

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ,
МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ТЕХНОЛОГІЙ ТА ДИЗАЙНУ

**МЕТОДИ,
ТЕХНОЛОГІЇ ТА ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ
ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ
ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ
НА ОСНОВІ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ**

Монографія

Рекомендовано Вченою радою
Київського національного університету технологій та дизайну
для спеціальності «Електронні пристрої та системи»

К И Ї В
КНУТД
2 0 1 2

АНОТАЦІЯ	5
ПЕРЕДМОВА	6
РОЗДІЛ 1. ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ СПЛАВІВ З ПАМ'ЯТТЮ ФОРМИ В ЕНЕРГЕТИЦІ	9
РОЗДІЛ 2. ЯВИЩА ЕФЕКТИВ ПАМ'ЯТІ ФОРМИ І НАДПРУЖНОСТІ. ФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ СПЛАВІВ	20
2.1. Сплави з ефектами пам'яті форми та над пружності	20
2.1.1. Загальні положення	20
2.1.2. Фізичні властивості та основні характеристики сплавів з ЕПФ	21
2.1.3. Методи визначення температури точок фазових перетворень у сплавах з ЕПФ	26
2.1.4. Серійні сплави з ЕПФ та їх особливості і характеристики	29
РОЗДІЛ 3. ОБҐРУНТУВАННЯ ПРИНЦИПІВ КОНТРОЛЮ ТЕМПЕРАТУРИ ТА ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ВІД АВАРІЙНИХ РЕЖИМІВ НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ ЯВИЩА ЕФЕКТУ ПАМ'ЯТІ ФОРМИ	37
3.1. Методи та засоби контролю температурного режиму електроустановок систем електропостачання	38
3.1.1. Контроль температурного режиму контактних з'єднань електроустановок	40
3.1.2. Термореле для контролю температури електроустановок	42
3.2. Обґрунтування принципів контролю температури контактних з'єднань на основі використання явища ефекту пам'яті форми	46
3.3. Обґрунтування принципів захисту електроустановок від коротких замикань та перевантажень на основі явища ефекту пам'яті форми	46
3.3.1. Особливості властивостей сплавів з ефектом пам'яті форми при прямому нагріванні електричним струмом	46
3.3.2. Обґрунтування технічних принципів запобіжників з термомеханічним руйнуванням вставки	49
3.3.3. Обґрунтування технічних принципів виконання приводних елементів розчіплювачів автоматичних вимикачів	51
3.3.4. Математичне моделювання параметрів та характеристик запобіжників з термомеханічним руйнуванням вставки	56
3.3.5. Математичне моделювання параметрів та характеристик універсальних розчіплювачів автоматичних вимикачів	66
3.3.6. Моделювання параметрів та характеристик термочутливих елементів термореле	70
РОЗДІЛ 4. РЕГУЛЮВАННЯ ТИСКУ У КОНТАКТНИХ СИСТЕМАХ З ВИКОРИСТАННЯМ ЯВИЩ ЕФЕКТИВ ПАМ'ЯТІ ФОРМИ ТА НАДПРУЖНОСТІ	77
4.1. Аналіз електротеплових процесів у розбірних контактних системах	77
4.1.1. Теоретичні основи розбірних контактів	77
4.1.2. Аналіз залежностей температури нагрівання та перехідного опору розбірного контактного з'єднання у режимі довготривалого електричного навантаження	82
4.1.3. Особливості термомеханічних процесів при нагріванні розбірних контактних систем струмами короткого замикання	86
4.1.4. Аналіз принципів стабілізації контактного тиску в розбірних контактних системах	89
4.1.5. Динамічне управління тиском контактних систем з використанням ефектів пам'яті форми та надпружності	94

