

УДК 621.311

**ДИНАМІЧНЕ УПРАВЛІННЯ КОНТАКТНИМ ТИСКОМ У РОЗБІРНИХ  
ЕЛЕКТРИЧНИХ КОНТАКТАХ З ВИКОРИСТАННЯМ  
СПЛАВІВ З ЕФЕКТОМ ПАМ'ЯТІ ФОРМИ**

*В. В. Козирський, доктор технічних наук, професор*

*Національний університет біоресурсів і природокористування України*

E-mail: [kozyrskyivv@gmail.com](mailto:kozyrskyivv@gmail.com)

*І. П. Ткачук, кандидат фізико-математичних наук*

*НДЦ «Інноваційні технології», компанія «МЕГА СІБ груп», м. Київ*

E-mail: [megacibgroup@gmail.com](mailto:megacibgroup@gmail.com)

*І. І. Слушний, провідний інженер служби електропостачання*

*Регіональна філія «Південно-Західна залізниця» ПАТ «Укрзалізниця»/*

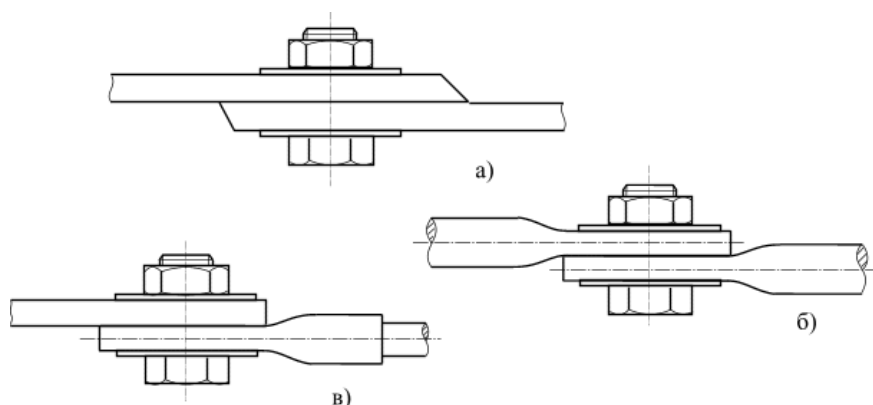
**Анотація.** Розбірні контактні з'єднання є найбільш численними елементами електроустановок. Працездатність контактів, їх надійність у значній мірі залежить від режимів електричного струму і температури, контактного тиску та ін. Зміна режимів і тривалість експлуатації призводять до зростання перехідного опору контактів, температури їх нагрівання і можливого теплового руйнування. Традиційними засобами для регулювання тиску в контактах при зміні температурного режиму є сталі тарілчасті пружини. Дослідженнями встановлено, що ці засоби тільки частково вирішують проблему регулювання контактного тиску. Альтернативою традиційним засобам є інноваційна розробка засобів регулювання тиску на основі використання функціональних сплавів з ефектом пам'яті форми,

У роботі вперше теоретичними та експериментальними дослідженнями обґрунтовано метод динамічного управління контактним тиском у розбірних контактних системах на основі використання властивостей функціональних сплавів з ефектом пам'яті форми. Застосування даного методу дозволяє стабілізувати тиск у межах  $\pm 5\%$  та подовжити термін експлуатації розбірних контактів у 3-4 рази.

**Ключові слова:** електричні контакти, перехідний опір, функціональні сплави з ефектом пам'яті форми

**Актуальність.** Розбірні контактні з'єднання застосовуються для жорсткого з'єднання між собою окремих струмопровідних частин електроустановок. Конструктивні виконання залежно від геометричної форми з'єднувальних провідників (струмопровідних частин) можуть бути умовно розділені на три групи: 1) з'єднання плоских провідників; 2) з'єднання круглих провідників; 3) з'єднання круглого провідника з плоским.

На рис.1 наведено типи конструкцій розбірних контактних з'єднань відповідно до наведеної класифікації.



**Рис.1. Контактні з'єднання провідників:**

а – плоских (шин); б – круглих ; в – плоского і круглого

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** До всіх типів контактних з'єднань ставиться ряд вимог [1,2,3,4]: надійності електричного з'єднання; достатньої механічної міцності; перегрівання не вище допустимого значення при тривалому протіканні електричного струму навантаження; термічної і електродинамічної стійкості при протіканні струмів короткого замикання; стійкості проти зовнішніх впливів.

Розрізняють два режими роботи розбірних контактних систем, пов'язаних з різним характером їх нагрівання:

- нагрівання при нормальному (усталеному) режимі струмового навантаження;

- нагрівання при коротких замиканнях.

Питання про нагрівання в нормальному режимі вирішується таким чином, щоб температура нагрівання контактної з'єднання не перевищувала температуру прилеглих частин шин або струмоведучих елементів апаратів. Перевищення температури контактної з'єднання та шини можна записати наступними виразами [5]:

$$\Delta \theta_{кз} = \theta_{кз} - \theta_o = \frac{I^2 R_{кз}}{k_k F_k} \quad (1)$$

$$\Delta \theta_{ш} = \theta_{ш} - \theta_o = \frac{I^2 R_{ш}}{k_{ш} F_{ш}}, \quad (2)$$

де  $I$  – електричний струм навантаження;  $R_{кз}$ ,  $R_{ш}$  – опір рівних за довжиною ділянок контактної з'єднання та шини;  $k_k$ ,  $k_{ш}$  – сумарні коефіцієнти тепловідведення з поверхні контакту та шини;  $F_{кз}$ ,  $F_{ш}$  – повна площа поверхні контакту та рівної за довжиною ділянки шини.

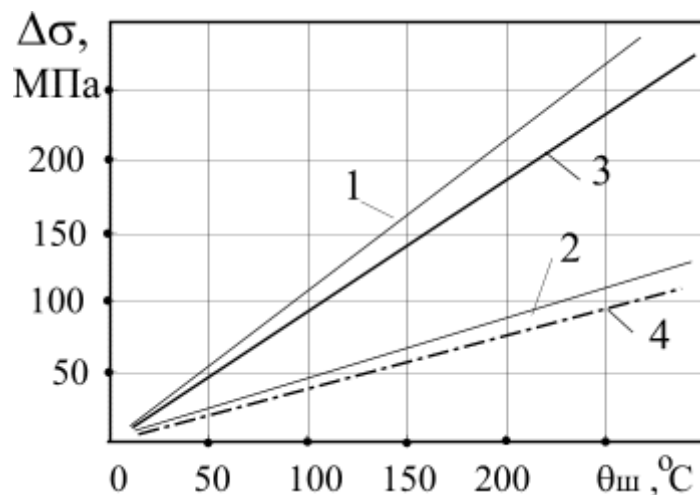
За умови рівності перевищень температури та однакового матеріалу струмоведучих елементів контакту ( $k_k = k_{ш}$ ) можна записати рівність [5]:

$$\frac{R_{кз}}{R_{ш}} = \frac{F_{кз}}{F_{ш}}. \quad (3)$$

Відношення опорів з'єднання та шини повинно бути рівним відношенню їх тепловідвідних поверхонь. Практично, як правило, ця умова не виконується із-за причин вибору довжини контактної з'єднання в залежності від кількості болтів, що забезпечують необхідний тиск. Допускається невелике перевищення температури контакту над температурою шин (декілька градусів). Допустима температура контактів у нормальному режимі навантаження має значення (для різних типів з'єднань)  $+70...+120$  °C [6,7].

