

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

ВОЛКОВА ОЛЬГА ГРИГОРІВНА



УДК 621.316.53

УДОСКОНАЛЕННЯ КОНТАКТНОГО ПРИВОДА ПЕРЕМИКАЧА  
ВІДГАЛУЖЕНЬ ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРА  
З МЕТОЮ ЗМЕНШЕННЯ ЗНОШУВАННЯ КОНТАКТІВ

Спеціальність 05.09.01 – електричні машини й апарати

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2013

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі електричних апаратів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Лупіков Валерій Сергійович**,  
Національний технічний університет  
„Харківський політехнічний інститут”,  
завідувач кафедри електричних апаратів

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Сосков Анатолій Георгійович**,  
Харківська національна академія  
міського господарства,  
завідувач кафедри теоретичної та  
загальної електротехніки

кандидат технічних наук, доцент  
**Коробський Володимир Вікторович**,  
Національний університет біоресурсів  
і природокористування України, м. Київ,  
доцент кафедри електричних машин і  
експлуатації електрообладнання

Захист відбудеться «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2013 р. о \_\_\_\_\_ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.08 при Національному технічному університеті „Харківський політехнічний інститут” за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Національного технічного університету „Харківський політехнічний інститут”

Автореферат розісланий «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2013 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



О.Ю. Юр'єва

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Аналіз роботи електричних апаратів, які тривалий час знаходяться в експлуатації вказує на необхідність вдосконалення трансформаторного обладнання здатного відповідати технічному рівню сучасних систем електроспоживання. Одним із основних чинників у цьому питанні є робота комутаційних пристроїв, призначених для перемикання відгалужень обмоток силових трансформаторів. В цілому це вирішується шляхом аналізу конструктивних особливостей електричних апаратів та дослідженням робочих процесів з використанням ефективних засобів діагностики.

Стан комутаційних апаратів визначається роботою розривних контактів (РК). Дослідженню цього питання присвячено велику кількість теоретичних і експериментальних робіт, які проводились в провідних електротехнічних компаніях світу. У першу чергу, дослідження спрямовувалися на запобігання відмов у роботі РК. Такі відмови в процесі комутації, часто носять несистемний, важкопрогнозований характер, зумовлений комплексом руйнуючих факторів: корозією в результаті фізико-хімічних процесів або електродугових розрядів; ерозією контактних поверхонь при проходженні електричного струму великої густини; зношуванням від механічних процесів при замиканні; структурними змінами контактних матеріалів при електротермічному нагріванні та ін. Знизити вплив цих факторів на роботу РК можливо шляхом удосконалення конструкції комутаційних апаратів та підвищенням рівня контролю за їх станом. Таким чином, питання, пов'язані з удосконаленням привода комутаційних апаратів для підвищення роботоспроможності їх РК є актуальним завданням, яка складає напрямок дисертаційного дослідження.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконувалась на кафедрі електричних апаратів НТУ «ХП». Дослідження проводились відповідно до наукової програми: «Про забезпечення надійності об'єднаної енергетичної системи України» (рішення колегії Міністерства палива та енергетики України № 6.1 від 19.12.2006); договору про творче співробітництво між НТУ «ХП» та КТ «Запорізький завод високовольтної апаратури» № 4/12; науково-дослідної роботи кафедри теоретичної та загальної електротехніки Запорізького національного технічного університету № 02119 «Розробка методик дослідження електромагнітних та теплових полів з метою оптимізації електричних обладнань», у якій здобувач був виконавцем окремих етапів.

**Мета та задачі дослідження.** *Мета дослідження* – підвищення роботоспроможності сильнострумних розривних електричних контактів через удосконалення конструкції механізму контактора перемикача відгалужень обмоток трансформатора, а також контроль взаємодії та температури контактних поверхонь.

Для досягнення зазначеної мети поставлені наступні задачі:

– аналіз основних конструкційних і експлуатаційних факторів, що впливають на роботу сильнострумних розривних контактів перемикача відгалу-

жень обмоток трансформатора;

- моделювання теплових процесів на поверхнях розривних контактів з урахуванням кінематики елементів руху привода;

- розроблення способу температурного контролю контактних поверхонь у процесі комутації;

- дослідження впливу на перехідний опір розривних контактів дотичної складової зусилля стискання;

- розроблення практичних рекомендацій щодо підвищення ефективності роботи розривних контактів та удосконалення конструкції контактора перемикача відгалужень обмоток трансформатора.

*Об'єкт дослідження* – фізичні процеси при роботі сильнотрумних комутаційних пристроїв.

*Предмет дослідження* – сильнотрумні розривні контакти контакторів змінного струму.

**Методи дослідження.** Теоретичні аспекти дисертації базуються на фундаментальних положеннях теорії електричних апаратів, теплотехніки і механіки. Для розрахунку температури контактної поверхні використовувалися чисельні методи розв'язання зворотної задачі теплопровідності. Розмір лінії контакту і напруження зусилля стискання визначалися методом найменших квадратів. Експериментальні дослідження проводилися на моделі контактора перемикача відгалужень обмоток трансформатора з використанням датчика переміщення розривних контактів. Експериментальні оцінювання перехідного опору розривних контактів проводилась методом вольтметра-амперметра.

**Наукова новизна одержаних результатів:**

- запропоновано математичну модель розрахунку процесу нагріву контактних поверхонь при їх замиканні, що дозволяє визначити миттєве значення температури по двом контрольним точкам доступним для виміру;

- вперше обґрунтовано та експериментально підтверджено можливість зниження перехідного опору розривних контактів шляхом докладання додаткового дотичного зусилля, що дає змогу удосконалити конструкцію перемикачів зменшивши втрати енергії в контактній системі;

- запропоновано аналітичні співвідношення, що моделюють довжину площадки контактування при різних умовах стискання розривних контактів;

- запропоновано метод оцінювання перехідного опору розривних контактів з урахуванням дотичного й нормального зусилля стискання, що дозволяє оптимізувати роботу контактів за критерієм відносності пластичної та пружної деформації контактних матеріалів.

**Практичне значення одержаних результатів** для електротехнічної галузі полягає у вдосконаленні конструкції контактора перемикача відгалужень обмоток трансформатора через установку на важільну систему гумово-металевих шарнірів, які дозволяють знизити енерговиділення на поверхнях контакту за рахунок збільшення початкової швидкості розмикання (патент України № 59301). Реалізовано у вигляді програми алгоритм температурного

контролю поверхонь розривних контактів, що дає можливість оцінити температуру контактної поверхні під час замикання з більшою точністю.

Результати дисертаційної роботи використані при розробленні контакторів у ПАТ "Запоріжтрансформатор" (м. Запоріжжя), а також застосовуються на кафедрах теоретичної та загальної електротехніки і електричних та електронних апаратів ЗНТУ у навчальному процесі в курсах лекцій підготовки бакалаврів напряму 6.050702 – Електромеханіка за спеціальностями «Електромеханічне обладнання енергоємних виробництв» та «Електричні машини та апарати».

**Особистий внесок здобувача.** Усі основні положення, що викладено в дисертації, отримані здобувачем особисто. Серед них: набула подальшого розвитку математична модель взаємодії контактних поверхонь з урахуванням дотичної складової зусилля, що уточнює механізм утворення площі фактичного контакту при замиканні. Розроблено методика оцінювання температури контактних поверхонь з використанням розрахункового алгоритму граничної зворотної задачі теплопровідності, це дозволило визначати температуру на контактних поверхнях після комутації за експериментальними значеннями, отриманими в зонах доступних для прямого вимірювання. На прикладі конструкції механізму контактора перемикача відгалужень обмоток трансформатора запропоновано рекомендації щодо комп'ютерного моделювання взаємодії поверхонь розривних контактів. Для поліпшення кінематики руху дугогазних контактів у конструкції механізму контактора обґрунтовано використання гумово-металевих шарнірів. Експериментально встановлено, що докладання дотичного зусилля до поверхні замкнених контактів здатне зменшити їх перехідний опір на 33 – 66 %. Обґрунтовано періодичність очищення трансформаторного масла в баку контактора з урахуванням утворення осаду механічних домішок (сажі) на контакт-деталі механізму контактора.