4.1.6. Моделювання електротеплових та електромеханічних процесів у розбірному контактному з'єднанні при наявності пристроїв управління тиском із сплаву з ЕПФ та ЕНП	97
4.1.7. Аналіз електротеплових процесів у розбірних контактних системах з урахуванням росту оксидних плівок	105
4.1.8. Моделювання параметрів та характеристик пристроїв управління тиском розбірних контактів	109
4.2. Математичне моделювання електротеплових та електромеханічних процесів у роз'ємних контактних системах при проходженні струмів короткого замикання	113
4.2.1. Роз'ємні контактні системи та їх режими роботи	115
4.2.2. Нагрівання контактних комутаційних систем струмами короткого замикання	117
4.2.3. Електромеханічні процеси у контактній системі при проходженні струмів короткого замикання	120
4.2.4. Принципи компенсації електродинамічних сил у контактних комутаційних системах	122
4.2.5. Математичне моделювання температури площадки контактування у комутаційній контактній системі, обладнаній активними стабілізаторами тиску	124
4.2.6. Математичне моделювання електромеханічних процесів у контактних з'єднаннях з вмонтованими активними термостабілізаторами тиску	126
РОЗДІЛ 5. ОБГРУНТУВАННЯ ГРАНИЧНИХ ТЕРМІНІВ ПРОЦЕСУ СТАРІННЯ РОЗБІРНИХ КОНТАКТІВ ЗА УМОВ НЕПОВНОТИ ВИХІДНОЇ ІНФОРМАЦІЇ	128
5.1. Загальні положення	128
5.2. Обґрунтування параметрів контролю стану та прогнозування процесу старіння контактів розбірного типу	129
5.3. Аналіз чутливості перехідного опору контактного з'єднання розбірного типу до зміни вихідних факторів	130
5.4. Обґрунтування термінів ремонтних робіт та прогнозування строків служби контактів розбірного типу за умов неповноти вихідної інформації	135
РОЗДІЛ 6. ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ СИСТЕМИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОГО КОНТРОЛЮ КОНТАКТНИХ З'ЄДНАНЬ ТЕРМОЧУТЛИВИМИ ПРИСТРОЯМИ З ЕФЕКТОМ ПАМ'ЯТІ ФОРМИ	142
6.1. Основні вимоги до засобів контролю стану КЗ	142
6.2. Обґрунтування застосування сплавів з ефектом пам'яті форми для термочутливих елементів засобів вимірювання температури контактних з'єднань	142
6.3. Розробка вказівника перегрівання для неперервного контролю стану КЗ	146
6.4. Дослідження термомеханічних характеристик термочутливих елементів на основі сплаву з ЕПФ	150
6.5. Лабораторні дослідження об'єкта "контактне з'єднання – вказівники перегрівання"	154
6.6. Основні принципи реалізації експлуатаційного контролю контактних з'єднань сільських електроустановок	160
6.7. Математична модель оптимізації періодичності проведення експлуатаційного контролю стану КЗ	163
6.7.1. Побудова часової діаграми функціонування системи "КЗ– оператор"	164
6.7.2. Побудова графу станів. Спрощена напівмарківська модель	166
6.7.3. Побудова цільової функції	171

РОЗДІЛ 7. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ТЕМПЕРАТУРИ І ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК ВІД АВАРІЙНИХ РЕЖИМІВ, ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ЇХ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ	177
7.1. Загальні положення	177
7.2. Пристрої для контролю температурного режиму електроустановок	178
7.2.1. Вказівники перегрівання контактних з'єднань	178
7.2.2. Результати експериментальних випробувань вказівників перегрівання контактних з'єднань в експлуатаційній фірмі "Ontario Gydro", Канада	181
7.2.3. Пристрій автоматизованого контролю температури контактних з'єднань в електроустановках систем електропостачання	182
7.2.4. Термометри контактного типу	185
7.2.5. Термореле на основі сплаву з ЕПФ та їх експериментальні дослідження	186
7.3. Пристрої для керування тиском у розбірних контактних системах та особливості їх виробництва і випробування	192
7.4. Застосування сплавів з ефектом пам'яті форми для розширення функціональних можливостей захисних вимикаючих пристроїв	208
7.5. Підвищення надійності автогазових вимикачів	211
7.6. Підвищення надійності роз'ємних контактних систем	214
7.7. Деякі напрями підвищення експлуатаційного ресурсу розбірних контактних систем	216
РОЗДІЛ 8. ОСНОВИ СТВОРЕННЯ ЕЛЕКТРОТЕРМОМЕХАНІЧНИХ ПРИВОДІВ	228
8.1. Принципи побудови приводів на основі сплавів з ефектом пам'яті форми	228
8.2. Розробка конструкції електротермомеханічного приводу на основі ФС для споруд захищеного ґрунту	232
8.3. Дослідження електрофізичних параметрів сплаву з ефектом пам'яті форми	234
8.4. Використання приводів на основі сплавів з ефектом пам'яті форми у системах природної вентиляції споруд захищеного ґрунту	242
8.5. Моделювання термомеханічного зусилля приводного елемента зі сплаву з ефектом пам'яті форми	246
8.6. Моделювання характеристик елементів приводу при нагріванні електричним струмом	253
8.6.1. Моделювання параметрів стороннього електронагрівача	253
8.6.2. Моделювання температурного поля приводного елемента при прямому нагріванні електричним струмом	258
8.7. Експериментальне дослідження приводних елементів	266
8.7.1. Активація приводного елемента стороннім нагрівачем	266
8.7.2. Активація приводного елемента прямим електронагріванням	274
8.8. Експериментальні дослідження електротермомеханічного приводу	278
8.9. Виробничі випробування електротермомеханічного приводу	284
РОЗДІЛ 9. НОВІ МАТЕРІАЛИ ДЛЯ КОНТАКТ-ДЕТАЛЕЙ КОМУТАЦІЙНИХ АПАРАТІВ З ПІДВИЩЕНИМИ ЕКОЛОГІЧНИМИ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ	286
9.1. Обґрунтування методів створення екологічно-безпечних та ерозієстійких композиційних контактних матеріалів для магнітних пускачів	288
9.2. Обґрунтування вибору складу контактного матеріалу без токсичного оксиду кадмію	289
9.3. Дослідження електроерозійної стійкості контактного матеріалу в залежності від	

