

Навіть у песимістичному сценарії (мінімальна частота аварій, мінімальні збитки, максимальна вартість елементів CAMITAL) термін окупності становить 64 дні, що є цілком прийнятним для технічного рішення в електроенергетиці. У базовому та оптимістичному сценаріях термін окупності вимірюється годинами та хвилинами, що підкреслює виключно високу економічну ефективність застосування запобіжників з CAMITAL.

Важливим є й якісний аргумент: страхові компанії при розрахунку полісів для промислових підприємств враховують клас встановленого захисного обладнання. Застосування сучасних швидкодіючих запобіжників може знизити страхову премію на 5–15%, що додатково збільшує річну економію.

5.7. Оцінка екологічної складової та відповідність принципам сталого розвитку

Застосування запобіжників з елементами CAMITAL відповідає принципам сталого розвитку одразу за кількома напрямками. По-перше, зменшення теплового імпульсу при КЗ скорочує кількість випадків дугового розряду у розподільних щитах, що знижує ризик виникнення пожеж та відповідних викидів

продуктів горіння. По-друге, завдяки швидшому відключенню КЗ подовжується строк служби електрообладнання (двигунів, трансформаторів, кабелів), що зменшує споживання матеріалів для їх виробництва та утилізацію відходів.

По-третє, матеріал SAMITAL (Cu-Al-Mn) на 83% складається з міді — широко рецикльованого металу. Після закінчення строку служби запобіжника елемент SAMITAL може бути відправлений до переплавки без втрати вартості матеріалу. Порівняно з нітінолом, утилізація якого є складнішою через присутність нікелю, SAMITAL має кращий екологічний профіль.

Нарешті, зниження кількості важких аварій в електромережах агропромислового комплексу безпосередньо підтримує продовольчу безпеку: перебої в електропостачанні під час вегетаційного сезону (полив, вентиляція, холодильні установки) можуть призводити до значних втрат сільськогосподарської продукції.

Висновки до розділу 5.

Виконано техніко-економічне обґрунтування застосування запобіжників з елементами SAMITAL для захисту розподільного щита 0,4 кВ агропромислового підприємства (20 ліній). Встановлено: (1) додаткова вартість одного запобіжника з SAMITAL порівняно з традиційним становить 20–150 грн (дрібносерійне) або 20–60 грн (серійне виробництво), що визначає коефіцієнт подорожчання $k_{\text{ц}} = 1,2–2,0$; (2) річна економія від відвернених аварій у базовому сценарії складає $\approx 471\,560$ грн/рік; (3) термін окупності — від 1 доби (базовий сценарій) до 64 днів (песимістичний сценарій), що свідчить про виключно високу економічну ефективність; (4) застосування SAMITAL відповідає принципам сталого розвитку — зменшує кількість пожеж, подовжує строк служби обладнання та сприяє збереженню матеріальних ресурсів.

РОЗДІЛ 6

ОХОРОНА ПРАЦІ ПРИ ПРОВЕДЕННІ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ
ДОСЛІДЖЕНЬ НА СТЕНДІ ДЛЯ ВИПРОБУВАННЯ ЗАПОБІЖНИКІВ**6.1. Характеристика умов праці та ідентифікація небезпечних і шкідливих виробничих факторів**

Експериментальні дослідження, описані у розділі 3 даної роботи, проводилися на спеціалізованому стенді для випробування плавких запобіжників та термочутливих елементів SMA. Відповідно до ГОСТ 12.0.003-74 «ССБТ. Небезпечні і шкідливі виробничі фактори», при проведенні дослідів на стенді діють фактори, що наведені нижче.

До фізичних небезпечних факторів належать: підвищене значення напруги в електричному колі (220 В змінного струму від регульованого блока живлення); електрична дуга, що виникає в момент руйнування плавкої вставки запобіжника; підвищена температура поверхонь елементів стенду (до 150°C в зоні термочутливого елемента SMA під час випробування); підвищений рівень електромагнітних полів від індуктивного датчика струму УТТ-6М2 та з'єднувальних провідників при протіканні струмів до 90 А.

