

Черкаський державний технологічний університет
Міністерство освіти і науки України

КИСЕЛЬОВ ВЛАДЛЕН БОРИСОВИЧ

УДК 004:621.31:004.942](043.3)

**ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ
ЗНОСОСТІЙКОСТІ СЛАБКОСТРУМОВИХ
ЕЛЕКТРИЧНИХ КОНТАКТНИХ ПАР КОВЗАННЯ**

05.13.06 – інформаційні технології

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Черкаси – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі електротехнічних систем Черкаського державного технологічного університету.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Ситник Олександр Олексійович,
завідувач кафедри електротехнічних систем
Черкаського державного технологічного університету

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Засядько Аліна Анатоліївна,
професор кафедри менеджменту та інформаційних
технологій Черкаського навчально-наукового
інституту Університету банківської справи

кандидат технічних наук, доцент
Кучанський Олександр Юрійович
доцент кафедри інформаційних систем та технологій
Київського національного університету імені Тараса
Шевченка

Захист дисертації відбудеться «05» травня 2021 р. о 12⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д.73.052.04 у Черкаському державному технологічному університеті Міністерства освіти і науки України за адресою: 18000, м. Черкаси, бульвар Шевченка, 460.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Черкаського державного технологічного університету Міністерства освіти і науки України за адресою: 18000, м. Черкаси, бульвар Шевченка, 460

Автореферат розісланий « 31 » березня 2021 року.

Учений секретар
спеціалізованої ради Д73.052.04
кандидат технічних наук, доцент



Бондаренко Ю. Ю.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Зношування електричних контактів в процесі експлуатації і, як наслідок, втрата ними провідникових властивостей є однією з основних причин виходу з ладу електричного та електромеханічного обладнання промислових підприємств. Найбільш перспективним підходом для запобігання поломкам основного обладнання внаслідок зношування електричних контактів є своєчасне технічне обслуговування з метою заміни зношених елементів до втрати ними провідникових властивостей. Визначення точного терміну технічного обслуговування на практиці виявляється достатньо складною і дуже актуальною задачею: передчасна заміна зношеної деталі призводить до підвищення вартості обслуговування обладнання, а несвоєчасна — до поломки основного обладнання. Одним з найбільш перспективних підходів до прогнозування зносостійкості електричних контактів є математичне моделювання. Таким чином, дослідження інформаційної технології моделювання процесів зносостійкості слабкострумових електричних контактних пар ковзання для обробки та зберігання інформації з метою автоматизації прийняття інженерних рішень на теперішній час є актуальними.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної науково-технічної задачі розробки інформаційної технології моделювання процесів зносостійкості слабкострумових електричних контактних пар ковзання з урахуванням дії струмового навантаження.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана в Черкаському державному технологічному університеті. Тематика дисертаційної роботи та обраний напрямок досліджень безпосередньо пов'язаний з реалізацією положень «Стратегії розвитку інформаційного суспільства в Україні», «Основними науковими напрямами та найважливішими проблемами фундаментальних досліджень у галузі природничих, технічних і гуманітарних наук НАН України на 2014-2018 роки». Основні наукові результати отримано в рамках науково-дослідної роботи: «Моделювання процесу технічної експлуатації силових трансформаторів з урахуванням закону дифузійно-немонотонного розподілу їх відмов» (номер державної реєстрації 0117U003070), (виконавець).

Роль автора в зазначеній науково-дослідній роботі, у якій дисертант був безпосереднім виконавцем, полягає в розробленні ТЗ на НДР, виборі напрямку досліджень, моделюванні процесу технічної експлуатації силових трансформаторів.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності автоматизації оброблення результатів експериментальних досліджень процесу зношення контактних пар ковзання шляхом створення інформаційної технології з застосуванням методів та математично-програмних засобів, що дозволяє збільшити експлуатаційну надійність цих компонентів.

Для досягнення поставленої мети вирішуються такі наукові завдання:

– розробка методу визначення основних параметрів зносу електричних контактних пар ковзання;

- розробка моделі прогнозу ресурсу електричних контактів з урахуванням струмового зносу;
- розробка показників оцінки зносу слабкострумових електричних контактних пар ковзання;
- розробка інформаційної технології моделювання процесів зносостійкості слабкострумових електричних контактних пар ковзання.

Об'єктом дослідження є процеси зношення електричних контактних пар ковзання.

Предметом дослідження є інформаційна технологія моделювання зносостійкості слабкострумових електричних контактних пар ковзання.

Методи дослідження, які використано в роботі: методи системного аналізу (для виявлення властивостей об'єкту дослідження) теорій тертя та зношування (для побудови математичної моделі зносостійкості); електричної ерозії матеріалів (для урахування впливу електричного струму при побудові моделі зносостійкості); математичного моделювання (для моделювання процесів зносостійкості); теорія математичної статистики (для статистичної обробки експериментальних даних).

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

- *вперше* розроблено новий метод оцінки та урахування додаткового зносу контактних пар ковзання при дії струмової комутації, в основі якого лежить теорія струмового зносу, а середня похибка моделей, отриманих в результаті теоретичних перетворень практично відповідає моделям отриманим в результаті регресійного аналізу при дослідженнях в MATLAB і складає для обох випадків менше за 6%, що свідчить про добре підібрані моделі (до 7%);

- *вперше* проведена розробка інформаційної технології моделювання процесів зносостійкості слабкострумових електричних контактних пар ковзання на основі розробленого методу оцінки та урахування додаткового зносу контактних пар ковзання при дії струмової комутації, яка дозволяє розширити можливості інформаційної системи технічного обслуговування і ремонту обладнання в області прогнозування строків попереджувального ремонту основного виробничого обладнання підприємства та оптимізувати умови його експлуатації, що, в підсумку, призведе до зниження витрат на ремонт та обслуговування;

- *удосконалено* математичну модель місткової ерозії слабкострумових електричних контактних пар ковзання з використанням методів регресійного аналізу, що дозволяє підвищити точність моделювання зменшивши середню похибку на 7% (з 9% до 2%) для квадратичної моделі і на 3% (з 9% до 6%) для степеневі моделі;

- *удосконалено* математичну модель процесу зносостійкості електричних контактних пар ковзання з урахуванням геометрії контактів, контактного тиску та циклів напруцювання, що ґрунтується на використанні інженерної моделі зносу та дозволяє проводити моделювання зносостійкості слабкострумових електричних контактних пар ковзання з середнім рівнем достовірності отриманих результатів більшим за 94%, що свідчить про добре підібрані моделі (похибка до 7%).

Практичне значення одержаних результатів полягає в наступному:

– розроблено спеціалізований комплекс інженерних програм та методика проведення досліджень зносостійкості для підвищення експлуатаційної надійності контактних пар ковзання основного виробничого обладнання підприємств;

– впроваджені алгоритми та математично-програмне забезпечення розширили можливості інформаційної системи підприємства, дозволило автоматизувати процес оброблення результатів експериментальних досліджень та підвищити їх рівень автоматизації.