**Апробація результатів дисертації.** Матеріали дисертації обговорювалися та доповідалися на міжнародних симпозіумах «Проблеми вдосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. SIEMA» (м. Харків, 2007 – 2012 рр.); Міжнародній науково-технічній конференції «Електричні контакти та електроди» (м. Київ, 2011 р.), щорічній науково-технічній конференції «Тиждень науки» (м. Запоріжжя, 2009 – 2012 рр.).

**Публікації.** Основні результати дисертації опубліковано в 13 друкованих працях, з яких 8 статей у наукових виданнях України, 1 патент на корисну модель, 4 – у матеріалах конференцій.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, додатків та списку використаних джерел. Повний обсяг дисертаційної роботи становить 159 сторінок, серед них: 31 рисунків до тексту, 10 рисунків на окремих 10 сторінках, 7 таблиць по тексту, 2 додатки на 9 сторінках; список використаних джерел зі 152 найменувань на 16 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність дисертаційної роботи, сформульовано мету та задачі досліджень. Розкрито наукову новизну, а також викладено основні наукові та практичні результати, отримані при виконанні роботи. Наведено дані щодо апробації та публікацій результатів досліджень.

У **першому розділі** вказується на необхідність удосконалення електричних апаратів керування, задіяних у системах виробництва і споживання електроенергії. Ключовим питанням є підвищення роботоспроможності сильнострумних електричних РК.

Відмови в роботі контактних систем важко передбачити, оскільки вони найчастіше виникають у момент комутації та мають несистемний характер, що обумовлено нестійкими зв'язками хімічних (утворення діелектричних плівок), теплових (перегрів, дугові й електротермічні пошкодження), електричних (зростання електричного опору й напруги) і механічних (зношування, деформація, руйнування) факторів. До відмови в роботі РК можуть призвести як кількісні, так і якісні зміни всередині і поза структурою контактної пари (корозія, ерозія, висока температура і механічна деформація, зростання перехідного опору контактних поверхонь, порушення кінематики руху контактів і зміна робочого середовища).

Питання підвищення працездатності контактів тісно пов'язані з методами діагностики їх стану. Оскільки найбільш наочним проявом порушення в роботі контакт-деталей є динаміка теплових процесів на контактних поверхнях, то великий інтерес становить їх температурний контроль. Провести прямий контроль температури контактних поверхонь технічно складно через труднощі з доступом до зони контролю і швидкоплинністю процесу комутації. З цієї причини при дослідженні часто вдаються до аналітичних методів, побудованих на основі загальної теорії теплопровідності.

Аналіз наукових досліджень, що належить до вивчення роботи сильнострумних розривних контактів дозволяє окреслити коло питань, що потребують подальшого розгляду:

- 1) оцінка впливу основних конструкційних і експлуатаційних факторів при роботі комутаційних пристроїв на стан РК у процесі комутації;
- 2) взаємозв'язок основних експлуатаційних факторів з енерговиділенням на контактних поверхнях;
- 3) точність температурного контролю контактних поверхонь сильнострумних РК при комутації;
- 4) практичні рекомендації для покращення роботи контактних систем у конструкціях сильнострумних комутаційних пристроїв.

У **другому розділі** відповідно до плану дослідження обґрунтовано вибір базової моделі комутаційного пристрою – контактор перемикача відгалужень обмоток трансформатора КНОА 110/1000 з механізмом перемикання важільного (тумблерного) типу. Конструкція пристрою відповідає рівню завдань дослідження та діапазону досліджуваних факторів. Базова модель до-

зволяє диференційовано оцінити роботу РК як при наявності електродугових процесів, так і при електротермічному нагріванні замкнених контактів.

Аналіз електродугових процесів на контактах проводився з урахуванням комплексного параметру  $W$  – енергії електричної дуги знеструмлення. Цей параметр характеризує величину і тривалість енерговиділення на контактних поверхнях при їх розмиканні і може бути визначений як енергія джерела живлення та електромагнітного поля, накопичена в мережі, за винятком втрат в елементах навантаження

$$W = \int_0^{\tau} (Ui - i^2 r) dt + \frac{Li_{ot}^2}{2}, \quad (1)$$

де  $\frac{Li_{ot}^2}{2}$  – електромагнітна енергія в навантаженні до моменту розмикання;  $i_{ot}$  – струм кола в момент розмикання;  $i$  – зміна струму в колі при розмиканні;  $U$  – напруга джерела живлення;  $r$  – активний опір навантаження;  $L$  – індуктивність навантаження;  $t$  – поточний час;  $\tau$  – час дії електричної дуги.

Якщо вважати електричну дугу елементом, що входить до мережі схеми заміщення (рис.1), то можна оцінити зміну її характеристик за напругою і струмом, що проходить через дугу ( $u_d$ ,  $i_d$ ). Опис типової схеми заміщення у вигляді системи рівнянь являє собою динамічну модель дуги:

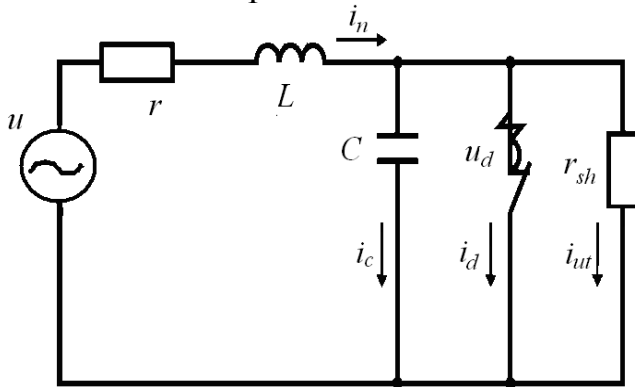


Рисунок 1 – Типова схема електричного кола заміщення

$$\left\{ \begin{array}{l} L \frac{di_n}{dt} + i_n r + u_d = u, \\ i_n = i_d + i_c + i_{ut}, \\ u_d = u_c, \\ i_c = C \frac{du_c}{dt}, \\ i_d = \frac{u_d}{r_d}, \\ u_d = i_{ut} \cdot r_{sh}, \end{array} \right. \quad (2)$$

де  $i_n$  – струм, що протікає в навантаженні;  $u_d$  – напруга на електричній дузі;  $C$  – ємність мережі, приведена до контактів;  $u_c$  – напруга на конденсаторі;  $i_{ut}$  – струм витоку;  $r_{sh}$  – шунтувальний опір;  $i_c$  – струм у конденсаторі;  $r_d$  – опір дуги.

Аналіз складових, що входять в динамічну модель із залученням окремих положень теплотехніки та газодинаміки, вказує на залежність енерговиділення від швидкості поширення електричної дуги в робочому середовищі. Ступінь цієї залежності можна оцінювати за результатами експерименту. Результатами спостереження стадій утворення та поширення дугового розряду при розмиканні контактів (рис. 2) підтверджено, що існує вплив динаміки розмикання контактів на швидкість переміщення дуги по контактних поверхнях. Установлено, що швидкий перехід у стан рухливості електричної дуги

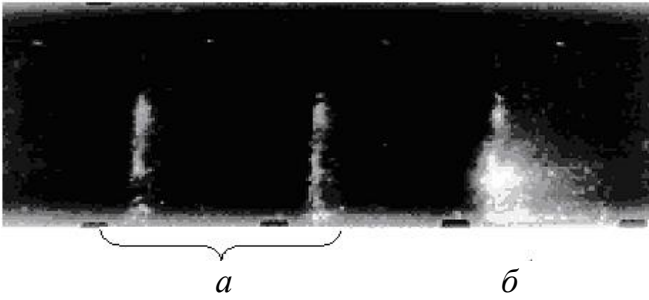


Рисунок 2 – Процес переходу мостикової ерозії (а) до стану дугового розряду між контактами (б) (за результатами швидкісної зйомки 2000 кадр/с)