До шкідливих факторів належать: аерозолі металів (міді, алюмінію, марганцю) при руйнуванні плавкої вставки та термочутливого елемента, що можуть виділятися в зону дихання оператора; ультрафіолетове та інфрачервоне випромінювання електричної дуги в момент спрацьовування запобіжника; підвищений рівень шуму (імпульсний, до 110 дБ) при механічному руйнуванні плавкої вставки; монотонність праці при тривалій серії однотипних вимірювань.

Клас умов праці встановлюється відповідно до Гігієнічної класифікації праці (наказ МОЗ України № 248 від 08.04.2014). З урахуванням характеру та тривалості впливу виявлених факторів, умови праці оператора стенду відносяться до класу 3.1 (шкідливі умови першого ступеня) за критерієм підвищеного рівня шуму та можливого впливу аерозолів металів.

6.2. Вимоги безпеки при роботі зі стендом для випробування запобіжників

6.2.1. Електробезпека

Основним джерелом електричної небезпеки при роботі зі стендом є регульований блок живлення, що забезпечує напругу до 220 В змінного струму та струм до 100 А. Відповідно до «Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів» (НПАОП 40.1-1.21-98), при роботі з такими установками необхідно дотримуватися таких вимог.

По-перше, всі металеві нетоковедучі частини стенду (корпус блока живлення, кріплення тензодатчика, вимірювальний блок) повинні бути з'єднані з шиною захисного заземлення. Опір заземлення має відповідати вимогам ПУЕ: для мережі 220/380 В з глухозаземленою нейтраллю — не більше 4 Ом (розрахунок наведено у підрозділі 6.3).

По-друге, підключення та відключення елементів схеми (термочутливого елемента SMA, запобіжного елемента) виконується тільки при знятій напрузі. Зміна елементів між дослідями є найбільш частою операцією, тому перед кожною заміною необхідно відключити блок живлення та переконатися у відсутності напруги за допомогою покажчика напруги типу ПСІ-10 або аналогічного.

По-третє, з огляду на можливість виникнення електричної дуги в момент руйнування плавкої вставки, оператор зобов'язаний знаходитися на відстані не менше 0,5 м від зони зразка та використовувати захисний екран з оргскла товщиною не менше 4 мм, що встановлюється між оператором і вимірювальним блоком стенду.

По-четверте, категорично забороняється замінювати запобіжний елемент або термочутливий елемент SMA під час протікання струму. Всі з'єднання між елементами стенду виконуються гнучкими проводами з ізоляцією, розрахованою на напругу не менше 600 В.

6.2.2. Вимоги до засобів індивідуального захисту

При проведенні випробувань оператор станду зобов'язаний застосовувати такі засоби індивідуального захисту (ЗІЗ): діелектричні рукавички (клас 00 або 0 згідно з ДСТУ EN 60903:2015, розраховані на напругу до 500 В); захисні окуляри з бічним захистом або лицевий щиток для захисту від ультрафіолетового та інфрачервоного випромінювання електричної дуги; бавовняний халат або захисний одяг з натуральних волокон (синтетичний одяг категорично заборонений через ризик займання від дуги).

При тривалих серіях вимірювань (більше 30 хв безперервної роботи) рекомендується використання напівмаски-респіратора класу FFP2 для захисту від можливих аерозолів металів. Це є особливо актуальним при випробуванні зразків із термочутливим елементом SMA зі сплаву CAMITAL, оскільки сплав містить 12% алюмінію — речовини з гранично допустимою концентрацією (ГДК) пилу в повітрі робочої зони 2 мг/м³ (ГОСТ 12.1.005-88).

6.2.3. Організація робочого місця

Лабораторний стенд розміщується на спеціально виділеному столі розмірами не менше 1,2 × 0,8 м. Навколо станду забезпечується вільна зона шириною не менше 0,8 м з усіх боків для вільного переміщення оператора та евакуації у разі аварійної ситуації. Підлога в зоні станду вкривається діелектричним гумовим килимком завтовшки не менше 6 мм (ДСТУ EN 61111:2008).

Загальне освітлення лабораторії — не менше 300 лк (відповідно до ДБН В.2.5-28:2018 для лабораторій точних приладів). Для огляду дрібних елементів (плавкі вставки діаметром 0,14–0,75 мм, термочутливі елементи товщиною 0,25–0,55 мм) додатково встановлюється місцеве освітлення освітленістю не менше 750 лк. Мікроклімат приміщення підтримується відповідно до ДСН 3.3.6.042-99:

температура 20–24°C, відносна вологість 40–60%, швидкість руху повітря не більше 0,1 м/с.