Результати дисертаційної роботи знайшли практичне використання у виробничому процесі на ТОВ «Елеватормаш» м. Черкаси та АТ "Черкаський автобус" для вдосконалення процесу контролю якості та надійності обладнання, а також впроваджені в навчальний процес у Черкаському державному технологічному університеті на кафедрі електротехнічних систем у матеріалах лекційних курсів «Електричні апарати» та «Математичне моделювання систем і процесів».

Особистий внесок здобувача. Всі результати дисертаційної роботи, що винесені на захист, отримані автором самостійно. Робота [1] написана самостійно. В опублікованих роботах у співавторстві особисто дисертанту належать: [1] – запропоновано метод побудови математичної моделі зносостійкості потенціометричних датчиків з урахуванням струмового навантаження; [2] – запропоновано моделі механічної ерозії слабкострумових електричних контактних пар отриманих методом ідентифікації; [3] – створено математичну модель механічного зносу контактних пар ковзання для плівкових потенціометрів при постійному значенні енергії в зоні тертя; [4] – рекурентні алгоритми реалізації методу простих ітерацій; [5] – спосіб розв’язання рівнянь в програмі MatLab; [6] – алгоритм для визначення похибок у складі емпіричних даних; [7] – метод конструювання адаптивних алгоритмів; [8] – модульна структура універсального алгоритму чисельного розв’язку; [9] – спосіб визначення характеристик вимірювальних перетворювачів; [10] – спосіб виділення особливості при наближеному обчисленні; [11] – метод прогнозування зносостійкості контактних пар ковзання дротяних потенціометрів, що працюють під струмовим навантаженням; [12] – математичне моделювання місткової ерозії електричних контактних пар засобами математичної системи MATLAB; [13] – запропоновано використання показників для моделювання зносостійкості електричних контактних пар ковзання; [14] – аналіз залежності зміни вихідної напруги потенціометра зі штучною та природною нульовою точкою при закорочуванні витків обмотки; [15] – алгоритм чисельного розв’язання рівняння; [16] – запропонований ефективний метод чисельного розв’язку рівнянь в MatLab; [17] – алгоритм зниження похибок статистичної оцінки параметрів; [18] – спосіб наближеного обчислення з виділенням особливості.

Апробація результатів дисертації. Матеріали, основні положення та результати дисертаційної роботи доповідались і надруковані в збірниках докладів і матеріалів міжнародних, вітчизняних науково-практичних і наукових конференцій: Конференції «Інтегральні рівняння — 2009 — Integral equations — 2009», 26-29 січня 2009 р., Київ; I Міжнародній науково-технічній конференції «Обчислювальний інтелект (результати, проблеми, перспективи)», (травень 2011 р.), Київ – Черкаси; V, VI, VII Міжнародній науково-практичній конференції «Обробка сигналів і

негаусівських процесів» (травень 2015 р., 2017 р., 2019 р.), Черкаси; XX Міжнародній науковій конференції «Математичні проблеми технічної механіки», (квітень 2020 р.), Дніпро; Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми енергоефективності та автоматизації в промисловості та сільському господарстві» (листопад 2020 р.), Кропивницький.

Публікації. За результатами виконаних теоретичних і експериментальних досліджень опубліковано 18 наукових робіт, з них: 1 стаття одноосібна, в тому числі 10 статей у наукових фахових виданнях України, що входять до переліку, затвердженого МОН України, 1 стаття у науковому періодичному виданні інших держав, 7 публікацій у збірниках міжнародних та вітчизняних науково-практичних і наукових конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, посилання та п'яти додатків. Загальний обсяг роботи становить 203 сторінки, із них основного тексту дисертації – 163 сторінки, 62 рисунка, 10 таблиць, посилання включає 117 найменувань та займає 12 сторінок, а також 5 додатків на 27 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі надана загальна характеристика роботи, обґрунтована актуальність наукової теми, сформульовані мета і задачі дослідження, відображено наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів, наведено дані щодо їх апробації та впровадження.

У першому розділі проведено аналіз сучасного стану питання моделювання зносостійкості слабкострумкових електричних контактних пар ковзання.

Сукупність механічних і фізико-хімічних факторів в електричному контакті, можна представити у вигляді схеми (рис. 1). Параметрами сполучення є навантаження P_k , швидкість відносного переміщення поверхонь контакту V , щільність струму j і напруга U ланцюга, який контакт комутує. Додатковим фактором впливу служить навколишнє середовище з тиском p_0 , хімічною активністю μ і температурою T . Контакт включає третє тіло, що складається в загальному випадку з граничного шару мастила і/або плівок на поверхнях твердих тіл, що контактують. Вихідними характеристиками сполучення є інтенсивність зношування I_h , що визначає довговічність контакту, коефіцієнт тертя в ньому f , відповідний рівню механічних втрат, інтенсивність відмов λ , що визначає надійність комутації, і перехідне падіння напруги U_c , що відповідає рівню електричних втрат.

В результаті аналізу з'ясовано, що основними процесами, які впливають на знос електричних контактів є механічні (тертя і мікрорізання) і електричні (електрична ерозія). Таким чином визначення ступеня зносу електричних контактів електро-механічного обладнання та окремих його складових можна здійснити з використанням математичного моделювання механічних і електричних процесів зносостійкості. Основними механічними процесами, які впливають на знос електричних контактів є тертя і мікрорізання. Найбільш повно враховує ці процеси інженерна модель зносу на основі енергетичних параметрів.

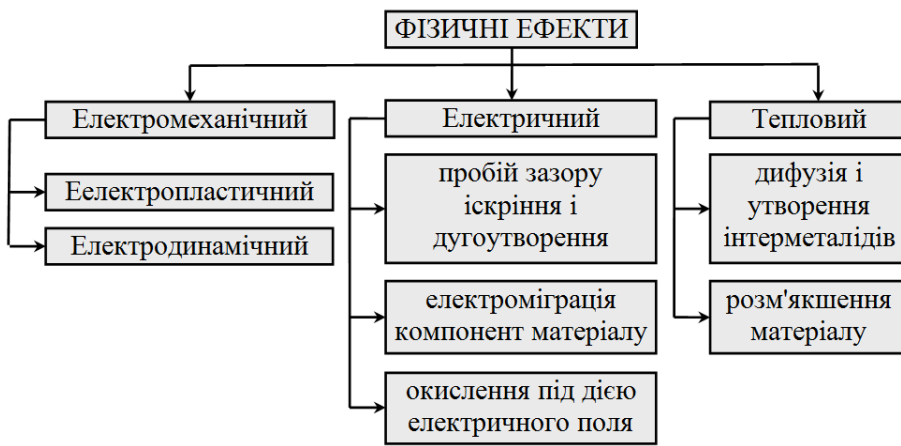


Рисунок 1 – Фізичні явища, що визначають проходження струму через електричний контакт

Аналіз наявних інформаційних технологій моделювання зношування дозволяє зробити висновок, що для розширення їх можливостей, підвищення ефективності ремонтів і зниження витрат на обслуговування обладнання необхідно створити інформаційну технологію яка дозволяє

прогнозувати технічний стан обладнання не статистичними методами, а використанням математичного моделювання процесів зносостійкості, що не потребує встановлення додаткових інструментів для напрацювання статистичної інформації.