Постійні часу нагрівання шин та болтів значно менші інтервалів зміни електричного навантаження, тому можна вважати температури болтів та шин рівними.

Випадок роботи контактних систем у режимі проходження струмів короткого замикання має ряд особливостей, які заслуговують досконалого вивчення з метою передбачення та зменшення негативної дії значних струмових навантажень. При короткому замиканні в болтах та контактуючих елементах виникають великі додаткові механічні напруги вслід неоднакового нагрівання, а також неоднакового температурного коефіцієнта розширення болтів і шин. Це призводить до появи залишкових деформацій у болтах та шинах, які при вистиганні контакту приводять до зменшення контактного тиску. У результаті зменшення тиску підвищуються перехідний опір та нагрівання в нормальному режимі струмового навантаження. Подальшим розвитком процесу може бути теплове руйнування контакту.



**Рис.2. Залежність перевищення механічної напруги у контактному з'єднанні від температури:**

1, 2 – відповідно в болтах і шинах (матеріал болтів – сталь); 3,4 – відповідно в болтах і шинах (матеріал болтів – бронза)

На рис.2 наведено залежності перевищень механічної напруги ( $\Delta\sigma_{б}$ ,  $\Delta\sigma_{ш}$ ,  $\Delta\sigma_{об}$ ,  $\Delta\sigma_{ош}$ ) у матеріалі болта та шин від температури. Розглядається приклад з'єднання алюмінієвих шин з вихідними даними: товщина шин  $b=0,008$  м, шайб  $b_1=0,002$  м; коефіцієнти температурного

розширення шин  $\Delta = 22,6 \cdot 10^{-6}$ , болта і шайб  $\Delta_1 \Delta_{11} \Delta_{12}$  модуль пружності матеріалу шин  $E = 0,71 \cdot 10^5$  МПа, болта і шайб  $E_1 = 1,1 \cdot 10^5$  МПа; площа опорної поверхні шайби  $F_1 = 5,8 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup> і поперечного перерізу болта  $F_2 = 2,3 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>; початкові значення механічної напруги у болті  $\sigma_{об} = 70$  МПа, шин  $\sigma_{ош} = 30$  МПа.

На рис.2 позиції 3 та 4 відповідають залежностям механічної напруги у контактному з'єднанні від температури відповідно в болтах і шинах при застосуванні болтів із бронзи. Взаємне розташування позицій 1 і 3 та 2 і 4 вказує на незначне зменшення механічної напруги при застосуванні болтів із бронзи. Основним фактором, що робить даний спосіб малоефективним, є велика різниця температур шин та болтів (для режиму проходження струмів короткого замикання). Дослідні дані показують, що перевищення температури болтів складає приблизно 25% від перевищення температури шин [8,9].

Із рис.2 видно, що перевищення механічної напруги при температурі шин  $+200 \dots +250$  °С становить у матеріалі болта 220 – 270 МПа (поз. 1), шин – 80 – 110 МПа (поз. 2). При цьому межа допустимого перевищення механічної напруги для алюмінію становить 80 – 100 МПа (визначається міцністю на зминання). Співставлення фактичного та допустимого перевищень механічної напруги для алюмінієвих шин вказує на появу пластичної (залишкової) деформації у шинах та приводить до зменшення контактної тиску.

Із [10,11, 12] відомо застосування засобів регулювання контактної тиску при збільшенні температури контактної з'єднання наступних пристроїв:

а) болтів із кольорових сплавів (латунь, дюраль, АК4–1), в яких коефіцієнти лінійного розширення наближаються до коефіцієнта лінійного розширення алюмінієвих шин, завдяки чому зберігається сила контактної натискання (рис. 3, а);

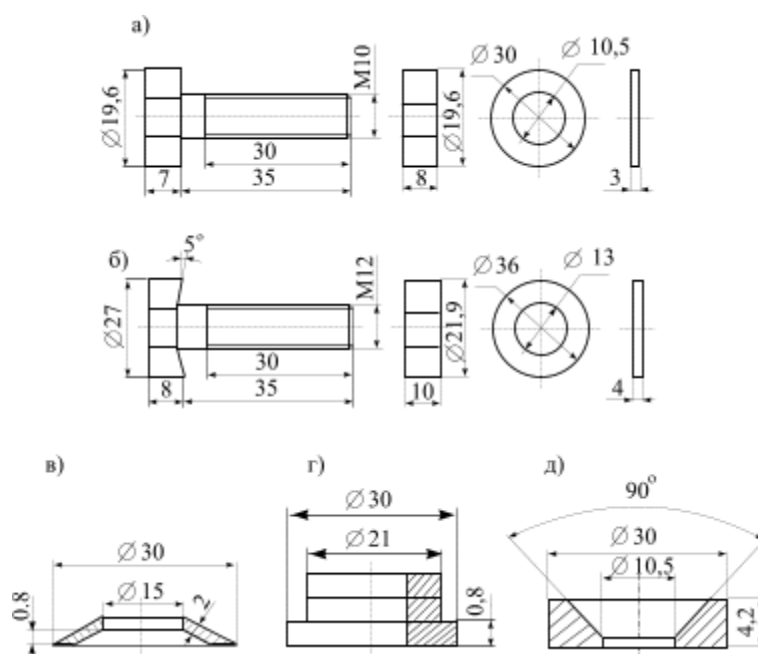
б) сталевих болтів з еластичною (низькою) голівкою зі скошеною притисочною площиною (при такій конструкції болт виконує частково роль

пружини, яка запобігає різким коливанням тиску при зміні температури контактних з'єднань (рис.3, б));

в) сталених тарілчастих пружин електротехнічного призначення за ГОСТ 3057–90 (рис. 3, в);

г) пакетів зі сталених шайб товщиною 7 – 8 мм, що подовжує стяжний болт, завдяки чому в деякій мірі знижуються тепломеханічні напруги в матеріалі шин (рис.3, г);

д) конічні пружинисті шайби за ГОСТ 3391–57.