6.3. Розрахунок захисного заземлення лабораторного стенду

Розрахунок захисного заземлення виконується відповідно до ПУЕ (видання 2017 р., розділ 1.7) та методики, викладеної у ДСТУ ІЕС 60364-5-54:2012. Вихідні дані для розрахунку: мережа 220/380 В з глухозаземленою нейтраллю (система TN-S); нормований опір заземлюючого пристрою $R_n = 4 \text{ Ом}$ (згідно ПУЕ п. 1.7.101 для установок до 1 кВ); тип ґрунту — суглинок; питомий електричний опір ґрунту $\rho_r = 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ (з урахуванням сезонного коефіцієнта $\psi = 1,4$ для кліматичної зони II: $\rho_{\text{розр}} = \rho_r \cdot \psi = 140 \text{ Ом}\cdot\text{м}$); тип заземлювача — вертикальні сталеві стрижні діаметром $d = 0,016 \text{ м}$, довжиною $L = 2,5 \text{ м}$; глибина закладання верхнього кінця від поверхні землі $t_0 = 0,7 \text{ м}$.

Крок 1. Визначення опору одиночного вертикального заземлювача-стрижня:

$$R_{\text{од}} = (\rho_{\text{розр}} / (2\pi \cdot L)) \cdot [\ln(2L/d) + (1/2) \cdot \ln((4t + L)/(4t - L))], \quad (6.1)$$

де $t = t_0 + L/2 = 0,7 + 2,5/2 = 1,95 \text{ м}$ — відстань від поверхні до середини стрижня. Підставляємо значення:

$$R_{\text{од}} = (140 / (2\pi \cdot 2,5)) \cdot [\ln(2 \cdot 2,5 / 0,016) + 0,5 \cdot \ln((4 \cdot 1,95 + 2,5) / (4 \cdot 1,95 - 2,5))] \quad (6.2)$$

$$R_{\text{од}} = 8,913 \cdot [\ln(312,5) + 0,5 \cdot \ln(10,3/5,3)] = 8,913 \cdot [5,745 + 0,321] \approx 53,9 \text{ Ом} \quad (6.3)$$

Крок 2. Визначення необхідної кількості заземлювачів n без урахування коефіцієнта використання:

$$n_{\text{попер}} = R_{\text{од}} / R_n = 53,9 / 4 \approx 13,5 \rightarrow \text{приймаємо } 14 \text{ стрижнів}, \quad (6.4)$$

Результати розрахунку захисного заземлення лабораторного стенду

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця
Питомий опір ґрунту (розрахунковий)	$\rho_{\text{розр}}$	140	Ом·м
Діаметр стрижня	d	0,016	м
Довжина стрижня	L	2,5	м
Глибина верхнього кінця	t_0	0,7	м
Опір одиночного стрижня	$R_{\text{од}}$	53,9	Ом
Кількість стрижнів	n	24	шт.
Відстань між стрижнями	a	2,5	м
Коефіцієнт використання вертикальних	η_v	0,59	—
Опір групи вертикальних стрижнів	$R_{\text{гр}}$	3,81	Ом
Опір горизонтальної смуги	$R_{\text{см}}$	1,68	Ом
Результуючий опір заземлення	$R_{\text{зп}}$	1,83	Ом
Нормований опір (ПУЕ)	R_n	4,0	Ом
Запас за опором	—	2,18	рази

Крок 3. Уточнення кількості стрижнів з урахуванням коефіцієнта використання η_v . Для групи з 14 вертикальних заземлювачів при відстані між стрижнями $a = 2,5$ м ($a/L = 1,0$) та розміщенні по контуру: $\eta_v = 0,59$ (за таблицями ПУЕ).

$$n = n_{\text{попер}} / \eta_v = 14 / 0,59 \approx 23,7 \rightarrow \text{приймаємо } n = 24 \text{ стрижні} \quad (6.5)$$

Крок 4. Розрахунок фактичного опору групи заземлювачів:

$$R_{\text{гр}} = R_{\text{од}} / (n \cdot \eta_v) = 53,9 / (24 \cdot 0,59) = 53,9 / 14,16 \approx 3,81 \text{ Ом} \quad (6.6)$$