складу і фізико-механічних властивостей інгредієнтів	290
9.4. Результати обробки експериментальних даних стійкості серійних та дослідних зразків контакт-деталей у магнітних пусках серії ПМП	292
9.5. Математичне моделювання теплових процесів в комутуючих пристроях електромагнітних пускачів	303
9.6. Металографічні та електронно-мікроскопічні методи дослідження робочих поверхонь контакт-деталей	318
9.6.1. Структурні особливості спечених заготовок комбінованих матеріалів на основі срібла	318
9.6.2. Металографічний та рентгеноспектральний аналіз структури робочої поверхні дослідних контактів при комутації змінного струму	319
РОЗДІЛ 10. СПЕЦІАЛЬНІ СПЛАВИ З ЕФЕКТОМ ПАМ'ЯТІ ФОРМИ	323
10.1. Високотемпературні сплави з ефектом пам'яті форми	323
10.1.1. Загальний підхід до селекції високотемпературних сплавів з ефектом пам'яті форми	323
10.1.2. Фізичні принципи легування високотемпературних сплавів з ефектом пам'яті форми	325
10.1.3. Визначення оптимальних умов накопичення і відновлення оборотних деформацій	330
10.1.4. Вибір складів сплавів на основі інтерметалідів Zr і визначення параметрів МП для забезпечення високотемпературного ефекту пам'яті форми	337
10.1.5. Визначення параметрів мартенситного перетворення та ефекту пам'яті форми в оптимізованих сплавах системи ZrNi-Co-Ti	355
10.1.6. Гомогенні та композиційні ВСЕПФ системи Zr-Ni-Co	358
10.2. Магнітодеформаційні ефекти в сплавах з феромагнітною пам'яттю форми	369
10.2.1. Магніто-механічні властивості сплавів з феромагнітною пам'яттю форми	369
10.2.2. Магнітоконтрольований рух двійникових границь і гігантські магнетомеханічні ефекти в сплаві з пам'яттю форми Ni ₂ MnGa	379
10.2.3. Вільна енергія намагнічування і концепція магнітних рушійних сил	384
10.2.4. Правила універсальності і співвідношення між індукованими напруженням і магнітоконтрольованими двійниковими деформаціями	389
10.2.5. Модельні розрахунки магнітоіндукованої деформації Ni ₄₈ Mn ₃₀ Ga ₂₂	391
10.2.6. Магнітомеханічне циклування та моделювання впливу зовнішніх напружень на контрольований магнітним полем деформаційний ефект в NiMnGa	396
10.2.7. Основні рушійні сили і деформаційні ефекти в сплавах з магнітним ефектом пам'яті форми	400
10.2.8. Магнітна пам'ять форми, гістерезис та деформаційні ефекти при постійних зовнішніх напруженнях	409
10.2.9. Закон збереження енергії та загальне рівняння балансу термодинамічних сил для систем з магнітною пам'яттю форми	415
10.2.10. Гігантська магнітоіндукована деформація в 7М модульованій орторомбічній мартенситній фазі NiMnGa	419
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	426