**Рис.3. Пристрої для зменшення зростання тиску у розбірних контактних з'єднаннях:**

а – болт М10 із алюмінієвого сплаву АК4-1 (Д16 або латунь Л–62) із збільшеною шайбою; б болт М12 з еластичною голівкою (кут 5°) і збільшеною шайбою;

в – сталена тарілчаста пружина електротехнічного призначення за ГОСТ3057–90; г – пакет із сталених шайб товщиною 7-8 мм; д – конічна пружиниста шайба за ГОСТ 3391–57

Більш ефективним засобом (із наведених вище) для зменшення механічної напруги у контактах в режимі проходження струмів короткого замикання є

застосування сталевих тарілчастих пружин відповідно до ГОСТ 3057–90 [13]. Деформаційна характеристика пружини в аналітичному вигляді відповідно до [13]:

$$F = \frac{4ES}{(1 - \mu^2)\gamma D_1^2} * [(S_M - S)(S_M - \frac{S}{2})h + h^3] \quad (4)$$

де  $F$  – сила пружини при деформуванні;  $E$  – модуль пружності;  $S$  – висота деформації пружини;  $S_M$  – максимальна висота деформації пружини;  $h$  – товщина пружини;  $\mu$  – коефіцієнт Пуассона;  $D_1$  – зовнішній діаметр пружини (шайби);

$$\gamma = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{6}{\ln A} \left[ \frac{A-1}{A} \right]^2 ; \quad (5)$$

$$A = D_1/D_2 , \quad (6)$$

де  $D_2$  – внутрішній діаметр пружини.

При застосуванні тарілчастої пружини деформація болта може бути визначена за виразом [14]:

$$\Delta L(\theta_{ш}) = 2\alpha b \theta_{ш} - 2\alpha_1 \theta_1 K(b+b_1) - 2F \frac{b}{F_1 E} - 2F \frac{b_1}{F_1 E_1} \quad (7)$$

$$K = \theta_1 / \theta_{ш}.$$

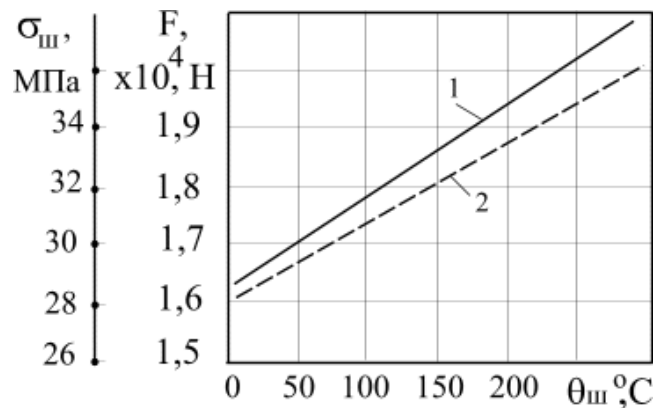
Зусилля контактного тиску для даного випадку буде визначатись за виразом (4) з урахуванням температурної та механічної деформації болта (7):

$$F(\theta_{ш}) = \frac{4E[S+\Delta L(\theta_{ш})]}{(1 - \mu^2)\gamma D_1^2} \left\{ [S_M - (S+\Delta L(\theta_{ш}))][S_M - \frac{S+\Delta L(\theta_{ш})}{2}] h + h^3 \right\} \quad (8)$$

При цьому механічна напруга:

$$\text{у шинах} - \sigma_{\text{ш}} = F(\theta_{\text{ш}})/F1; \text{ у болті} - \sigma_{\text{ш}} = F(\theta_{\text{ш}})/F2. \quad (9)$$

На рис.4 наведено графіки зміни зусилля натиснення (поз. 1) та залежність механічної напруги у шинах (поз. 2) від температури контактного з'єднання, обладнаного сталюю тарілчастою пружиною. Аналіз рис.4 показує, що зростання температури у контакті з тарілчастою сталюю шайбою при коротких замиканнях приводить до меншого зростання зусилля та механічної напруги порівняно з розглянутим вище випадком (див. рис.2), однак залишається достатньо високим – 28,5%. Дослідженнями [15] встановлено, що після 5–6 циклів проходження струму короткого замикання зниження зусилля контактного натиснення досягає 30 – 50%, що призводить до значного зростання перехідного опору контакту та його температури. В аналогічному з'єднанні без сталюї тарілчастої пружини зниження зусилля досягало 50 – 70%.



**Рис.4. Залежність від температури:**

1 – зусилля контактного тиску; 2 – механічної напруги у шинах контактного з'єднання, обладнаного тарілчастою сталюю пружиною за ГОСТ 3057–90

Суттєвим недоліком застосування сталюих тарілчастих шайб у розбірних контактних з'єднаннях є втрата ними пружних властивостей під дією температури контактів при проходженні струмів короткого замикання.



Температура нагрівання контактної з'єднання при проходженні струмів короткого замикання може сягати  $+300\text{ }^{\circ}\text{C}$  і вище (при допустимому значенні  $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), а допустима температура нагрівання сталених тарілчастих шайб становить  $+120\text{ }^{\circ}\text{C}$ , що і призводить до втрати ними механічних властивостей. Постійно існуюча нерівномірність тиску по площі тарілчастих сталених шайб (у радіальному напрямку) призводить до появи залишкової деформації у місцях їх зовнішніх кромки, що також призводить до зниження тиску у контактах. У процесі практики експлуатації електроустановок зафіксовані неодноразові випадки термічного руйнування контактів обладнаних сталеними тарілчастими шайбами [11,12].

Наведені недоліки застосування сталених тарілчастих пружин привели до обмеженого їх застосування в електроустановках.

Аналіз досліджень проблеми надійності контактів дав можливість зробити висновок про те, що стабілізація контактної тиску забезпечує стабілізацію опору стягування ліній струму  $R_C$  і тільки частково зменшує темп росту сторонніх плівок і, відповідно, опору плівок  $R_{пл}$ . Максимально уповільнити процес росту плівок і опору  $R_{пл}$  можливо шляхом автоматичного регулювання контактної тиску в залежності від температури контактної з'єднання.

**Мета дослідження** – динамічне управління контактним тиском у розбірних електричних контактах з використанням.

**Матеріали і методи дослідження.** У результаті експериментальних і теоретичних досліджень встановлено, що для збільшення терміну експлуатації розбірних контактних з'єднань необхідно забезпечити автоматичне регулювання контактної тиску - керуючими факторами повинні бути температура контактної з'єднання і зниження контактної тиску при деформації елементів болтового з'єднання.

Традиційними матеріалами і способами просте вирішення задачі у такій постановці технічно неможливо.

Використання нетрадиційних новітніх матеріалів в електроенергетиці є перспективною складовою її розвитку. Однією із груп таких матеріалів є функціональні сплави – сплави з ефектом пам'яті форми (ЕПФ). Вони, перетворюючи три види енергії (електричну, теплову, механічну), виконують роль робочого тіла і органа одночасно в діапазоні температур  $-200\dots+200^{\circ}\text{C}$ . Для сплавів з ЕПФ є незаперечним фактом існування силових властивостей, поєднаних з приводними в одному матеріалі, а не в механізмі, тобто здатність цих матеріалів розвивати реактивні зусилля в сотні МПа і виконувати переміщення „вільної” його частини при надходженні низькотемпературної теплової енергії. Неймовірно, але допустима відносна деформація сплавів складає 2 – 8% (для монокристалів до 25%)!