Різноманітність обладнання, яке використовується підприємствами, породжує велику кількість фізичних процесів, які відбуваються під час зношування частин обладнання, що не дозволяє створити універсальної моделі зносостійкості. Тому в даній роботі створення інформаційної технології обмежено обладнанням, яке використовує електричні контакти. В результаті проведеного аналізу процесів, які впливають на зносостійкість електричних контактів дослідження з'ясовано, що основними процесами є механічні (тертя і мікрорізання) і електричні (електрична ерозія). Таким чином, визначення ступеня зносу електричних контактів електро-механічного обладнання та окремих його складових можна здійснити з використанням математичного моделювання механічних і електричних процесів зносостійкості.

У другому розділі запропоновано удосконалення моделі механічного зносу слабкострумових електричних контактних пар ковзання на основі інженерного методу з урахуванням геометричної форми реальних контактних пар ковзання. Виходячи з енергій переходу при терті W_f і зрізі W_s стосовно до роботи приладів були розглянуті наступні типові електричні контактні пари ковзання: площина-сфера (рис. 2); циліндр-сфера (рис. 3).

Обрана методика досліджень дозволяє аналізувати об'єм зношеного матеріалу розглянутих електричних контактних пар за узагальненим параметром зносу висоті H або хорді T . Відповідно до позначень прийнятих на рис. 2 при постійному значенні довжини переходу l поперечний переріз сліду зносу Q при $H \ll R$ визначиться з рівняння:

$$H = \frac{T^2}{8 \cdot R}. \quad (1)$$

Елементарні енергії на одному переході для сил тертя W_f і сил зрізу W_s можна виразити:

$$dW_f = K_f \cdot P_\kappa dl; \quad dW_s = \tau_s \cdot dQ_1 dl, \quad (2)$$

де τ_s – межа плинності на зріз; K_f – коефіцієнт тертя; Q_1 – поперечний переріз сліду на одному переході.

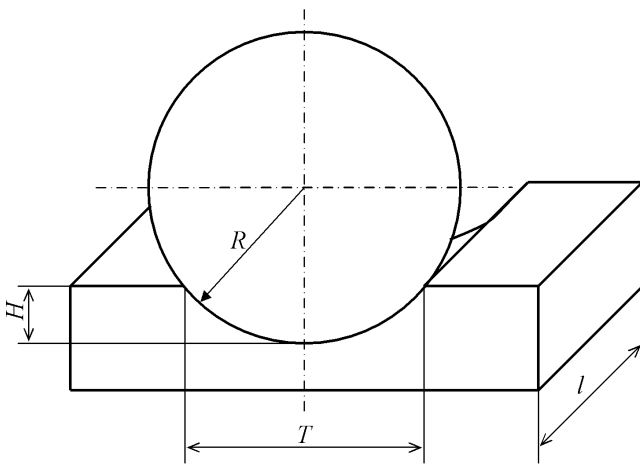


Рисунок 2 – Слід зносу пари площина-сфера при незмінному радіусі сфери R

Після інтегрування на довжині контактування l з урахуванням N переходів, отримуємо значення сумарної механічної енергії, витраченої на знос відповідно до формули Герца для випадку пружного контактування пари площина-сфера, розмір плями контактування $T_1 \sim \tau \sim P_k^{\frac{1}{3}}$. Враховуючи, що при постійному значенні енергії в процесі зносу W_l контактний тиск P_k і внутрішнє напруження τ повинні залишатися незмінними, то, прийнявши $W \sim Q \sim T^3$, отримуємо наступні рівняння

зносу:

$$T_f \sim \tau \cdot N^{\frac{1}{3}} \sim P_k^{\frac{1}{3}} \cdot N^{\frac{1}{3}}; T_s \sim \tau^{\frac{4}{3}} \cdot N^{\frac{1}{3}} \sim P_k^{\frac{4}{9}} \cdot N^{\frac{1}{3}}. \quad (3)$$

Перехід від об'ємного (V) зносу до лінійного (T або H) пов'язаний з наявністю в промисловості засобів контролю, що в значній мірі полегшує проведення експериментів і вимірювання даних.

Якщо прийняти рівноймовірними дії сил тертя і зрізу, виходячи з емпіричної інженерної моделі зносу, прийнявши $Q \sim (\tau \cdot l)^{\frac{9}{2}} \cdot N$, одержимо

$$Q = K_Q \cdot \tau^{\frac{7}{2}} \cdot N, T \sim \tau^{\frac{3}{2}} \cdot N^{\frac{1}{3}} \sim P_k^{\frac{1}{2}} \cdot N^{\frac{1}{3}}. \quad (4)$$

Визначення закономірностей зносу при змінному значенні енергії $W = \text{var}$, що характерно для електричних контактних пар тертя з мастилом, може бути здійснено за допомогою рівняння (1) і (2).

Визначивши з (4) частинні похідні $\frac{\partial Q}{\partial \tau} = \frac{7}{2} \cdot K_Q \cdot \tau^{\frac{5}{2}} \cdot N$ та $\frac{\partial Q}{\partial N} = K_Q \cdot \tau^{\frac{7}{2}}$ і

використавши інженерну модель зносу, отримуємо:

$$Q = \frac{7}{2} \cdot K_Q \cdot \tau^{\frac{5}{2}} \cdot N d\tau + K_Q \cdot \tau^{\frac{7}{2}} \cdot dN. \quad (5)$$

Функціонал $\tau = K_\tau \cdot q = \frac{4 \cdot K_\tau \cdot P_k}{\pi \cdot T^2} = K_P \cdot \frac{P_k}{T^2}$, де q – питомий контактний тиск; K_P

– відносний коефіцієнт контактного тиску.