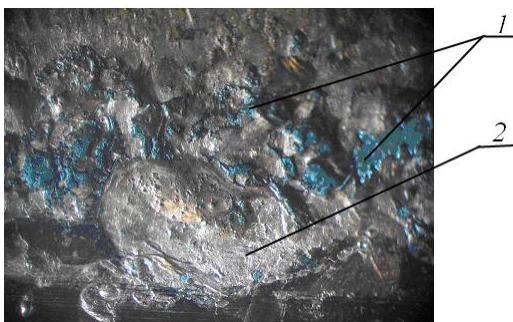
призводить до зниження енерговиділення на контактних поверхнях. Аналітичні методи оцінювання температури контактів здебільшого орієнтовані на визначенні середньої температури в сталому режимі. Такі розрахунки базуються на врахуванні втрат електричної енергії в контактній системі і мають широке застосування в інженерній і науковій практиці. При протіканні струму через контактну систему енергія що приводить до зростання

температури контакту. Інші джерела тепла не враховуються через нетривалість режиму комутації і теплоізоляцію робочого середовища. Температура контактної поверхні зазвичай визначається як:

$$Q_K = \frac{1}{\alpha_0} \left[ \alpha_0 Q_H + e \frac{\rho_0 \cdot \alpha_0 \cdot j_K^2 \cdot t_K - 1}{c \cdot \gamma} \right], \quad (3)$$

де  $\alpha_0$  – температурний коефіцієнт електричного опору;  $\rho_0$  – питомий опір матеріалу провідника при 0 °С;  $Q_H$  – початкова температура контакту;  $j_K$  – густина струму;  $t_K$  – тривалість протікання струму (не більше 5 с);  $c$  – теплоємність контакту;  $\gamma$  – питома вага контактного матеріалу.

Проте існуюча методика оцінювання температури дає приблизні результати про стан сильнострумних РК. Значення температури, які визначаються за цією методикою, зазвичай становлять менше 300 °С. Однак з практики відомо, що реально температура контактів в моменти комутації зростає до значно більших показників зі швидкістю більше ніж 200 град/с.



1 – оксидні плівки, 2 – ділянки оплавлення контактів

Рисунок 3 – Зона пошкодження контактної поверхні

Але через швидкоплинність процесу висока температура локалізується на контактній поверхні. Підтвердження цьому видно на знімках (рис. 3), де поверхня головного контакту контактора оплавлена (для міді температура плавлення становить 1083 °С) на глибину не більше 1–2 мм. Установлено, що розрахункові методи, які застосовуються для оцінювання температури контактних поверхонь сильнострумних РК, не відповідають реальним умовам їх роботи.

З цієї причини пропонується використовувати методика, що ґрунтується на розв'язанні граничної зворотної задачі теплопровідності (ЗЗТ), яка успішно реалізується в багатьох галузях науки



(двигунобудування, металургії, зварювання та ін.), але поки що не набула достатнього поширення в галузі електротехніки.

У третьому розділі, присвяченому контролю температури контактних поверхонь, наголошується, що певну складність у цьому питанні створюють електродугові процеси. Висока концентрація енергії з інтенсивним тепло- і масообміном у зоні електричної дуги суттєво обмежує можливості експериментальних досліджень. Найбільш доступним засобом експериментального

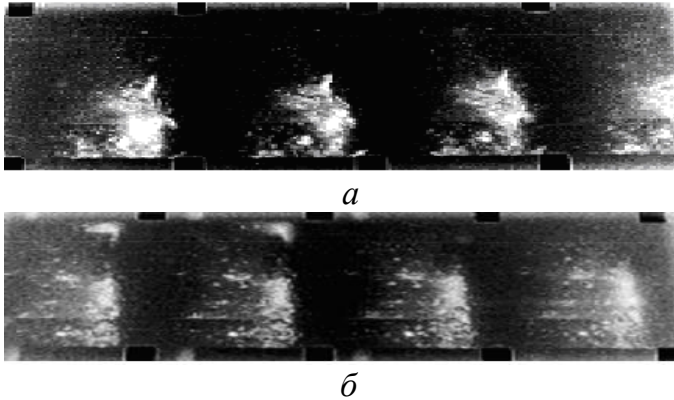


Рисунок 4 – Кінограма розмикання дугогасних контактів при 0,45 м/с (а) та 1,85 м/с (б)

дослідження електродугових процесів залишається їх візуальний аналіз за кадрами швидкісної кінозйомки (рис.4). Зйомка дугового розряду зі швидкістю 1500 – 2000 кадр/с дозволяє спостерігати реакцію дуги на зміну зовнішніх факторів, зокрема за поведінкою дугового розряду при зростанні швидкості розмикання контактів. За результатами зйомки досліджено, що збільшення швидкості розмикання контактів (у нашому випадку від 0,35 до 2,7 м/с) призводить до зростання динаміки фізико-механічних процесів і турбулентності горіння електричної дуги. В результаті збільшуються розміри дуги і зменшується яскравість її ядра. До деякої міри, температуру електричної дуги можна оцінити за зовнішніми ознаками використовуючи формулу наведену Макаровим А.М.

$$T = 100 \cdot 4 \sqrt{\frac{K_1 \cdot P}{d \cdot \pi \cdot l_d \cdot C_1}}, \quad (4)$$

де  $C_1$  – постійна;  $d$ ,  $l_d$  – усереднені діаметр і довжина дуги відповідно;  $P$  – потужність, що виділяється в дузі;  $K_1$  – розрахунковий коефіцієнт.

Отже, знизити тепловий вплив електричної дуги на контакти при її стабільній потужності доцільно шляхом збільшення її розмірів (довжини, діаметру). Тому при розмиканні контактів необхідно максимально швидко перевести дугу в стадію високої рухливості, збільшивши швидкість розмикання контактів. При цьому щоб уникнути перенапруження в мережі (ефект зрізу струму), рекомендується збільшувати тільки початкову фазу розмикання контактів, зберігаючи середню швидкість розмикання в межах допустимих значень.

Процес замикаання головних сильнострумних контактів, як правило, відбувається без дугових процесів. Однак через велику густину струму на площі фактичного контакту настає її перегрів, що викликає зниження міцності й оплавлення контактних матеріалів. Прямий контроль температури контактних поверхонь у цьому стані викликає технічні труднощі. З цієї причини запропоновано використовувати метод чисельного експерименту, побудова-

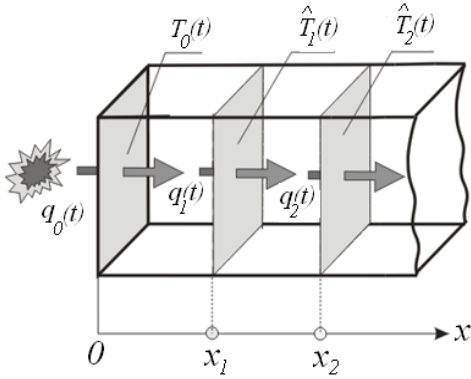


Рисунок 5 – Розрахункова схема для визначення температури контактної поверхні  $T_0(t)$

ний на основі рішення граничної зворотної задачі теплопровідності (ЗЗТ), який дозволяє апроксимувати показники температури, отримані в доступних для вимірювання точках на контактну поверхню.