Наявність унікальних властивостей обумовлює належність сплавів з ЕПФ до смарт-матеріалів та високу актуальність їх вивчення і застосування у різних галузях. Оскільки у смарт-сплавах спостерігається об'єднання властивостей, які зазвичай притаманні декільком матеріалам чи пристроям, то першим застосуванням є заміна декількох елементів системи - одним із сплавів з ЕПФ. Іншими застосуваннями є розробка принципово нових технічних засобів та удосконалення існуючих. Оскільки дані сплави є провідниками електричного струму і прямими перетворювачами теплової енергії у механічну роботу, вони все більше знаходять застосування в електроенергетиці.

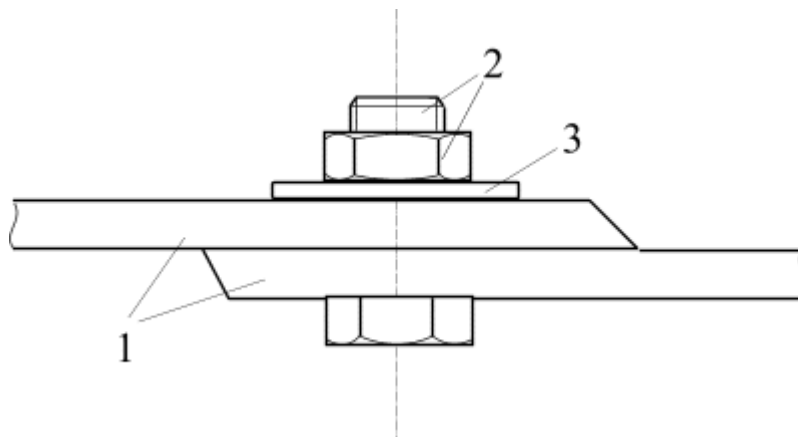
Нині існує декілька груп сплавів, основними серед них є групи на основі нікелю і міді. Сплави групи Ni-Ti отримали широке застосування у світі в авіакосмічній техніці, машинобудуванні, робототехніці, медицині. Удосконалення технологій серійного виробництва даної групи сплавів та винайдення сплавів з ефектами пам'яті форми та надпружності на основі міді – Cu-Al-Mn та інших – привело до суттєвого зниження їхньої вартості та можливості широкого застосування в інших галузях господарства.

Багаторічними дослідженнями і практикою [16-23] застосування смарт-сплавів в електроенергетиці доказано високу ефективність використання їх властивостей для вирішення різноманітних складних технічних задач, у тому числі і управління режимом роботи контактних з'єднань. Унікальною властивістю виробів із сплаву з ефектом пам'яті форми є те, що вони поєднують в собі функції датчика температури, виконавчого механізму, який може реалізувати термомеханічну енергію при наявності умов для деформації. Названі властивості є оптимальними за складом для управління режимом роботи розбірних контактів.

**Результати досліджень та їх обговорення.** Концептуально запропонований авторами функціональний пристрій із сплаву з ЕПФ має форму звичайної шайби, яка при монтажі має «плоску» форму, а при нагріванні і наявності умов для власної деформації (у контактному з'єднанні при зниженні основного контактного тиску) вона буде «відновлювати» (попередньо задану під час її виробництва) конічну форму, генеруючи додатковий тиск, величина якого буде визначатись термомеханічною характеристикою виробу. Запропоновано виготовляти функціональні пристрої із сплаву Cu-Al-Mn, який має температуру початку відновлення форми  $+45...+50$  °C і в температурному діапазоні  $+50...+90$  °C генерує зусилля (близьке до номінального для конкретного контактного з'єднання).

При монтажі розбірного контактного з'єднання тарілчаста шайба із сплаву з ЕПФ встановлюється між гайкою і електричною шиною, болтове кріплення інсталюється до номінального зусилля (див. рис. 5). При цьому, тарілчаста шайба із сплаву з ЕПФ, на відміну від тарілчастої шайби із сталі, у температурному діапазоні від  $50$  °C і вище відновлює тарілчасту форму і генерує зусилля виключно тільки при появі деформації у контактному з'єднанні і зниженні основного контактного тиску.

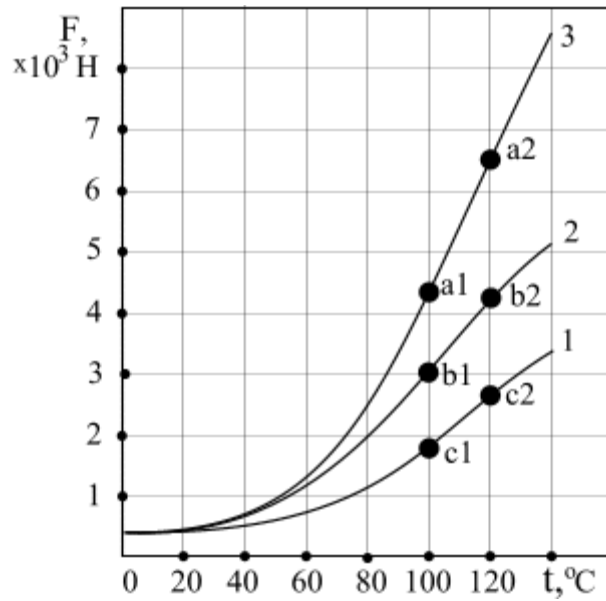
На рис. 6 наведені експериментальні термомеханічні характеристик однієї шайби із сплаву з ЕПФ при різних рівнях зовнішнього тиску  $N$  на неї (наявність різних умов деформації). Із рис. видно (точки  $a_1, b_1$  і  $c_1$  та  $a_2, b_2$  і  $c_2$ ), що при зниженні зовнішнього тиску від 4000 Н до 40 Н, генероване зусилля шайби зростає, відповідно при температурі 100 °С від 1800 Н до 4200 Н, а при температурі 120 °С від 2700 Н до 6500 Н.