Зробивши інтегрування, маємо:

$$C_Q \cdot T^3 = \frac{K_Q \cdot N \cdot K_P^{\frac{7}{2}} \cdot P_k^{\frac{7}{2}}}{T^7} + \frac{K_Q \cdot N \cdot K_P^{\frac{7}{2}} \cdot P_k^{\frac{7}{2}}}{T^7}. \quad (6)$$

З (6) випливає, що

$$T \sim P_{\kappa}^{\frac{7}{20}} \cdot N^{\frac{1}{10}}. \quad (7)$$

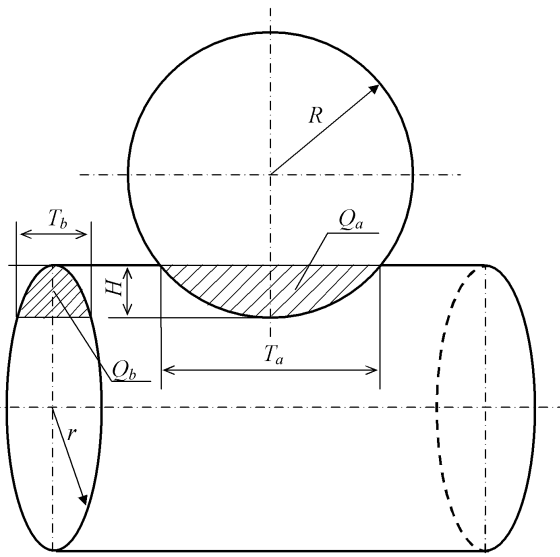


Рисунок 3 – Слід зносу пари циліндр-сфера

Знос циліндричного проводу при поперечному русі сферичного контакту (рис. 3), за незмінних геометричних розмірів контакту, об'єм зношеного матеріалу проводу складе $V \approx \frac{1}{3} \cdot Q_b \cdot T_a$

відповідно до позначень рис. 3. При незмінному радіусі сфери R виразивши величину об'єму V через контрольований параметр зносу T_b на підставі співвідношення (1) можна записати

$$H = \frac{T_b^2}{8 \cdot r} = \frac{T_a^2}{8 \cdot R}, \text{ звідки отримаємо}$$

$$T_a = T_b \cdot \sqrt{\frac{R}{r}}.$$

Після підстановки значень Q_b для рівноймовірної дії сил тертя і зрізу маємо $V = K_v \cdot \tau^{\frac{9}{2}} \cdot N$, звідки параметр зносу

$$T_b \sim \tau^{\frac{9}{8}} \cdot N^{\frac{1}{4}} \sim P_{\kappa}^{\frac{9}{8}} \cdot N^{\frac{1}{4}}. \quad (8)$$

Формули зносу контактних пар в залежності від виду деформації ($V_1 \sim P \cdot N$ – знос тертя, $V_2 \sim \tau \cdot Q \cdot N$ – знос зрізу; $V_3 \sim \frac{\bar{V}_1 + \bar{V}_2}{2}$ – середній знос від тертя і зрізу,

$V_4 \sim \tau^{\frac{9}{2}} \cdot N$ – рівномірна дія сил тертя і зрізу) представлено в табл. 1.

Для оцінки додаткового зносу під струмом приймаємо, що сумарний об'єм зносу для електричних контактних пар ковзання під струмом при постійному числі циклів напрацювання N можна представити у вигляді суми двох складових: $V_{\Sigma} = V_m + V_I$, де V_m – механічний знос при струмі рівному нулю; V_I – додатковий знос, обумовлений проходженням струму через контакти, тобто струмовий знос.

У загальному випадку величина струмового зносу може бути представлена рівнянням $V_I = C \cdot I^{\alpha}$, де C – коефіцієнт струмового зносу; α – показник степені, що визначає вплив струму на знос.

Формула об'єму сумарного зносу може бути виражена через відносну величину бічного зносу:

$$V_{\Sigma} = V_m \cdot (1 + K_I \cdot I^{\alpha}), \quad (9)$$

де $K_I = \frac{C}{V_m}$ – відносний коефіцієнт струмового навантаження.

Таблиця 1 – Формули зносу контактних пар в залежності від виду деформації
($T = K_T \cdot P_k^{m_{PT}} \cdot N^{m_{NT}}$, $H = K_H \cdot P_k^{m_{PH}} \cdot N^{m_{NH}}$.)

| V | W | Сфера-площина | Сфера-циліндр |
|--|--------------------|--|--|
| $V_1 \sim P \cdot N$ | $W = \text{const}$ | $T \sim P^{\frac{1}{3}} \cdot N^{\frac{1}{3}}; H \sim P^{\frac{2}{3}} \cdot N^{\frac{2}{3}}$ | $T \sim P^{\frac{1}{3}} \cdot N^{\frac{1}{4}}; H \sim P^{\frac{2}{3}} \cdot N^{\frac{1}{2}}$ |
| | $W = \text{var}$ | $T \sim P^{\frac{1}{3}} \cdot N^{\frac{1}{9}}; H \sim P^{\frac{2}{3}} \cdot N^{\frac{2}{9}}$ | $T \sim P^{\frac{1}{3}} \cdot N^{\frac{1}{12}}; H \sim P^{\frac{2}{3}} \cdot N^{\frac{1}{6}}$ |
| $V_2 \sim \tau \cdot Q \cdot N$ | $W = \text{const}$ | $T \sim P^{\frac{4}{9}} \cdot N^{\frac{1}{3}}; H \sim P^{\frac{8}{9}} \cdot N^{\frac{2}{3}}$ | $T \sim P^{\frac{5}{12}} \cdot N^{\frac{1}{4}}; H \sim P^{\frac{5}{6}} \cdot N^{\frac{1}{2}}$ |
| | $W = \text{var}$ | $T \sim P^{\frac{4}{11}} \cdot N^{\frac{1}{11}}; H \sim P^{\frac{8}{11}} \cdot N^{\frac{2}{11}}$ | $T \sim P^{\frac{5}{14}} \cdot N^{\frac{1}{14}}; H \sim P^{\frac{5}{7}} \cdot N^{\frac{1}{7}}$ |
| $V_3 \sim \frac{\bar{V}_1 + \bar{V}_2}{2}$ | $W = \text{const}$ | $T \sim P^{\frac{7}{18}} \cdot N^{\frac{1}{3}}; H \sim P^{\frac{7}{9}} \cdot N^{\frac{2}{3}}$ | $T \sim P^{\frac{3}{8}} \cdot N^{\frac{1}{4}}; H \sim P^{\frac{3}{4}} \cdot N^{\frac{1}{2}}$ |
| | $W = \text{var}$ | $T \sim P^{\frac{7}{20}} \cdot N^{\frac{1}{10}}; H \sim P^{\frac{7}{10}} \cdot N^{\frac{1}{5}}$ | $T \sim P^{\frac{9}{26}} \cdot N^{\frac{1}{13}}; H \sim P^{\frac{9}{13}} \cdot N^{\frac{2}{13}}$ |
| $V_4 \sim \tau^2 \cdot N$ | $W = \text{const}$ | $T \sim P^{\frac{1}{2}} \cdot N^{\frac{1}{3}}; H \sim P \cdot N^{\frac{2}{3}}$ | $T \sim P^{\frac{9}{8}} \cdot N^{\frac{1}{4}}; H \sim P^{\frac{3}{4}} \cdot N^{\frac{1}{2}}$ |
| | $W = \text{var}$ | $T \sim P^{\frac{3}{8}} \cdot N^{\frac{1}{12}}; H \sim P^{\frac{3}{4}} \cdot N^{\frac{1}{6}}$ | $T \sim P^{\frac{9}{26}} \cdot N^{\frac{1}{13}}; H \sim P^{\frac{9}{13}} \cdot N^{\frac{2}{13}}$ |