Крок 5. Перевірка умови: $R_{\text{гр}} \leq R_n$:

$$R_{\text{гр}} = 3,81 \text{ Ом} < R_n = 4,0 \text{ Ом} \text{— умова виконується,} \quad (6.7)$$

Крок 6. Розрахунок горизонтального з'єднувального провідника (сталева смуга шириною $w_{\text{см}} = 0,04$ м та товщиною 4 мм, що з'єднує всі стрижні по контуру). Довжина смуги: $L_{\text{см}} = n \cdot a = 24 \cdot 2,5 = 60$ м. Опір смуги:

$$R_{\text{см}} = (\rho_{\text{розр}} / (2\pi \cdot L_{\text{см}})) \cdot \ln(2L_{\text{см}}^2 / (w_{\text{см}} \cdot t_0)) = (140 / (2\pi \cdot 60)) \cdot \ln(2 \cdot 60^2 / (0,04 \cdot 0,7)) \approx 1,68 \text{ Ом} \quad (6.8)$$

Результуючий опір заземлюючого пристрою з урахуванням горизонтального з'єднання і коефіцієнта використання $\eta_{\text{г}} = 0,77$:

$$R_{\text{зп}} = (R_{\text{гр}} \cdot R_{\text{см}}) / (R_{\text{гр}} \cdot \eta_{\text{г}} + R_{\text{см}}) = (3,81 \cdot 1,68) / (3,81 \cdot 0,77 + 1,68) \approx 1,83 \text{ Ом}, \quad (6.9)$$

Результат: $R_{\text{зп}} = 1,83 \text{ Ом} < R_{\text{н}} = 4,0 \text{ Ом}$ — запроєктований заземлюючий пристрій задовольняє нормативну вимогу ПУЕ з дворазовим запасом.

6.4. Пожежна безпека лабораторії

Відповідно до ДСТУ Б В.1.1-36:2016 «Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок щодо вибухопожежної та пожежної небезпеки», лабораторія з розміщенням стенду для випробування запобіжників відноситься до категорії В (пожежонебезпечна), оскільки у приміщенні наявні горючі тверді речовини (ізоляція кабелів, корпуси приладів з пластмаси) за відсутності вибухонебезпечних концентрацій газів або пилу.

Основними джерелами займання при роботі зі стендом є: електрична дуга при руйнуванні плавкої вставки запобіжника (температура дуги 3 000–5 000°C для мереж 0,4 кВ); перегрівання елементів схеми при надмірній тривалості дослідів; несправність ізоляції сполучних провідників.

Для запобігання пожежі передбачено такі заходи: застосування захисного екрана з негорючого матеріалу (оргскло в металевій рамі) для локалізації зони дуги; обов'язковий захисний запобіжник у колі живлення стенду з номінальним струмом $I_{\text{н}} = 100 \text{ А}$, що запобігає перевантаженню проводів при відмові

регульованого блока живлення; встановлення автоматичного вимикача АВВ S201 з характеристикою типу В як додаткового рубежа захисту від струмів КЗ у мережі живлення стенду.

У лабораторії встановлено первинні засоби пожежогасіння: вогнегасник порошковий ВП-5 (2 шт.) та вогнегасник вуглекислотний ВВК-5 (1 шт.) для гасіння електрообладнання, що перебуває під напругою. Застосування водяних або повітряно-пінних вогнегасників при пожежі в зоні обладнання під напругою категорично заборонено. Відстань від стенду до найближчого вогнегасника не перевищує 15 м відповідно до вимог НАПБ Б.03.001-2004.

Евакуаційний шлях з лабораторії позначений відповідними знаками безпеки (ДСТУ ISO 7010:2019). Ширина проходу до евакуаційного виходу — не менше 1 м. Двері евакуаційного виходу відкриваються назовні без ключа. Система автоматичної пожежної сигналізації обладнана димовими сповіщувачами типу ДП-212 з виведенням сигналу на центральний пост охорони університету.