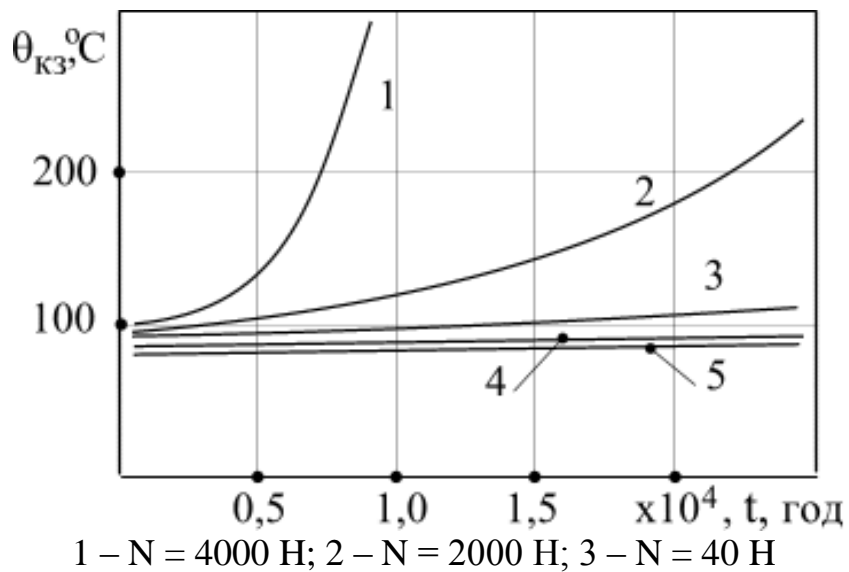
**Рис.5. Загальний вигляд розбірного контактної з'єднання з функціональним пристроєм із сплаву з ЕПФ:**

1 – електричні шини; 2 – болтове з'єднання; 3 – функціональний пристрій із сплаву з ЕПФ

На рис.7 (позиція 1) темп росту температури відповідає основному тиску  $N=3000$  Н (контактна система без шайби). Інші позиції відповідають контактним системам, які обладнані шайбами з різними термомеханічними характеристиками. Застосування функціональних елементів з більшою величиною максимального зусилля призводить до зменшення темпів зростання у часі перехідного опору і температури контакту. При цьому видно, що використання термочутливого елемента з максимальним генерованим зусиллям 10 кН (контактний тиск  $P > 7$  Н/мм<sup>2</sup>) суттєво знижує темп зростання плівок та зростання температури контактної з'єднання у часі.

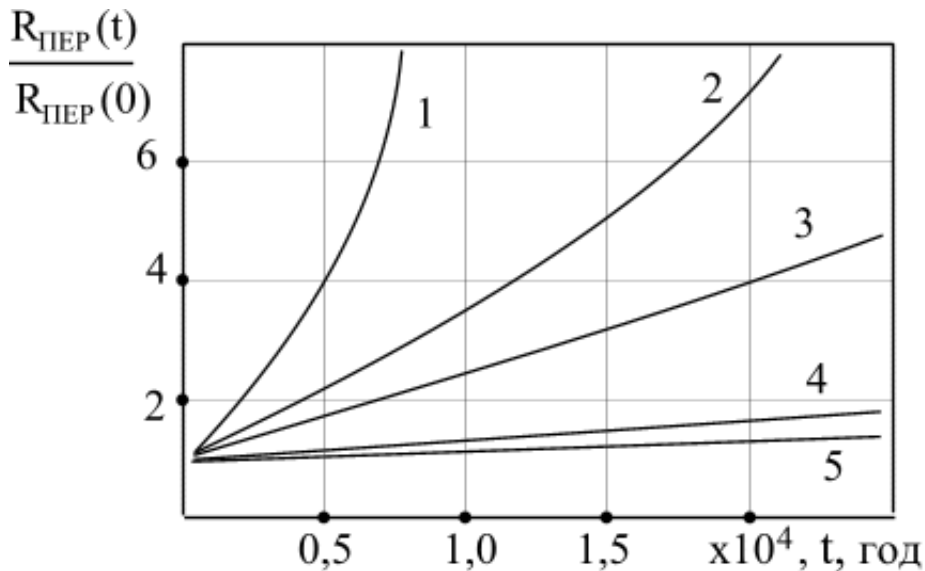


**Рис.6. Експериментальні термомеханічні характеристики шайб із сплаву з ЕПФ (М16,  $h = 3,5$  мм) при:**



**Рис.7. Зміна температури розбірного контактного з'єднання в процесі тривалої експлуатації (у часі) при появі оксидних плівок:**

1 – без шайби з ЕПФ; 2,3,4 та 5 при наявності шайб з різними термомеханічними характеристиками



**Рис.8.** Зміна відносної величини перехідного опору контактного з'єднання у часі при наявності шайб з різними термомеханічними характеристиками:

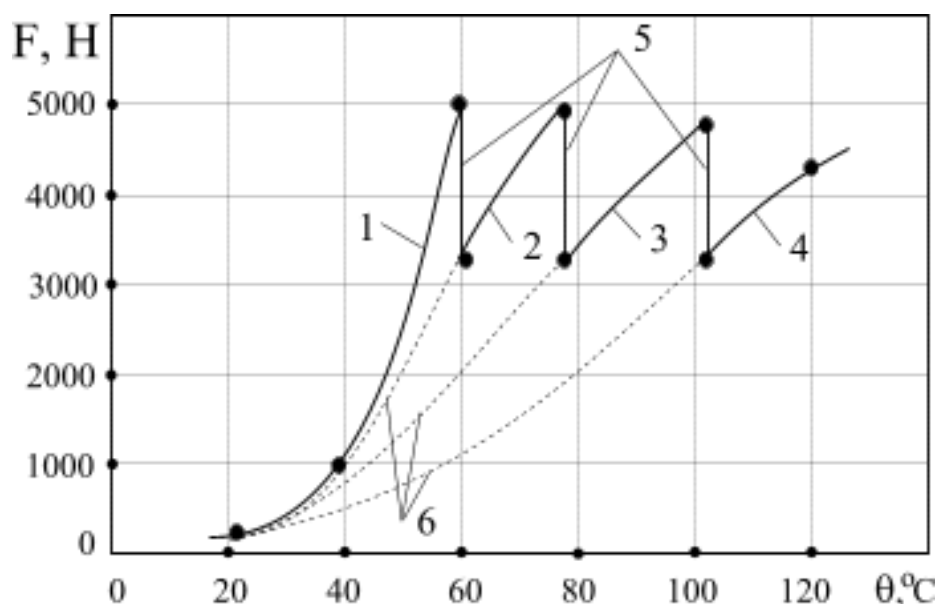
1 - 3000 Н; 2 - 4000 Н; 3 - 6000 Н; 4 - 10000 Н; 5 - 12000 Н

На рис. 9 представлено експериментальний графік зміни термомеханічного зусилля при наростанні температури та ступінчатій зміні (збільшенні) вільного ходу відновлення форми шайби. Позиції 1, 2, 3 та 4 на даному рисунку частини термомеханічної характеристики. Кожна із позицій 5 відповідають ступінчатому збільшенню вільного ходу на 0,25 мм і, відповідно зменшенню основного контактного тиску. Пунктирні лінії 6 відповідають гіпотетичному ходу термомеханічної характеристики за умови постійного значення вільного ходу (для даної характеристики). Із рисунка наглядно видно, що поява додаткового зазору для відновлення форми шайби і зниження зусилля компенсується при наростанні температури.