Стосовно до параметру зносу T сферичних електричних контактних пар в загальному випадку об'єм зносу можна представити рівнянням $V = m \cdot T^n$. Тоді при

$\frac{V_\Sigma}{V_m} = \left(\frac{T_\Sigma}{T_m} \right)^n$ прийнявши $\frac{T_\Sigma}{T_m} = t$, з урахуванням рівняння (9) отримаємо:

$$t = \left(1 + K_I \cdot I^\alpha \right)^{\frac{1}{n}}, T_\Sigma = T_m \cdot \left(1 + K_I \cdot I^\alpha \right)^{\frac{1}{n}}. \quad (10)$$

У рівнянні (10), стосовно до зносу електричної контактної пари площина-сфера показник степеня буде $n = 3$, а для пари циліндр-сфера – $n = 4$. Коефіцієнт K_I і показник степені α необхідно визначати за дослідними даними, для чого проведено моделювання місткової ерозії для різних контактних матеріалів засобами MATLAB.

У **третьому розділі** розроблено методику вибору допустимих меж зносу слабкострумових електричних контактних пар ковзання. Запропоновано методику прогнозування зносостійкості слабкострумових електричних контактних пар ковзання. Проведено дослідження та моделювання засобами MATLAB зносу знеструмлених слабкострумових електричних контактних пар ковзання. Проведено дослідження та моделювання засобами MATLAB зносу слабкострумових електричних контактних пар ковзання при живленні їх постійним струмом.

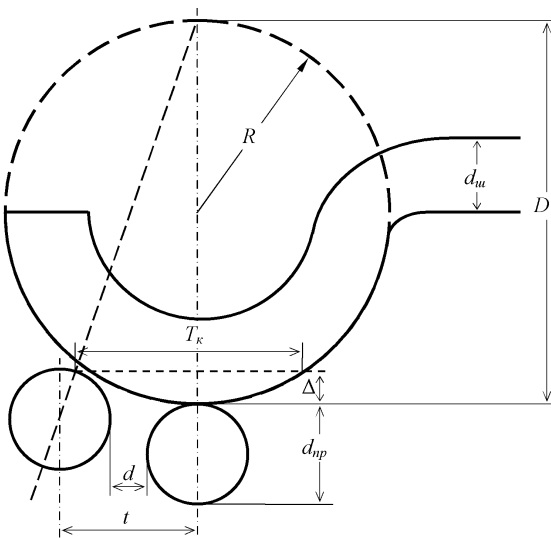


Рисунок 4 – Робота контакту при наявності витків обмотки потенціометра, що западають

З метою підвищення технічного ресурсу приладу при заданій точності і допустимій величині зносу контакту T_k необхідно забезпечити оптимальну геометрію контакту.

Гранично допустимий радіус контактування може бути визначений виходячи із заданої величини виступання або западання окремих витків Δ (рис. 4).

Прийнявши $h \approx t - a = d$, можна записати $d^2 = D\Delta - \Delta^2$. Нехтуючи через малість Δ^2 , отримуємо

$$R \leq \frac{d^2}{2\Delta}. \quad (11)$$

Якщо прийняти допустиму величину нерівномірності намотування по висоті, рівній половині допустимої величини зносу дроту $\Delta = \frac{0,2 \cdot d}{2} = 0,1 \cdot d$, то граничне значення радіуса контактування з (11) має бути:

$$R \leq 5 \cdot d. \quad (12)$$

При вибраних значеннях параметра зносу T_k і радіуса контактування R допустима висота зносу складе:

$$H_k = \frac{T_k^2}{8 \cdot R}. \quad (13)$$

На підставі викладеного впливає, що допустимі межі зносу електричної контактної пари залежать від класу приладу, що визначає допустимі межі відхилення вихідних параметрів, і електричної схеми роботи приладу в апаратурі.

Методика обробки результатів випробувань представлена на рис. 5 у вигляді узагальненої структурної схеми моделювання та прогнозування зносостійкості контактних пар, що складається з ряду етапів.

Теоретичною передумовою для визначення окремих параметрів теоретичної лінії регресії по кожному з факторів, що впливають, є енергетична

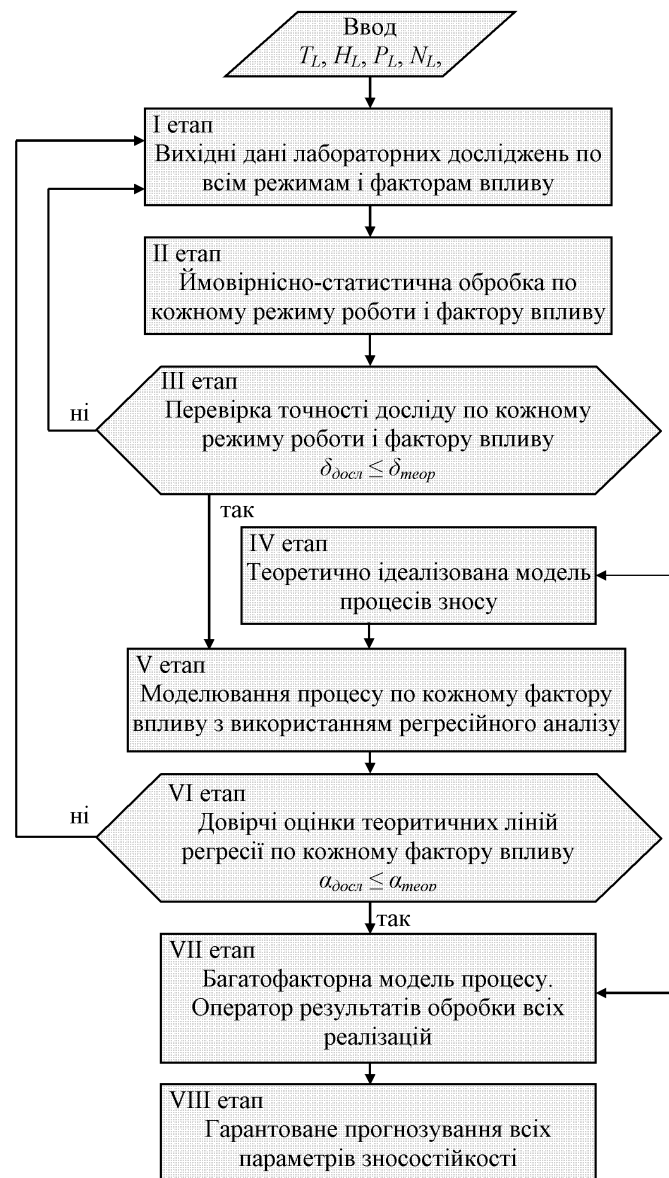


Рисунок 5 – Блок-схема обробки результатів випробувань, моделювання та прогнозування зносостійкості

модель зносу, яка відповідно до табл. 1, виражається рівнянням:

$$T = K_T \cdot P_k^{m_{PT}} \cdot N^{m_{NT}}. \quad (14)$$

Рівняння теоретичної лінії регресії, наприклад для залежності $T = f(N)$ при $P_k = \text{const}$ приймає наступний вигляд:

$$T = K_{TP} \cdot N^{m_{NT}}, \quad (15)$$

де $K_{TP} = K_T \cdot P_k^{m_{PT}}$.