Досліджувана модель контакту представлена у вигляді теплоізолюваної системи (рис.5), нагрівання якої здійснюється одновимірним тепловим потоком. Загальна задача знаходження температурного поля контакту спочатку зводилася до перерахунку граничних умов першого роду, визначених експериментально, в гра-

ничні умови другого роду. Далі, за експериментальними результатами температур  $T_1(t)$  та  $T_2(t)$ , визначеними в процесі комутації на відстані  $x_1$  та  $x_2$  від контактної поверхні відповідно, побудована модель нестационарного теплопереносу:

$$\begin{cases} c\gamma \frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T_1}{\partial x} \right), & 0 < x < x_1, & 0 < t < t_k; \\ c\gamma \frac{\partial T_2}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T_2}{\partial x} \right), & x_1 < x < x_2, & 0 < t < t_k. \end{cases} \quad (5)$$

З урахуванням граничних умов

$$\begin{cases} T|_{x=0} = T_0(t), & x = 0, & 0 < t < t_k; \\ T|_{x=x_1} = \hat{T}_1(t), & x = x_1, & 0 < t < t_k; \\ T|_{x=x_2} = \hat{T}_2(t), & x = x_2, & 0 < t < t_k; \\ T_1 = T_2 = T_0, & t = 0. \end{cases} \quad (6)$$

Застосування методу числового розв'язання диференційних рівнянь з частковими похідними (5, 6), дозволило визначити тепловий потік на координаті  $x_1$  та скласти систему різницевих рівнянь (7), які відтворюють ситчасу модель температурного поля контакту. «Некоректності», у математичному сенсі, що виникали при розв'язанні задачі усувалися за допомогою методу квазіперетворення:

$$\begin{cases} \frac{q_{i+1}^k - q_i^k}{h} = -c\gamma \frac{T_i^{k+1} - T_i^{k-1}}{2\tau} - \alpha \frac{1}{\lambda^2} q_i^k; \\ \frac{T_{i+1}^k - T_i^k}{h} = -\frac{1}{\lambda} q_i^k - \alpha c\gamma^2 \frac{T_i^{k+1} - 2T_i^k + T_i^{k-1}}{\tau^2}, \end{cases} \quad (7)$$

де  $c\gamma$  – питома об'ємна теплоємність;  $\lambda$  – теплопровідність;  $T_i$  – визначальне температурне поле;  $t_k$  – тривалість спостережуваного процесу;  $h$  – крок сітки за простором;  $\tau$  – крок сітки за часом;  $\alpha$  – параметр регуляризації.

Остаточно, рішення системи (7) шляхом ітерації дозволило розрахувати значення температури поверхні контакту за наступним алгоритмом:

$$\left\{ \begin{array}{l} q_{i+1}^1 = -\frac{hc\gamma}{\tau} (T_i^1 - T_i^0) - \left( \alpha \frac{h}{\lambda^2} - 1 \right) q_i^1, \quad 0 < i < N, \quad k = 1; \\ q_{i+1}^k = -\frac{hc\gamma}{2\tau} (T_i^{k+1} - T_i^{k-1}) - \left( \alpha \frac{h}{\lambda^2} - 1 \right) q_i^k, \quad 0 < i < N - 1, \quad k = 2, \dots, K - 1; \\ q_{i+1}^K = -\frac{hc\gamma}{\tau} (T_i^K - T_i^{K-1}) - \left( \alpha \frac{h}{\lambda^2} - 1 \right) q_i^K, \quad 0 < i < N - 1, \quad k = K; \\ T_{i+1}^k = -\frac{h}{\lambda} q_i^k - \alpha \frac{c\gamma^2 h}{\tau^2} (T_i^{k+1} - 2T_i^k + T_i^{k-1}) + T_i^k, \quad 0 < i < N - 1, \quad k = 1, \dots, K. \end{array} \right. \quad (8)$$

У четвертому розділі наведено аналіз причин зростання перехідного опору розривних контактів у процесі експлуатації. Подвійна природа механізму перехідного опору на контактних поверхнях зумовила дослідження механізму утворення поверхневих плівок та площі фізичного контакту при стиранні. Існує неоднозначне уявлення про вплив поверхневих плівок на перехідний опір сильнострумних РК. Проте очевидно, що у всіх випадках поверхневі плівки незалежно від їх природи товщиною понад  $3 \cdot 10^{-9}$  м є причиною зростання електричного опору на контактах і роль робочого середовища при цьому є визначальною. При експлуатації маслонаповнених електричних апаратів електродугові процеси при комутації викликають термічну деструкцію масла з утворенням шламу, що осаджується на контактних поверхнях.

У результаті експериментальних досліджень отримані узагальнені результати гранулометричного складу механічних частинок у маслі з контакторів перемикача відгалужень електропічних трансформаторів, які показали, що осад на контактних поверхнях значно зростає після 15 тис. перемикачів (табл.1). На підставі аналізу отриманих результатів рекомендовано скорегувати періодичність очищення масла в контакторі для уникнення зростання перехідного опору РК.

Таблиця 1 – Гранулометричний склад осаду

Кількість перемикачів, тис.	Розміри частинок, мкм				
	1-5	5-7	7-10	10-14	14-25
5	45-50	30-35	30-35	28-32	19-23
10	53-57	40-44	40-44	37-41	37-43
15	58-62	44-48	40-45	36-41	28-32
20	58-62	47-51	42-46	30-35	24-29

Відомо, що зусилля стискання контактних поверхонь є основним чинником формування характеру контактної взаємодії, що підтверджується емпіричною залежністю перехідного опору від умов роботи контактів:

$$R = \frac{k \left( 1 + \frac{2}{3} \cdot \alpha \cdot T_0 \right)}{(0,1 \cdot P_K)^m}, \quad (9)$$

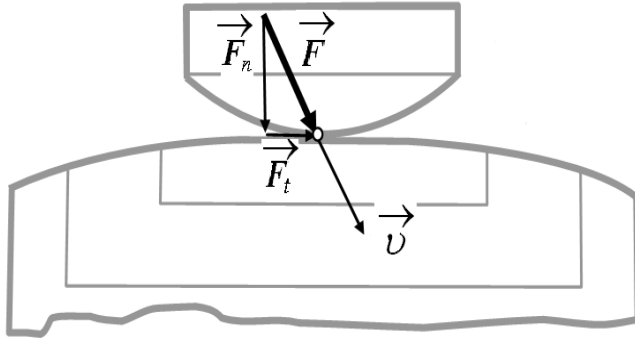


Рисунок 6 – Розрахункова модель взаємодії контактних поверхонь

де  $P_K$  – сила контакт-ного стискання;  $k, m$  – коефіцієнти, що враховують властивості матеріалу контактів та характер контактної взаємодії.

Бажання знайти загальні закономірності залежності перехідного опору від зусилля

стиснення призвело до необхідності враховувати поряд з силою стискання  $\vec{F}_n$ , нормально спрямованої до контактних поверхонь дотичної сили  $\vec{F}_t$ , яка до розрахунку зазвичай не приймається і призводить до недооцінки її впливу на формування поверхні фактичного контакту, а отже, і перехідного опору (рис. 6). Довказом цьому є результати, отримані внаслідок комп'ютерного моделювання взаємодії контактних поверхонь за допомогою пакету розрахункових програм.

Користуючись положеннями теорії пружності деформація контактної поверхні визначалася рівнянням:

$$\nabla \left( \left( \frac{\mu \cdot E}{(1 + \mu) \cdot (1 - 2 \cdot \mu)} + \frac{E}{2 \cdot (1 + \mu)} \right) \cdot \operatorname{div}(\vec{v}) \right) + \nabla \left( \frac{E}{2 \cdot (1 + \mu)} \cdot \nabla \vec{v} \right) = 0. \quad (10)$$

де  $\vec{v}$  – двомірний вектор переміщення;  $E$  – модуль пружності;  $\mu$  – коефіцієнт Пуассона.

Особливість розрахунків полягала в необхідності враховувати пружно-пластичний характер взаємодії.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \left( \frac{\mu \cdot E}{(1 + \mu) \cdot (1 - 2 \cdot \mu)} + \frac{E}{2 \cdot (1 + \mu)} \right) \cdot \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{E}{2 \cdot (1 + \mu)} \cdot \frac{\partial v_x}{\partial x} \right) = 0,$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left( \left( \frac{\mu \cdot E}{(1 + \mu) \cdot (1 - 2 \cdot \mu)} + \frac{E}{2 \cdot (1 + \mu)} \right) \cdot \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{E}{2 \cdot (1 + \mu)} \cdot \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) = 0 \quad (11)$$

враховуючи, що  $\frac{\partial v_x}{\partial x} = \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0$  при  $x = 5$  мм

де  $\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y}$  – відносне подовження;  $v_x, v_y$  – компоненти вектора переміщення.