На рис. 10 представлено загальну будову стенда для дослідження термомеханічних характеристик шайб із сплаву з ЕПФ та електричних, теплових і механічних процесів у розбірному контактному з'єднанні електричних шин. На даному стенді здійснено дослідження характеристик, що наведені вище.

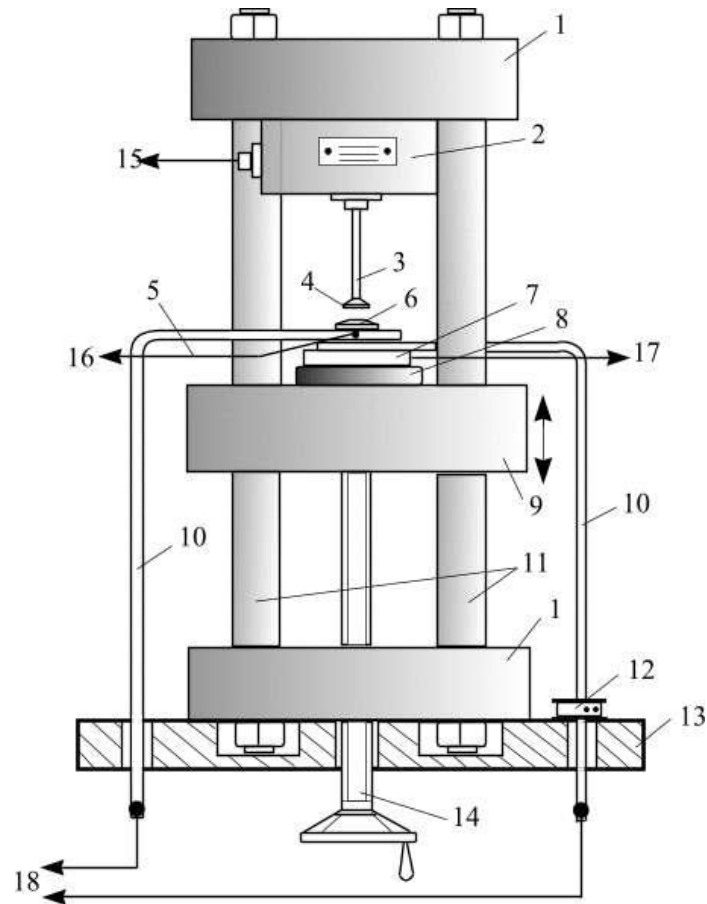
Динамічний спосіб управління режимом роботи розбірних контактних з'єднань з використанням шайб із сплаву з ЕПФ пройшов виробничу перевірку в

електроустановках систем електропостачання 287 підприємств України, Білорусії, Російської Федерації, Казахстану та Канади, серед них: Запоріжська АЕС, Рівненська АЕС, Бурштинська ДРЕС, ПРАТ "Київенерго", ДАГГК "ДніпроГідроЕнерго", Київська ТЕЦ-5, комбінат «Криворіжсталь», Харківське підприємство електричних мереж, Черкаська ТЕЦ, завод «Серп і молот» м. Харків, Маріупольський концерн «Азовмаш», Коростенське ПЕМ, СП "Фроніус-Факел", АО "Янтарьенерго", Кольська АЕС, Калузька ТЕЦ, Тюменьнафтогаз, Кіровська ДРЕС, "Вітебськенерго" та ін.



**Рис.9. Термомеханічна характеристика шайби з ЕПФ при ступінчатому збільшенні вільного ходу відновлення форми:**

1,2,3,4 – частини термомеханічної характеристики; 5 – ступінчате збільшення вільного ходу відновлення форми; 6 – гіпотетичні криві термомеханічних характеристик



**Рис.10. Конструкція стенда для експериментальних досліджень конічних шайб із сплаву з ефектами пам'яті форми та надпружності:**

- 1 – нерухомі платформи; 2 – тензорезисторний датчик; 3 – шток;  
4, 8 – теплоізолюючі прокладки; 7 – нагрівач; 9 – рухома платформа;  
10 – електричні шини; 11 – штанги; 12 – трансформатор струму; 13 – стіл;  
14 – привод рухомої плити; 15 – електричне з'єднання тензорезисторного датчика з підсилювачем; 16 – з'єднання термопари з приладом реєстрації;  
17 – з'єднання нагрівача з блоком управління; 18 – з'єднання шин з навантажувальним трансформатором

**Висновки і перспективи.** 1. Найбільший вплив на стан розбірних контактів створюють фактори контактного тиску і температури. Зменшення контактного тиску призводить до зростання перехідного опору, температури контакту,



підвищення темпу окислення контактуючих поверхонь. Зменшення контактного тиску у два рази призводить до початкового зростання перехідного опору у 2,5-3 рази. При цьому збільшення темпу росту оксидних плівок призводить до подальшого зростання перехідного опору та зменшення періоду нормальної експлуатації контактів у 3-4 рази. Теоретичний аналіз показав, що проходження струмів короткого замикання через розбірні контактні системи, наприклад алюмінієвих шин призводить до підвищеного їх нагрівання (температура +200...+250 °С) та перевищення (над номінальним рівнем) механічної напруги у болтах – 220...270 МПа, шинах – 80...120 МПа. Зазначений рівень перевищення механічної напруги створює залишкові деформації у болтах і шинах з'єднання.

2. Існуючий ряд технічних способів та засобів зниження зростання основного контактного тиску при збільшенні температури не дає можливості забезпечити ефективне управління контактним тиском у розбірних контактах. Застосування найбільш ефективних засобів – сталених тарілчастих пружин за ГОСТ3057-90 дозволяє зменшити зростання механічної напруги у контактах при проходженні струмів короткого замикання тільки до рівня 30 %.

3. Дослідженнями електротеплових та тепломеханічних процесів у контактах встановлено, що стабілізація контактного тиску забезпечує стабілізацію опору стягування ліній струму  $R_C$  і тільки частково зменшує темп росту оксидних плівок та опору тунельного ефекту квазіметалевого контакту адгезійних і пасивуючих плівок  $R_{ТУН}$ . Доказано, що максимально уповільнити процес росту плівок і перехідного опору  $R_{ПЕР}$  можливо шляхом динамічного управління контактним тиском в залежності від температури контакту.

4. Теоретично обґрунтовано та експериментально доведено, що електротеплові, тепломеханічні та електромеханічні процеси в контактних системах електрообладнання та режими їх функціонування за своєю природою співпадають з фізичними умовами виникнення явища ЕПФ у функціональних сплавах.

5. У роботі вперше теоретичними та експериментальними дослідженнями обґрунтовано метод динамічного управління контактним тиском у розбірних контактних системах на основі використання властивостей функціональних сплавів. Застосування даного методу дозволяє стабілізувати тиск у межах  $\pm 5\%$  та подовжити термін експлуатації розбірних контактів у 3-4 рази.