Коефіцієнт m_{NT} може бути визначений з рівняння (15) методом регресійного аналізу. Аналогічним чином визначається показник степені m_{PT} приводячи залежність $T = f(P_k)$ при $N = \text{const}$ до виду:

$$T = K_{TN} \cdot P_k^{m_{PT}}, \quad (16)$$

де $K_{TN} = K_T \cdot N^{m_{NT}}$.

Отримані в результаті досліджень значення параметрів окремих режимів повинні перекриватися заданою довірчою областю. Якщо ця вимога не виконується, то дослідження повинні бути продовжені для отримання більшого об'єму інформації.

Повна модель процесу зносу:

$$T = K_{TI} \cdot P_k^{m_{PT}} \cdot N^{m_{NT}}, \quad (17)$$

$$K_{TI} = K_T \cdot (1 + K_I \cdot I^\alpha)^{m_{NT}}. \quad (18)$$

Тут коефіцієнти K_T , m_{PT} , m_{NT} , K_I і α_I для заданої електричної контактної пари повинні бути визначені і зрозумілі з точки зору прийнятої теоретичної моделі.

Виходячи з допустимого гарантованого рівня зносу проводу, використовуючи модель зносу (17) та (18), можна оцінити гарантований рівень зносостійкості N_{zap} :

$$N_{zap} = \left(\frac{T_{zap}}{K_{TI} \cdot P_k^{m_{PT}}} \right)^{\frac{1}{m_{NT}}}. \quad (19)$$

За отриманими результатами було проведено дослідження та моделювання засобами MATLAB зносу знеструмлених слабкострумових електричних контактних пар ковзання за даними вимірювань (табл. 2)

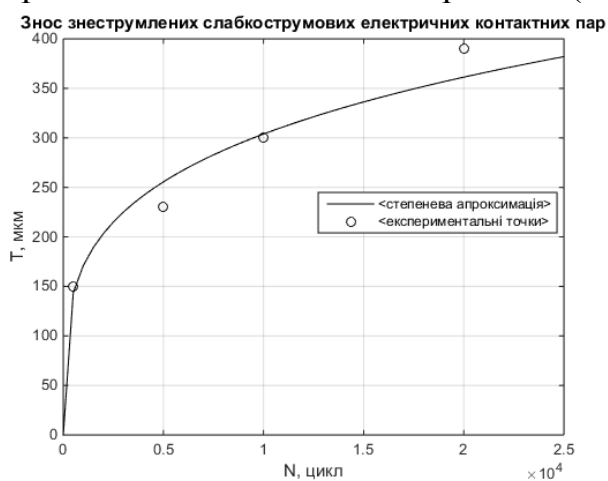


Рисунок 6 – Механічний знос слабкострумових електричних контактних пар ковзання при моделюванні в MATLAB

Таблиця 2 – Залежність величини хорди зносу від кількості циклів напрацювання при тиску $P_k = 10 \text{ cH}$.

| N, циклів | 500 | 5000 | 10000 | 20000 |
|-----------|-----|------|-------|-------|
| T, мкм | 150 | 230 | 300 | 390 |

Побудована залежність $T(N)$ при $P_k = 10 \text{ cH}$, представлена на рис. 6, звідки випливає, що показник степені $1/4$ відповідає теоретичним значенням для ідеалізованої пари циліндр-сфера (10).

Для знеструмленої контактної пари при $P_k = \text{const}$ залежність (17) приймає вигляд

$$T = K_{PTI} \cdot N^{m_{NT}}, \quad (20)$$

де $K_{PTI} = K_{TI} \cdot P_k^{m_{PT}}$.

Моделюванням в MATLAB визначаємо коефіцієнти для механічного зносу (20), отримані в результаті моделювання: $m_{NT} = 0,2497$ і $K_{PTI} = 30,4642$.

Похибка апроксимації для отриманої залежності та експериментальних даних при моделюванні в MATLAB $\Delta s_{\text{апрокс.}} = 5,8821\%$.

В процесі дослідження виявлено, що середня похибка для моделей, отриманих в результаті теоретичних перетворень практично відповідає моделям, отриманим з використанням регресійного аналізу при дослідженнях в MATLAB і складає для обох випадків менше 6%, що свідчить про добре підібрані моделі (до 7%). Таким чином, використання отриманих моделей механічного зносу дозволяє проводити моделювання зносостійкості слабкострумових електричних контактних пар ковзання з середнім рівнем достовірності отриманих результатів 94%.

Проведено дослідження та моделювання засобами MATLAB зносу слабкострумових електричних контактних пар ковзання при живленні їх постійним струмом. Так за даними табл. 3 були побудовані залежності величини хорди зносу T , мкм для негативного полюса напруги на зношеному контакті від струму I , А при кількості циклів напрацювання $N = 20000$, і тиску $P_k = 10$ сН, представлені на рис. 7.

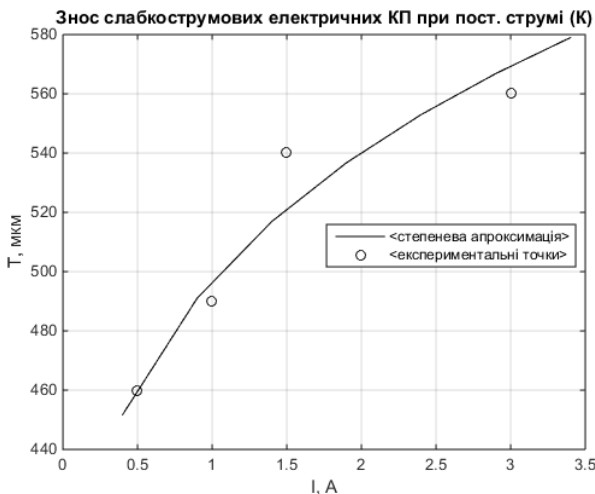


Рисунок 7 – Залежність величини хорди зносу $T-$, мкм

Таблиця 3 – Залежність величини хорди зносу $T-$ або $T+$, мкм для негативного або позитивного полюса напруги на зношеному контакті від струму I , А при кількості циклів напрацювання $N = 20000$, і тиску $P_k = 10$ сН.

| I, A | 0 | 0,5 | 1,0 | 1,5 | 3,0 |
|------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| $T-, \text{мкм}$ | 390 | 460 | 490 | 540 | 560 |
| $T+, \text{мкм}$ | 390 | 500 | 570 | 590 | 680 |

Використавши залежності (17) і (18) з урахуванням (20)

$$T = K_{PTI} \cdot (1 + K_I \cdot I^\alpha)^{m_{NT}} \cdot N^{m_{NT}}, \quad (21)$$

при $N = \text{const}$; $m_{NT} = 0,2497$

$$T_{NT} = K_I \cdot I^\alpha, \quad (22)$$

$$\text{де } T_{NT} = \left(\frac{T}{K_{PTI} \cdot N^{m_{NT}}} \right)^{\frac{1}{m_{NT}}} - 1.$$

Моделюванням в MATLAB визначаємо коефіцієнти для струмового зносу (22). При $m_{NT} = 0,2497$ і $K_{PTI} = 30,4642$ отримано в результаті моделювання: $\alpha = 0,6331$; $K_I = 2,5877$.