Основним завданням моделювання є визначення параметрів довжини  $A$  лінії контактної площі та перехідного опору  $R$ . Лінії контакту визначалися для двох варіантів навантаження (силою нормальною до площі контакту  $A_1$  та сумою нормальної та дотичної сил,  $A_2$ ). Результати розрахунків зведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Розмір лінії контакту

Розмір лінії контакту	Параметр ( $P$ )									
	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00
$A_1 \cdot 10^{-4}, \text{м}$	0,40	0,80	1,05	1,25	1,38	1,43	1,55	1,75	1,98	2,00
$A_2 \cdot 10^{-4}, \text{м}$	1,57	1,76	1,85	2,14	2,37	2,43	2,61	2,75	2,82	2,90

Степеневі залежності довжини площадки контакту, отримані в результаті розрахунку, мають вид:

$$\begin{aligned} A_1 &= 2,86 \cdot 10^{-4} \cdot P^{0,29}, \text{ м} \\ A_2 &= 2,10 \cdot 10^{-4} \cdot P^{0,66}, \text{ м}. \end{aligned} \quad (12)$$

За допомогою математичного моделювання доведено, що докладання дотичного зусилля до замкнутих контактів сприяє зменшенню перехідного опору, особливо при невеликих нормальних зусиллях. Площа контакту базової моделі визначалася як добуток довжини лінії контакту на ширину контакту. За розмірами площі контакту визначалися значення перехідного опору головних контактів базової моделі (рис.7).

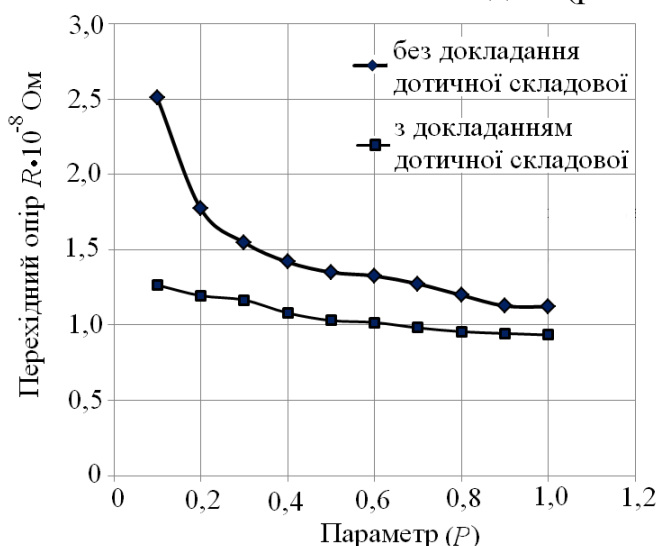


Рисунок 7 – Залежність перехідного опору контактів від способу силового навантаження

Завдяки шорсткості твердих поверхонь фактичний контакт відбувається тільки в окремих нечисленних точках дотику. Кількість, розмір і розташування цих точок багато в чому залежить від характеру прикладеного зусилля стискання. Збільшення нормального зусилля приводить до зростання кількості точок контакту, а дотичне зусилля здатне збільшувати їх площу. Зменшення перехідного опору при докладанні дотичного зусилля отримало експериментальне підтвердження.

На стенді з визначення перехідного опору РК встановлено, що перехідний опір при наявності дотичного зусилля зменшується від 41 до 46 % для мідних і 44 до 66 % для латунних контактів. Для срібних контактів цей ефект проявився тільки в діапазоні невеликих зусиль стискання 19,6–29,4 Н, що пояснюється розбіжністю в механічних властивостях контактних матеріалів. Результати проведеного експерименту наведені на рис.8.

**У п'ятому розділі** надані рекомендації по підвищенню роботоспроможності сильнотрумних РК. Рекомендації стосуються контактів базової моделі – контактора перемикача відгалужень обмоток трансформатора КНОА 110/1000, проте можуть носити і загальний характер.

Кінематична схема контактора, являє собою двокоромисловий чотири-

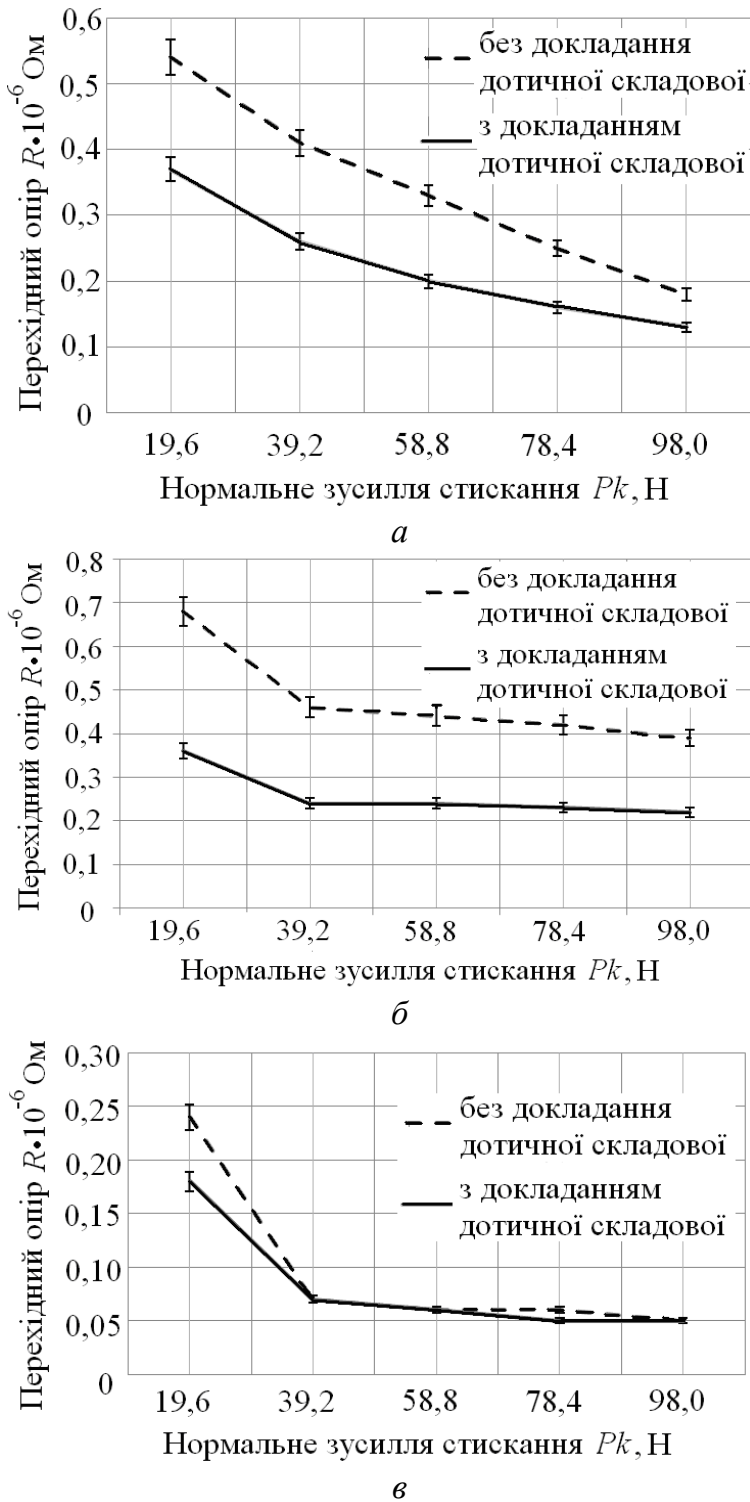


Рисунок 8 – Перехідний опір розривних контактів з міді (М1) (а), латуні (ЛС-59) (б) та срібла (КМК-А00) (в) у залежності від характеру навантаження

шарнірного механізму без тертя між собою. Реакція зміщення шарів полімеру на прикладене зусилля протікає значно швидше, ніж реакція елементів циліндричного шарніра при наявності сил тертя між ними. Для визначення корисного ефекту від такого впровадження проведений експеримент, у якому порівнювався характер руху дугогасильного контакту на макеті контактора