### **Список літератури**

1. ГОСТ 10434-82. Соединения контактные электрические. Классификация. Общие технические требования. – М.: Из-во стандартов, 1982. – 23 с.
2. ГОСТ 17441-84. Соединения контактные электрические. Правила приемки и методы испытаний. – М.: Из-во стандартов, 1984. – 32 с.
3. ГОСТ 2039312-85. Изделия электрические. Требования по надежности. – М.: Из-во стандартов, 1985. – 27 с.
4. ДСТУ 2290-93. Контакти електричні. Терміни та визначення. – К.: Вид-во Держстандарту України, 1993. – 23 с.
5. Козирський В.В. Особливості термомеханічних процесів при нагріванні нероз'ємних контактних систем струмами короткого замикання / В. В. Козирський // Машинознавство. - 2000. - №11. - С.34-37.
6. ГОСТ 17441-84. Соединения контактные электрические. Правила приемки и методы испытаний. – М.: Из-во стандартов, 1984. – 32 с.
7. ПУЕ-2017. Правила улаштування електроустановок. Україна. Міненерговугілля України. Х.: Видавництво "Форт", 2017. — 760 с.
8. Дзекцер Н.Н. Многоамперные контактные соединения / Дзекцер Н.Н., Висленев Ю.С. – Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отд-е, 1987. – 128 с.
9. Иванченко О.И. О болтовом соединении шин / О.И. Иванченко // Электрические станции. – 1961. - №8. - С.58-62.
10. ГОСТ 3057-90. Пружины тарельчатые. Общие технические условия. – М.: Из-во стандартов, 1990. – 36 с.
11. Дзекцер Н. Н. Многоамперные контактные соединения / Дзекцер Н. Н., Висленев Ю. С. – Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отд-е, 1987. – 128 с.
12. Федоров А.А. Эксплуатация электрооборудования промышленных предприятий. Учебн. пособие для ВУЗов / Федоров А.А., Попов Ю.П. – М.: Энергаториздат, 1986. – 280 с.
13. ГОСТ 3057-90. Пружины тарельчатые. Общие технические условия. – М.: Из-во стандартов, 1990. – 36 с.
14. Козирський В.В. Особливості термомеханічних процесів при нагріванні нероз'ємних контактних систем струмами короткого замикання / В.В. Козирський // Машинознавство. - 2000. - №11. - С.34-37.

15. Иванченко О.И. О болтовом соединении шин / О.И. Иванченко // Электрические станции. –1961. - №8. - С.58-62.

16. Козырский В.В. Повышение надежности контроля состояния плавких предохранителей / В.В. Козырский, А.В. Кравец // Энергетика и электрификация. - 1990. - №4. - С.32-33.

17. Козырский В.В. Повышение надежности контактной системы разъединителей / В.В.Козырский, А.В.Кравец, Г.З.Затульский //Энергетика и электрификация. - 1991. - №2. - С.20-21.

18. Козырский В.В. Устройства термостабилизации контактного давления и контроля температуры контактных соединений / В. В. Козырский, В. В. Каплун, А. Н. Шаршаков // Энергетика и электрификация. - 1993. - №3. - С.22-24.

19. Козырский В.В., Удод Е.И., Каплун В.В., Томилко А.Н., Шаршаков А.Н. Контроль температуры закрытых распределительных устройств / В. В. Козырский, Е. И. Удод, В. В. Каплун, А. Н. Томилко, А. Н. Шаршаков //Энергетика и электрификация. - 1995. - №2. - С.26-27.

20. Козырский В.В. Устройства термостабилизации контактного давления и контроля температуры контактных соединений / В. В. Козырский, Е. И. Удод, В. В. Каплун, А. Н. Шаршаков, С. Е. Алферов // Энергетик. – 1995. - №6. -С.18-19.

21. Козирський В. В.. Термочутливі елементи датчиків-термореле на основі сплавів з ефектом пам'яті форми / В. В. Козирський, Т. П. Резніченко, В. В. Каплун // Энергетика и электрификация. – 1997. - №2. - С.41-1942.

22. Козирський В.В. Застосування спеціальних сплавів для розширення функціональних можливостей комбінованих розчіплювачів автоматичних вимикачів / В. В. Козирський, М. Т. Лут // Механізація сільського господарства. Збірник наукових праць Національного аграрного університету. – 1999. – Т. 5. - С.303.

23. Козирський В.В. Математичне моделювання електротеплових процесів у контактному з'єднанні за наявності пасивних термостабілізаторів контактного тиску / В.В. Козирський // Вісник Українського Будинку економічних та науково-технічних знань. - 1999. - №1. – С.27-30.

## **References**

1. GOST 10434-82. Soyedineniya kontaknyye elektricheskiye. Klassifikatsiya. Obshchiye tekhnicheskkiye trebovaniya (1982) [Connections contact electric. Classification. General technical requirements]. Moskow: Iz-vo standartov, 23.

2. GOST 17441-84. Soyedineniya kontaknyye elektricheskiye. Pravila priyemki i metody ispytaniy (1984). [Connections contact electric. Acceptance rules and test methods]. Moskow: Iz-vo standartov, 32.

3. GOST 2039312-85. Izdeliya elektricheskiye. Trebovaniya po nadezhnosti (1985). [Electric products. Reliability requirements]. Moskow: Iz-vo standartov, 27.