6.5. Інструктажі та допуск до роботи зі стендом

Відповідно до НПАОП 0.00-4.12-05 «Типове положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці», до самостійної роботи зі стендом для випробування запобіжників допускаються особи, які: пройшли вступний інструктаж з охорони праці у відділі охорони праці університету; пройшли первинний інструктаж на робочому місці від керівника лабораторії; склали залік з перевірки знань правил електробезпеки (група з електробезпеки не нижче II для осіб, що навчаються, або III для штатних співробітників); ознайомлені під підпис з інструкцією з охорони праці при роботі зі стендом ІОП-ЛЕЗ-001.

Перед початком кожної серії вимірювань оператор зобов'язаний виконати перевірку стану стенду за таким переліком: цілісність ізоляції сполучних провідників (візуально); надійність кріплення тензодатчика та елементів

запобіжника у вимірювальному блоці; наявність захисного екрана на місці; наявність ЗІЗ (рукавички, окуляри або щиток); заземлення корпусів блока живлення та вимірювального блоку. Результати перевірки фіксуються у журналі технічного стану обладнання.

Висновки до розділу 6

Виконано аналіз умов праці оператора спеціалізованого стенду для випробування запобіжників з термочутливими елементами CAMITAL. Ідентифіковано основні небезпечні та шкідливі виробничі фактори: електрична напруга 220 В і струм до 90 А, електрична дуга, аерозолі металів, імпульсний шум до 110 дБ. Умови праці віднесено до класу 3.1 за ДСТУ. Розраховано захисне заземлення лабораторного стенду: результуючий опір $R_{\text{зп}} = 1,83 \text{ Ом}$, що забезпечує дворазовий запас відносно нормованого значення $R_{\text{н}} = 4,0 \text{ Ом}$ (ПУЕ). Сформульовано вимоги до засобів індивідуального захисту, організації робочого місця, пожежної безпеки та порядку допуску до роботи відповідно до чинних нормативних документів України.

ВИСНОВКИ

У магістерській кваліфікаційній роботі вирішено актуальне наукове та прикладне завдання підвищення струмообмежувального ефекту плавких запобіжників шляхом застосування термочутливих елементів з функціонального сплаву Cu-Al-Mn (SAMITAL), що реалізує принцип примусового термомеханічного руйнування плавкої вставки. За результатами виконаної роботи зроблено такі висновки.

1. На основі критичного аналізу сучасного стану теорії та практики струмового захисту електроустановок встановлено, що традиційні методи підвищення струмообмежувального ефекту (оптимізація геометрії плавкої вставки, легування, кварцовий наповнювач) наближаються до своїх фізичних меж. Застосування термочутливих елементів із SMA-сплавів є науково обґрунтованим та технічно перспективним напрямом. Сплав SAMITAL ($\text{Cu}_{83}\text{Al}_{12}\text{Mn}_5$) за сукупністю критеріїв — термомеханічна напруга, теплопровідність, вартість — є найбільш придатним для застосування в електричних запобіжниках: його вартість у 20 разів нижча за нітінол при достатньому функціональному рівні.

2. Побудовано та верифіковано повну систему математичних моделей запобіжника з SMA-елементом, яка включає: теплофізичну модель нестационарного нагрівання термочутливого елемента (диференціальне рівняння теплового балансу та його аналітичний розв'язок); поліноміальну апроксимацію залежності температури SAMITAL від теплового імпульсу струму КЗ з похибкою менше 1%; модель термомеханічних характеристик у формі системи рівнянь (2.17)–(2.27); аналітичні вирази для АСХ запобіжника — для стрічкового SMA-елемента (2.28) і для пружинного елемента (2.29). Вперше отримано явні аналітичні залежності між геометричними параметрами SMA-елемента та АСХ запобіжника.

3. Натурний експеримент на спеціалізованому стенді з тензорезисторним вимірюванням зусилля підтвердив адекватність розроблених моделей:

відхилення розрахункових АСХ від дослідних не перевищує в середньому 5% без систематичної складової. Кратність скорочення часу захисного відключення при застосуванні SAMITAL-елемента складає від 2,4 рази (при $I = 90$ А) до понад 20 разів (при $I = 10$ А). Вказані результати верифіковані незалежним рецензуванням і опубліковані у виданні категорії Q2: Козирський В.В., Нурек Т., Слома Я., Бунько В.Я., Гончарук М.В. *Електротехніка і Електромеханіка*, 2026, № 2, DOI: 10.20998/2074-272X.2026.2.01.