ланковий механізм з пружинним механізмом замикання. Попередньо було доведено, що сили тертя в шарнірних вузлах такого механізму мають істотний вплив на кінематику руху елементів. Особливо це спостерігається при переході від стану спокою до руху. Саме цей стан механізму відповідає початку розмикання дугогасильних контактів і повинен проходити з максимальною швидкістю. Отже, необхідно знизити вплив сил тертя в шарнірах механізму контактора для поліпшення кінематики руху контактів. Досягнути цього вдалося шляхом модернізації шарнірних з'єднань механізму контактора. Модернізація полягала в заміні найбільш навантажених шарнірних вузлів на гумово-металеві шарніри (ГМШ) (рис. 9). Конструктивно ГМШ являють собою коаксильно розташовані циліндричні елементи, між якими знаходиться еластомерний матеріал (наприклад, гума). Така конструкція дозволяє переміщувати елементи

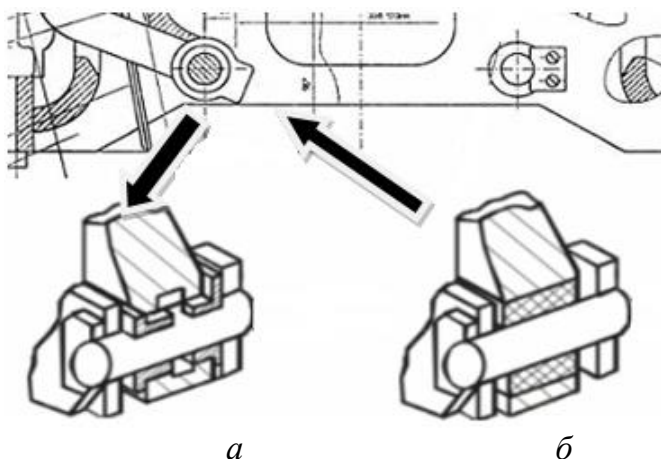


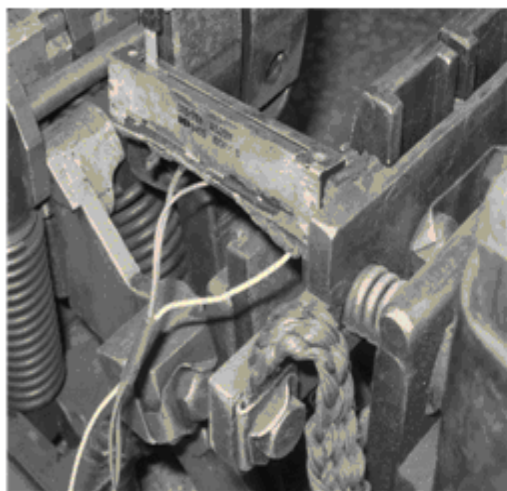
Рисунок 9 – Схема заміни циліндричних шарнірів (а) на ГМШ (б)

кінематику руху контактів. Початкова стадія руху контакту відбувається втричі швидше.

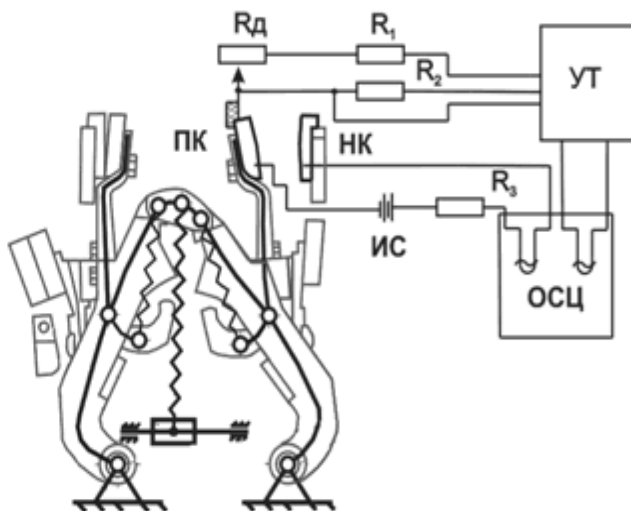
до і після модернізації. Переміщення контакту фіксувалося за допомогою реостатного датчика. Схема підключення датчика показана на рис.10.

За осцилограмами, одержаними під час перемикання контактора, побудовані графіки руху контакту, а шляхом їх графічного диференціювання графіки швидкостей (рис. 11 а, б). Аналізуючи отримані результати, можна стверджувати, що модернізація механізму контактора суттєво покращила

стадія руху контакту відбувається



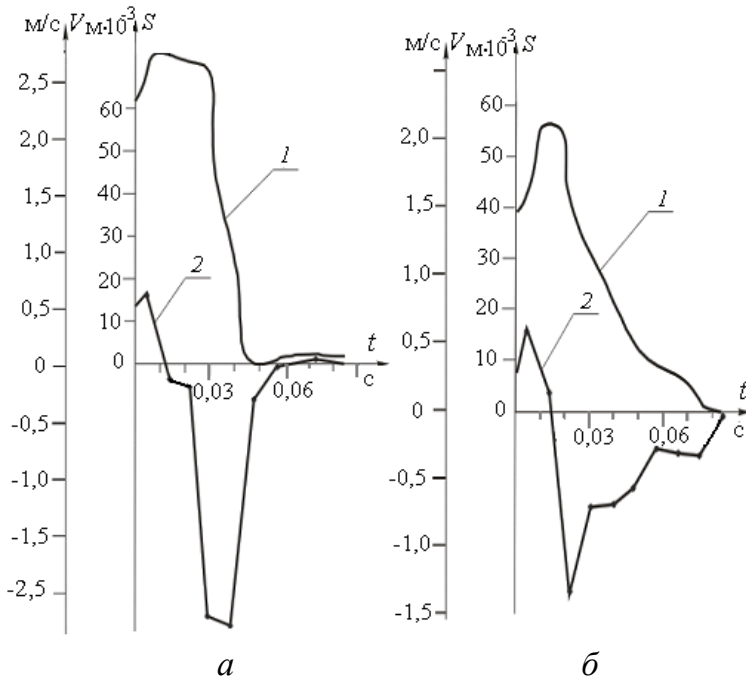
а



б

Рисунок 10 – Фотографія вузла кріплення датчика на контактах (а) та схема експериментальної установки (б)

На основі аналізу пружно-пластичного характеру взаємодії контактних матеріалів показано, що зусилля спрямовані по дотичній до поверхні замкнених контактів, сприяють зниженню перехідного опору. Стосовно конструкції базової моделі такі рекомендації можна реалізувати з мінімальними витратами, наприклад встановивши ексцентрикові вісі в шарнірних вузлах кріплення коромисел. Схема такої модернізації показана на рис 12. Оцінка характеру взаємодії контактних поверхонь у реальних умовах вимагає врахування великої кількості факторів (механічні характеристики контактних матеріалів при робочих температурах, конфігурація і мікрогеометрія поверхонь, що контактують, механічних і адгезійних властивостей поверхневих плівок та ін.) Це суттєво ускладнює побудову моделі контактної взаємодії. Однак сучасні методи комп'ютерного моделювання на основі кінцево-елементного аналізу



1 – графік переміщення контактів; 2 – графік швидкості контактів

Рисунок 11 – Графіки руху контактів до (а) та після (б) модернізації конструкції механізму контактора

Наприклад, це стосується існуючої методики контролю температури РК, коли поза увагою залишається температура контактних поверхонь у процесі комутації. Впровадження методики контролю температури через постановку числового експерименту на основі ЗЗТ дозволить підвищити рівень діагностики робочого стану контактної системи. Періодичність заміни трансформаторного масла в контакторах визначається здебільшого за втратами

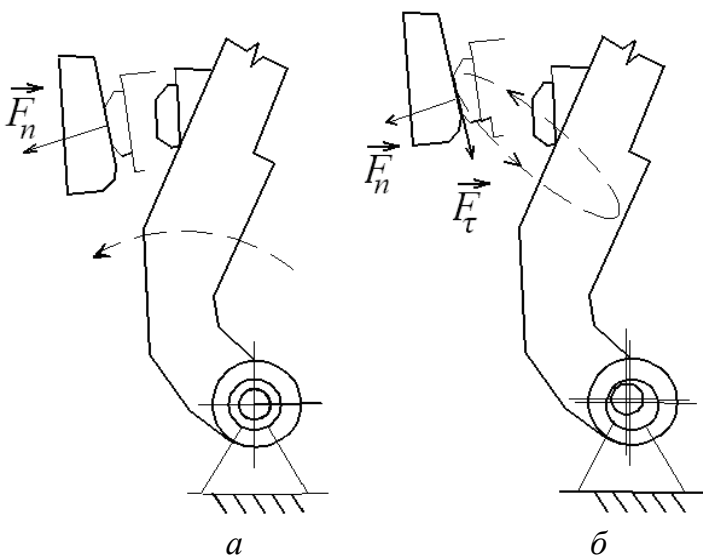


Рисунок 12 – Важільна система контактора до (а) та після (б) установки ексцентрикових осей

дозволяють істотно спростити цю задачу, використовуючи пакети розрахункових програм. Результати такої роботи на прикладі контактної задачі для РК базової моделі представлені у вигляді епюр напружень і переміщень на поверхні головних контактів (рис. 13).