У четвертому розділі розроблено інформаційну технологію моделювання процесів зносостійкості слабкострумових електричних контактних пар ковзання.

На основі визначених етапів проектування розроблено інформаційну технологію моделювання процесів зносостійкості слабкострумових електричних

контактних пар ковзання. Узагальнена структура розробленої інформаційної технології представлена на рис. 8.

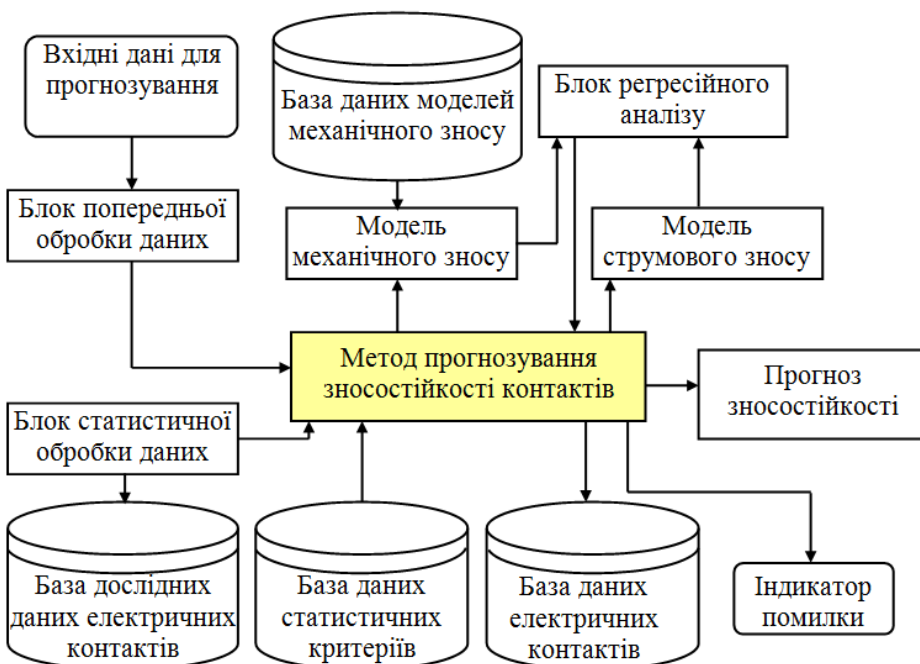


Рисунок 8 – Узагальнена структура розробленої інформаційної технології моделювання процесів зносостійкості слабкострумових електричних контактних пар ковзання

Застосування інформаційної технології моделювання процесів зносостійкості слабкострумових електричних контактних пар ковзання може покращити якість прогнозування строків попереджувального ремонту основного виробничого обладнання підприємства та оптимізувати умови його експлуатації, що в підсумку, призведе до зниження витрат на ремонт та обслуговування.

Розроблена інформаційна технологія моделювання процесів зносостійкості слабкострумових електричних контактних пар ковзання складається з п'яти основних етапів роботи (рис. 9).

Етап I передбачає ввід і впорядкування експериментальних даних за всіма режимами і чинниками. На I етапі також проводиться імовірно-статистична обробка даних по кожному режиму роботи заданого фактора, визначається похибка результатів випробувань по кожному режиму роботи, яка порівнюється з допустимими величинами. При перевищенні похибкою допустимої величини – приймається рішення про уточнення вхідних даних. Якщо похибка лежить в допустимих межах — відбувається перехід до наступного етапу.

Етап II передбачає для кожного впливаючого фактора проведення регресійного аналізу за методом мінімуму середньої квадратичної похибки, визначення меж довірчої області для оцінки теоретичних ліній регресії кожного з факторів, що впливають. Довірчі межі для параметрів рівняння теоретичної лінії регресії визначаються з урахуванням відповідних дисперсій. Отримані в результаті досліджень значення параметрів окремих режимів повинні перекриватися заданою довірчою областю. Якщо ця вимога не виконується, то дослідження повинні бути продовжені для отримання більшого об'єму інформації, починаючи з етапу I.

Етап III полягає у визначенні коефіцієнтів математичної моделі механічного зносу для заданої електричної контактної пари та порівняння їх з теоретичними, та визначенні коефіцієнтів математичної моделі з урахуванням струмового зносу для заданої електричної контактної пари.