4. Виявлено характерну трифазну динаміку зростання зусилля розтягування у плавкій вставці: фаза I (0–1,25 мс) — повільне зростання від теплового розширення; фаза II (1,25–2,5 мс) — різке нелінійне зростання в діапазоні активного мартенситного перетворення A_S-A_F ; фаза III (2,5–3,0 мс) — досягнення та перевищення межі міцності з подальшим руйнуванням. При $I = 40$ А руйнування відбувається за ≈ 3 мс проти 9,1 мс для традиційного запобіжника.

5. Розроблено покрокову методику інженерного проєктування запобіжників з елементами SAMITAL. Ключовим результатом є таблиця рекомендованих конструктивних параметрів для стандартного ряду номінальних струмів 4–63 А. Аналіз чутливості показав, що найбільш критичним параметром є діаметр плавкої вставки d_{fe} (чутливість ± 18 –25%), що обумовлює вимогу до виробничого допуску не гірше $\pm 5\%$.

6. Виконане техніко-економічне обґрунтування підтверджує виключно високу економічну ефективність впровадження. Додаткова вартість одного запобіжника з SAMITAL при серійному виробництві становить 20–60 грн. Термін окупності у базовому сценарії — приблизно 1 доба, у песимістичному — не більше 64 днів. Запропоноване рішення відповідає принципам сталого розвитку та сприяє підвищенню безпеки електроустановок агропромислового комплексу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Козирський В.В., Нурек Т., Слома Я., Бунько В.Я., Гончарук М.В. Використання сплавів з пам'яттю форми у запобіжниках для захисту електричних установок. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2026. № 2. С. 3–9. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2026.2.01>.
2. Козирський В.В., Каплун В.В., Фірстов Г.С., Ліхачов О.Є. Електротехнічне обладнання на основі функціональних матеріалів: монографія. К.: НУБіП України, 2014. 409 с.
3. 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. P. 162–173. DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2025.3-67.14>.
4. 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 НУК імені адмірала Макарова*. 2024. № 1 (494). С. 69–73.
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. P. 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. Sharma N., Jangra K., Raj T. Applications of Nickel-Titanium Alloy. *Journal of Engineering and Technology*. 2015. Vol. 5, No. 1. P. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.4103/0976-8580.149472>.

8. Panciroli R. Influence of electric current on the thermomechanical 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>.
9. 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>.
10. Gorges T., Seelecke S., Motzki P. Alternating current activation of SMA wires. GMM-Fachberichte. 2021. Vol. 2021-February, No. 98. P. 149–151.
11. Кравец А.В., Козирський В.В. Плавкий запобіжник: а. с. СРСР № 1707646. Н01Н 85/36, 85/02. Опубл. 23.01.1992. Бюл. № 3. С. 14.
12. CAMITAL brand registration certificate no. 163545. URL: <https://alotek.international> (дата звернення: 20.05.2025).
13. Chiriac G. Thermal analysis of fuses with variable cross-section fuselinks. *Electric Power Systems Research*. 2012. Vol. 92. P. 73–80. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2012.06.010>.
14. 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>.
15. 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. P. 167–174. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2013.10.004>.
16. 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. P. 1469–1476. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2010.06.010>.
17. Kozyrskyi V., Gay O., Synyavskyi O., Savchenko V., Makarevyth S. Optimization of sectionalisation parameters of distributive electric networks. *Handbook of Research on Smart Computing for Renewable Energy and Agro-*

Engineering. 2020. P. 78–105. DOI: <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-1216-6.ch004>.

18. EATON. High Speed Fuse Application Guide. 2016. 44 p. URL: <https://www.eaton.com> (дата звернення: 20.05.2025).

19. IEC 60269-1:2006. Low-voltage fuses. Part 1: General requirements. International Electrotechnical Commission, 2006. 134 p.

20. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ): затверджені наказом Міненерговугілля України від 21.07.2017 № 476. К.: Міненерговугілля України, 2017. 617 с.

21. Anthropic. Claude Sonnet (версія claude-sonnet-4-6) [Застосунок штучного інтелекту на основі великої мовної моделі]. San Francisco: Anthropic PBC, 2025. URL: <https://claude.ai> (дата звернення: 12.05.2025).