Запорукою надійної експлуатації комутаційних апаратів є заходи щодо їх кваліфікованого технічного обслуговування. Незважаючи на те, що регламент робіт з технічного обслуговування контактора досить визначений, є необхідність його уточнення.

Наприклад, це стосується існуючої методики контролю температури РК, коли поза увагою залишається температура контактних поверхонь у процесі комутації. Впровадження методики контролю температури через постановку числового експерименту на основі ЗЗТ дозволить підвищити рівень діагностики робочого стану контактної системи. Періодичність заміни трансформаторного масла в контакторах визначається здебільшого за втратами діелектричних властивостей. Є гіпотеза, що сам процес забруднення масла продуктами термічної деструкції не впливає на оцінку його стану. Однак продукти термічного розкладу масла в баці контактора (переважно сажеві частки) мають властивість при досягненні певної насиченості в маслі, інтенсивно осідати, утворюючи діелектричну плівку на контакт-деталях. З цієї причини слід уточнити періодичність заміни або очищення масла в баку контактора з терміном



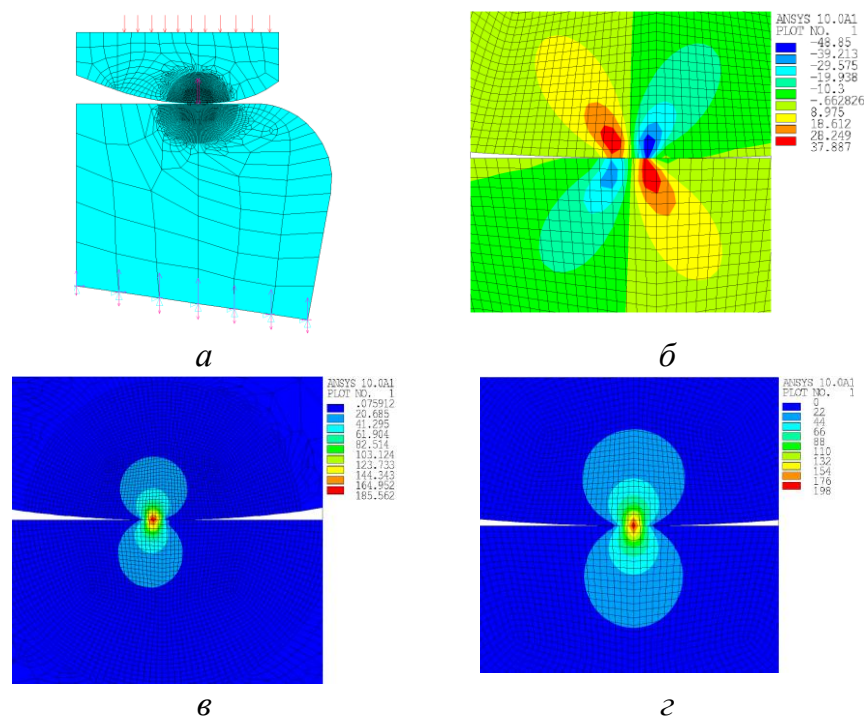


Рисунок 13 – Результати моделювання взаємодії контактів в контакторі КНОА 110/1000: *а* – розбивка моделі на КЕ, *б* – епюри переміщення поверхневих шарів, *в, з* – епюри напружень у зоні контакту при зусиллях замикання 156,8 та 245 Н

не більше 15000 циклів перемикачів.

Кінематику руху контактів слід оцінювати не тільки за середньою швидкістю, але й за динамікою наростання швидкості. Заходи щодо підвищення швидкості на початковій стадії руху РК позитивно позначаться на їх роботоспроможності.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено зниження перехідного опору сильнострумних розривних електричних контактів при впливі дотичного зусилля, вдосконалена конструкція привода перемикача відгалужень обмоток трансформатора з урахуванням швидкості переміщення електричної дуги, запропонована математичну модель процесу нагрівання контактних поверхонь при замиканні та наведені рекомендації щодо зменшення зношування контактів. Основні висновки роботи полягають у наступному:

1. Виконано аналіз основних конструкційних і експлуатаційних параметрів, які впливають на роботу розривних електричних контактів у конструкції маслонаповненого перемикача відгалужень обмоток трансформатора. Встановлено два основні параметри, які визначають прогресуюче зношування контактів та зростання втрат електроенергії у контакторі: перехідний опір головних контактів, який збільшується з часом експлуатації, та теплову дію електричної дуги, що розрушає контакти при малій швидкості її переміщення у початковий момент розмикання контактів.

2. Дослідження електродугових процесів РК вказує на значний вплив кінематики руху контактів на початковій стадії розмикання, що зумовлює внесення конструктивних змін в існуючі системи перемикачів.

3. Розроблено спосіб температурного контролю контактних поверхонь під навантаженням, який базується на принципі чисельного рішення граничної зворотної теплопровідності. Особливістю способу є визначення температури в процесі комутації за експериментальними значеннями, які отримані в зонах, доступних для прямого вимірювання.

4. Одержала подальший розвиток теорія взаємодії контактних поверхонь електричних контактів з урахуванням додаткового прикладення дотичного зусилля до поверхонь при замиканні. Доведено зростання елементарних ділянок фактичного контакту з трансформацією їх в еліптичну форму, витягнуту в напрямку дотичної сили. Математична модель взаємодії контактних поверхонь ще на стадії проектування контактора, може бути використана для вдосконалення конструкції контактних систем за критерієм відносності пластичної та пружної деформації. Використання пристрою для створення дотичного зусилля до поверхонь замкнених контактів, величина якого не перевищує 0,1 від нормального, зменшує перехідний опір на 33 – 66%.

5. Розроблені рекомендації з проектування та проведенню регламентних робіт по технічному обслуговуванню контактора перемикача відгалужень обмоток трансформатора. Запропонована та захищена патентом України конструкція контактного привода контактора перемикача відгалужень обмоток трансформатора під навантаженням. Перевагою конструкції є використання гумово-металевих шарнірів у важільному механізмі, що забезпечує підвищення швидкодії у три рази на початковій стадії розмикання контактів порівняно з базовою конструкцією. Обґрунтовано періодичність проведення регенерації масла в баці контактора не менше ніж через 15000 циклів комутації, що дозволяє знизити вплив плівок забруднення на перехідний опір РК.

6. Результати роботи використані при розробленні контакторів у ПАТ "Запоріжтрансформатор" (м. Запоріжжя) та застосовуються в навчальному процесі на кафедрах теоретична та загальна електротехніка і електричні та електронні апаратів ЗНТУ.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Волкова О.Г. Повышение надежности электромеханических коммутационных систем / О.Г. Волкова, В.П. Волков, В.С. Винниченко, // Весник СевГТУ. Механика, енергетика, екологія. – 2006. – Вип. 75 – С. 166–171.

*Здобувачем дана оцінка електричних і механічних характеристик контактних матеріалів, які використовуються в роботі перемикаючих пристроїв.*

2. Волкова О.Г. Влияние скорости размыкания на электроизнос дугогасящих контактов в аппаратах высокого напряжения / О.Г. Волкова // Електротехніка і електромеханіка. – 2008. – № 3. – С. 7–9.