4. DSTU 2290-93. Kontakty elektrychni. Terminy ta vyznachennia (1993). [Electrical contacts. Terms and definitions]. Kyiv: Vyd-vo Derzhstandartu Ukrainy, 23.
5. Kozyrskyi, V.V. (2000). Osoblyvosti termomekhanichnykh protsesiv pry nahrivanni neroz'iemnykh kontaktnykh system strumamy korotkoho zamykannia [Features of thermomechanical processes when heating non-detachable contact systems with short-circuit currents]. Mashynoznavstvo, №11, 34-37.
6. GOST 17441-84. Soyedineniya kontaknyye elektrichieskiye. Pravila priyemki i metody ispytaniy (1984).. [Connections contact electric. Acceptance rules and test methods]. Moskow: Iz-vo standartov, 32.
7. PUE-2017. Pravyła ulashtuvannia elektroustanovok. Ukraina. Minenerhovuhillia Ukrainy (2017). [Rules for electrical installation. Ukraine. Ministry of Energy and Coal of Ukraine]. Kharkiv: Vydavnytstvo "Fort", 760.
8. Dzektsler, N.N., Vislnev, Y.S.. (1987). Mnogoampernyye kontaknyye soyedineniya [Multi-amperage contact connections]. Leningrad: Energoatomizdat. Leningradskoye otd-e, 128.
9. Ivanchenko, O.I. O boltovom soyedinenii shin [About bolt connection of tires]. Elektrichieskiye stantsii, №8, 58-62.
10. GOST 3057-90. Pruzhiny tarel'chatyye. Obshchiye tekhnichieskiye usloviya (1990). [Springs are disk-like. General specifications]. Moskow: Iz-vo standartov, 36.
11. Dzektsler, N.N., Vislnev, Y.S.. (1987). Mnogoampernyye kontaknyye soyedineniya [Multi-amperage contact connections]. – Leningrad: Energoatomizdat. Leningradskoye otd-e, 128.
12. Fedorov, A.A., Popov, Y.P. (1986). Ekspluatatsiya elektrooborudovaniya promyshlennykh predpriyatiy [Operation of electrical equipment of industrial enterprises]. Moskow: Energoatomizdat, 280.
13. GOST 3057-90. Pruzhiny tarel'chatyye. Obshchiye tekhnichieskiye usloviya (1990). [Springs are disk-like. General specifications]. Moskow: Iz-vo standartov, 36.
14. Kozyrskyi, V.V. (2000). Osoblyvosti termomekhanichnykh protsesiv pry nahrivanni neroz'iemnykh kontaktnykh system strumamy korotkoho zamykannia [Features of thermomechanical processes when heating non-detachable contact systems with short-circuit currents]. Mashynoznavstvo,- 11, 34-37.
15. Ivanchenko, O.I. (1961). O boltovom soyedinenii shin [About bolt connection of tires ].Elektrichieskiye stantsii, №8, 58-62.
16. Kozyrskiy, V.V., Kravets, A.V. (1990). Povysheniye nadezhnosti kontrolya sostoyaniya plavkikh predokhraniteley[Improving the reliability of monitoring fuses]. Energetika i elektrifikatsiya, №4, 32-33.
17. Kozyrskiy, V.V, Kravets, A.V., Zatul'skiy, G.Z. (1991).. Povysheniye nadezhnosti kontaktnoy sistemy ra'yediniteley [Increase of reliability of the contact system of the disconnectors]. Energetika i elektrifikatsiya, №2, .20-21.
18. Kozyrskiy, V.V., Kaplun, V.V., Sharshakov, A.N. (1993). Ustroystva termostabilizatsii kontaktnogo davleniya i kontrolya temperatury kontaktnykh

soyedineniy [Devices for thermostabilization of contact pressure and temperature control of contact connections ]. Energetika i elektrifikatsiya, №3, 22-24.

19. Kozyrskiy, V.V., Udod, E.I., Kaplun, V.V., Tomilko, A.N., Sharshakov, A.N. (1995). Kontrol' temperatury zakrytykh raspreditel'nykh ustroystv [Temperature control of closed switchgears]. Energetika i elektrifikatsiya, №2, 26-27.

20. Kozyrskiy, V.V., Udod, E.I., Kaplun, V.V., Sharshakov, A.N., Alferov, S.E. (1995). Ustroystva termostabilizatsii kontaktnogo davleniya i kontrolya temperatury kontaktnykh soyedineniy [Devices for thermostabilization of contact pressure and temperature control of contact connections]. Energetik, №6, 18-19.

21. Kozyrskiy, V.V., Reznichenko, T.P., Kaplun, V.V. (1997). Termochutlyvi elementy datchyiv-termorele na osnovi splaviv z efektom pam'iaty formy [Thermosensitive elements of thermocouple sensors based on alloys with the shape memory effect]. Enerhetyka y elektryfikatsiya, №2, 41-1942.

22. Kozyrskiy, V.V., Lut, M.T. (1999). Zastosuvannia spetsialnykh splaviv dlia rozshyrennia funktsionalnykh mozhlyvostei kombinovanykh rozchiplivachiv avtomatychnykh vumyachiv [Application of special alloys for expansion of functionality of combined disconnectors of automatic switches]. Mekhanizatsiia silskoho hospodarstva. Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoho ahrarnoho universytetu, 5, 303.

23. Kozyrskiy, V.V. (1999). Matematychno modeliuвання elektroteplovnykh protsesiv u kontaktnomu z'iednanni za naiavnosti pasyvnykh termostabilizatoriv kontaktnoho tysku [Mathematical modeling of electrothermal processes in the contact connection in the presence of passive contact pressure thermostabilizers]. Visnyk Ukrainskoho Budynku ekonomichnykh ta naukovo-tekhnichnykh znan, №1, 27-30.

## **ДИНАМИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ КОНТАКТНЫМ ДАВЛЕНИЕМ В РАЗБОРНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНТАКТАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПЛАВОВ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ**

***В. В. Козырский., И. П. Ткачук, И. И. Слушный***

**Аннотация.** Разборные контактные соединения являются наиболее многочисленными элементами электроустановок. Работоспособность контактов, их надежность в значительной степени зависит от режимов электрического тока и температуры, контактного давления и др. Изменение режимов и продолжительность эксплуатации приводят к росту переходного сопротивления контактов, температуры их нагрева и возможного теплового разрушения. Традиционными средствами для регулирования давления в контактах при изменении температурного режима являются стальные тарельчатые пружины. Исследованиями установлено, что эти средства только частично решают проблему регулирования контактного давления. Альтернативой традиционным

средствам является инновационная разработка средств регулирования давления на основе использования функциональных сплавов с эффектом памяти формы,

В работе впервые теоретическими и экспериментальными исследованиями обоснован метод динамического управления контактным давлением в разборных контактных системах на основе использования свойств функциональных сплавов с эффектом памяти формы. Применение данного метода позволяет стабилизировать давление в пределах  $\pm 5\%$  и продлить срок эксплуатации разборных контактов в 3-4 раза.

**Ключевые слова:** *электрические контакты, переходное сопротивление, функциональные сплавы с эффектом памяти форм.*

## **DYNAMIC CONTROL OF CONTACT PRESSURE IN DISTRIBUTION ELECTRIC CONTACTS WITH USE ALLOYS WITH EFFECT OF MEMORY FORM**

*V. Kozyrskyi, I. Tkachuk, I. Slushnyi*

**Abstract.** *Disassembled contact joints are the most numerous elements of electrical installations. The working capacity of the contacts, their reliability depends to a large extent on the modes of electric current and temperature, contact pressure, etc. The change in modes and the duration of operation leads to an increase in the resistance of the contacts, the temperature of their heating and possible thermal destruction. Traditional means for controlling the pressure in contacts when changing the temperature regime are steel plate springs. Researches have established that these means only partially solve the problem of regulation of contact pressure. An alternative to traditional means is the innovative development of pressure control tools based on the use of functional alloys with the shape memory effect,*

*In the work for the first time in theoretical and experimental research the method of dynamic control of contact pressure in collapsible contact systems based on the use of the properties of functional alloys with the shape memory effect was substantiated. Application of this method allows to stabilize the pressure within  $\pm 5\%$  and extend the life of collapsible contacts in 3-4 times.*

**Key words:** *electrical contacts, transient resistance, functional alloys with the shape memory effect*