3. Волкова О.Г. Влияние усилия замыкания разрывных контактов на переходное сопротивление / О.Г. Волкова // Електротехніка і Електромехані-

ка. – 2011. – № 2 – С. 25–26.

4. Волкова О.Г. Исследование механизма образования поверхностных пленок на контактах маслonaполненных коммутационных устройств / О.Г. Волкова // Электротехника та Електроенергетика. – 2011. – № 2. – С.22–25.

5. Волкова О.Г. Электродуговые процессы сильноточных разрывных электрических контактов / О.Г. Волкова, В.Н. Кухтин // Весник СевГТУ. Механика, енергетика, екологія. – 2011. – Вип. 120 – С. 253–257.

*Здобувачем проведено аналіз впливу кінематики руху РК при розмиканні на енерговиділення і зношування контактних поверхонь.*

6. Волкова О.Г. Снижение энерговыделения на поверхностях сильноточных разрывных контактов при коммутации / О.Г. Волкова, В.С. Лупиков, Е.И. Байда // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2011. – № 12. – С. 26–35.

*Здобувачем проведено теоретичні та експериментальні дослідження з метою зменшити енерговиділення на контактних поверхнях при комутації шляхом збільшення початкової швидкості розмикання контактів. З цією метою запропоновано встановлювати в конструкціях важільних механізмів перемикачів контактних ГМШ.*

7. Волкова О.Г. Исследование влияния усилия сжатия на переходное сопротивление разрывных электрических контактов / О.Г. Волкова, В.С. Лупиков, Е.И. Байда // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2012. – №. 28 – С. 12–21.

*Здобувачем проведено дослідження залежності перехідного опору електричних контактів від сили стискування.*

8. Волкова О.Г. Измерение температуры поверхности разрывных контактов / О.Г. Волкова // Электрика. – Москва. – 2013. – № 4. – С. 41–43.

9. Пат. 59301 України, МПК Н01F 29/04, Н01Н 5/00. Механізм контактора трифазного перемикача відгалужень обмоток трансформатора під навантаженням / О.Г. Волкова, Г.П. Волков. – № u201012562; Заявл. 25.10.2010. Опубл. 10.05.2011. Бюл. № 9 – 5 с.

*Здобувачем запропоновано інженерне рішення по підвищенню ефективності роботи механізму перемикачів РПН шляхом вдосконалення конструкції шарнірних вузлів.*

10. Волкова О.Г. Влияние усилий замыкания на переходное сопротивление в разрывных электрических контактах / О.Г. Волкова // Тиждень науки: тези доповідей наук.-техн. конф., Запоріжжя: ЗНТУ. – 13-17 квітня 2009. – Т.1 – С. 180.

11. Волкова О.Г. Способы снижения энерговыделения на поверхностях разрывных электрических контактов / О.Г. Волкова // Матеріали міжнародної науч.-техн. конф. «Електричні контакти і електроди», Київ: Українське матеріалознавче товариство ІПМ НАН України, 19-23 серпня 2011. – С. 25 – 26.

12. Волкова О.Г. Анализ факторов влияющих на робоспособность сильноточных электрических контактов / О.Г. Волкова // Тиждень науки : тези

доповідей наук.-техн. конф., Запоріжжя: ЗНТУ. – 11-15 квітня 2011. – Т.1 – С. 141.

13. Волкова О.Г. Использование метода численного моделирования при проектировании коммутационных устройств / О.Г. Волкова // Тижень науки: тези доповідей наук.-техн. конф., Запоріжжя: ЗНТУ. – 9-13 квітня 2012. – Т.1 – С. 66.

## АНОТАЦІЇ

**Волкова О.Г. Удосконалення контактного привода перемикача відгалужень обмоток трансформатора з метою зменшення зношування контактів.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.01 – електричні машини й апарати. – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, 2013.

Дисертація розкриває питання ефективності роботи сильнострумних розривних електричних контактів шляхом удосконалення конструкції механізму контактора перемикача відгалужень обмоток трансформатора та температурного контролю контактних поверхонь. Особлива увага в роботі приділялася перехідному опору та електродуговим процесам при розмиканні контактів.

У роботі за допомогою комп'ютерного моделювання представлена модель взаємодії контактних поверхонь, що враховує вплив дотичного зусилля на перехідний опір. На базі алгоритму числового вирішення граничної зворотної задачі теплопровідності представлено спосіб визначення температури контактної поверхні. Запропоновано метод модернізації механізму контактора з використанням гумово-металевих шарнірів, який дозволяє знизити енерговиділення на поверхнях дугогасних контактів.

*Ключові слова:* конструювання електричних апаратів, контактор, розривний контакт, електрична дуга, температура контактної поверхні, перехідний опір.

**Волкова О.Г. Усовершенствование контактного привода переключателя ответвлений обмоток трансформатора с целью уменьшения износа контакта.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.01 — электрические машины и аппараты. – Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", Харьков, 2013.

Диссертация раскрывает вопросы повышения эффективности работы сильноточных разрывных электрических контактов путем усовершенствования конструкции механизма контактора переключателя ответвлений обмоток

трансформатора, а также контроля взаимодействия и температуры контактных поверхностей. В диссертационной работе были исследованы вопросы, касающиеся мероприятий по усовершенствованию работы контактора путем повышения эффективности работы его разрывных контактов. В работе был проведен анализ основных конструкционных и эксплуатационных факторов, оказывающим влияние на работу разрывных электрических контактов. Особое внимание уделялось двум основным комплексным факторам, оказывающим определяющее значение на работу контактной системы: переходному сопротивлению на поверхности силовых разрывных контактов и электродуговым процессам, возникающим при размыкании контактов под нагрузкой.

На основании исследования влияния взаимодействия контактных поверхностей на переходное сопротивление получила дальнейшее развитие модель переходного сопротивления, учитывающая влияние касательного усилия на рост площадок фактического контакта.

Представлена методика оценки температуры контактных поверхностей в процессе коммутации с использованием расчетного алгоритма численного решения граничной обратной задачи теплопроводности. Это позволяет методами непрямого измерения определять температуру контактных поверхностей в процессе коммутации.

Был предложен и получил теоретическое и экспериментальное обоснование метод модернизации механизма контактора с использованием резино-металлических шарниров, позволяющий значительно улучшить кинематику движения дугогасящих контактов при размыкании.

Предложен способ оценки взаимодействия контактных пар в конструкциях коммутационных устройств методом компьютерного моделирования с применением пакета прикладных программ «ANSYS» и «Comsol Multiphysics». Такой подход к решению контактной задачи позволит еще на стадии проектирования оптимизировать взаимодействие контактных пар в зависимости от конструкционных и эксплуатационных факторов.

*Ключевые слова:* конструирование электрического аппарата, контактор, разрывной контакт, электрическая дуга, температура контактной поверхности, переходное сопротивление.

**Volkova O.G. An Improvement of the Contact-Drive Mechanism Transformer's Tap-Changer with the Purpose to Decrease a Contact Wear.** – Manuscript copyright.

The thesis is presented for sciences Ph.D. degree in specialty 05.09.01 – Electric machines and apparatus. — National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, 2013.

The thesis is devoted to the efficiency work of interrupting contact by improving design of contactor mechanism and temperature control of contact surfac-

es. Special emphasis was paid to contact resistance and electric arc processes during opening.

In this work with the help of computer simulation the model of contact surfaces interaction, which taking into account influence of tangential force on contact resistance is presented.

On the basis of the numerical solving algorithm of inverse boundary heat conduction problem was presented a method for determination of the contact's surface temperature. A method of mechanism contactor modernization with the use of rubber-metal hinges, which allow reducing energy-release on the arc contact surfaces was proposed.

Method of contact pair interference estimation in the switching devices constructions by means of computer simulation with a help of the software package «ANSYS» and «Comsol Multiphysics» was proposed. This approach of solving the contact problem will allow optimizing a contact pair interference in dependence of constructive and operation factors at the stage of design.

*Keywords:* contraction of electrical apparatus, contactor, interrupting contact, electric arc, temperature of contact surface, contact resistance, transformer oil.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Boauf', is centered on the page.