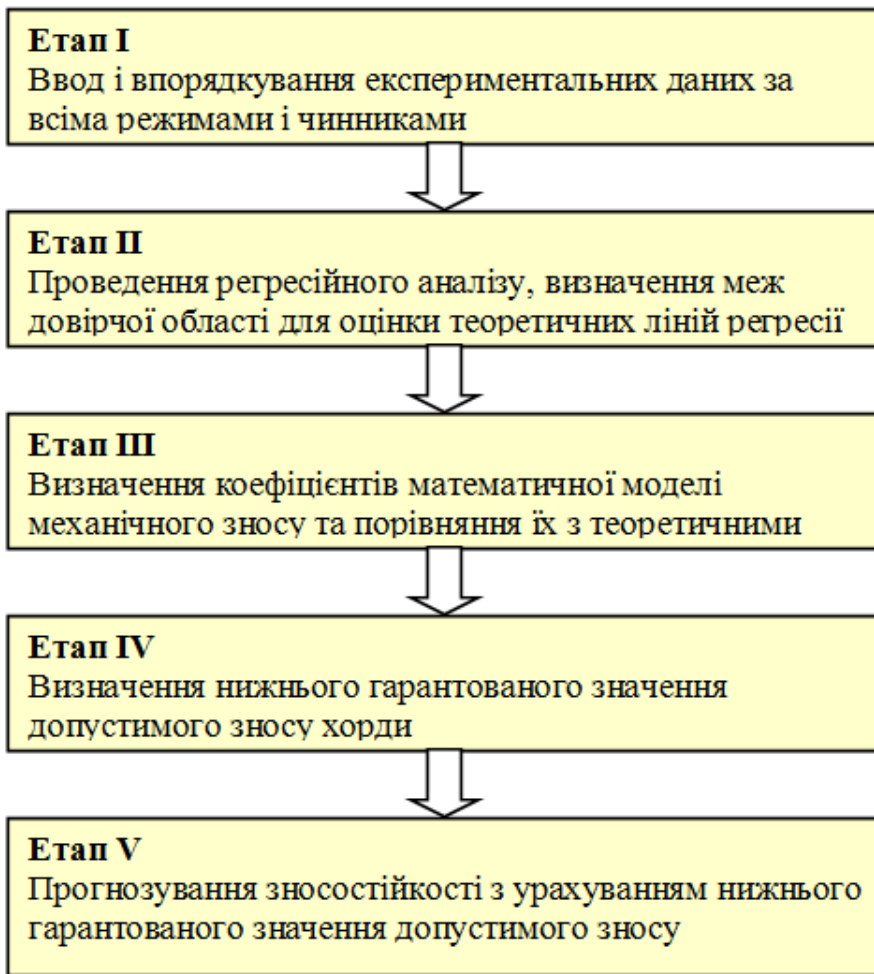


Рисунок 9 – Основні етапи роботи розробленої інформаційної технології моделювання процесів зносостійкості слабкострумових електричних контактних пар ковзання

Знос електричних КП при пост. струмі (К)

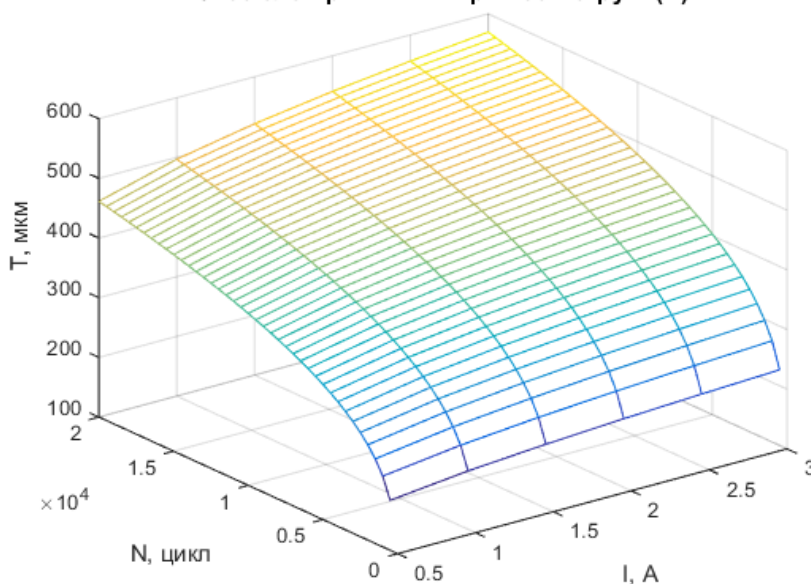


Рисунок 10 – Залежність $T(N, I)$ величини хорди зносу T , мкм

Етап IV передбачає визначення нижнього гарантованого значення допустимого зносу хорди.

На V етапі проводиться прогнозування зносостійкості різних типів електричних контактних пар з урахуванням нижнього гарантованого значення допустимого зносу.

Для реалізації інформаційної технології на основі залежностей отриманих в другому і третьому розділі дисертаційного дослідження було розроблено комплекс програм в середовищі MATLAB, який складається з п'яти основних і п'яти допоміжних модулів, і дозволяє виконувати основні завдання прогнозування зносостійкості слабкострумових електричних контактних пар ковзання: визначення гарантованих параметрів зносу, будова залежностей основних параметрів зносу ($T(I)$, $T(N)$, $T(P_k)$, $T(N, I)$, $T(N, P_k)$, $T(I, P_k)$). Результати роботи програми у вигляді залежності $T(N, I)$ побудовані за даними табл. 3 подано на рис. 10.

ВИСНОВКИ

1. З метою розвитку та вдосконалення інформаційних систем технічного обслуговування та ремонту обладнання промислових підприємств вперше проведена розробка інформаційної технології моделювання процесів зносостійкості слабкострумових електричних контактних пар ковзання на основі розробленого методу оцінки та урахування додаткового зносу контактних пар ковзання при дії струмової комутації, яка дозволяє розширити можливості інформаційної системи технічного обслуговування і ремонту обладнання в області прогнозування строків попереджувального ремонту основного виробничого обладнання підприємства та оптимізувати умови його експлуатації, що в підсумку, призведе до зниження витрат на ремонт та обслуговування.

2. В процесі розробки інформаційної технології запропоновано підходи та методи, які дозволяють підвищити якість існуючих моделей зносу слабкострумових електричних контактних пар ковзання. Розроблено метод оцінки та урахування додаткового зносу контактних пар ковзання при дії струмової комутації.

3. Вдосконалено математичну модель місткової ерозії слабкострумових електричних контактних пар ковзання з використанням методів регресійного аналізу, що дозволяє підвищити точність моделювання зменшивши середню похибку на 7% (з 9% до 2%) для квадратичної моделі і на 3% (з 9% до 6%) для степеневі моделі;

4. Вдосконалено математичну модель процесу зносостійкості електричних контактних пар ковзання з урахуванням геометрії контактів, контактного тиску та циклів напрацювання, що ґрунтується на використанні інженерної моделі зносу та дозволяє проводити моделювання зносостійкості слабкострумових електричних контактних пар ковзання з середнім рівнем достовірності отриманих результатів більшим за 94%, що свідчить про добре підібрані моделі (похибка до 7%).

5. Вперше розроблено новий метод оцінки та урахування додаткового зносу контактних пар ковзання при дії струмової комутації, в основі якого лежить теорія струмового зносу, а середня похибка моделей, отриманих в результаті теоретичних перетворень практично відповідає моделям отриманим в результаті регресійного аналізу при дослідженнях в MATLAB і складає для обох випадків менше за 6%, що свідчить про добре підібрані моделі (до 7%).

6. Проведено дослідження та моделювання місткової ерозії слабкострумових електричних контактних пар засобами MATLAB.

7. Проведено дослідження та моделювання засобами MATLAB зносу знеструмлених слабкострумових електричних контактних пар ковзання.

8. Проведено дослідження та моделювання засобами MATLAB зносу слабкострумових електричних контактних пар ковзання при живленні їх постійним струмом.

9. Проведено порівняльний аналіз серійних засобів комп'ютерного моделювання та визначено їх пріоритетність. Обумовлено організацію системи моделювання та структуру пакету програм, програмних модулів системи, визначено характеристики системи моделювання. Створено програмний комплекс для

моделювання зносу слабкострумів електричних контактних пар ковзання засобами MATLAB.

10. Розроблено інженерні програми і методики проведення досліджень з контролем зносостійкості та надійності приладів в складі яких використовуються електричні контактні пари.

11. Розроблено алгоритми обробки експериментальних даних з використанням ймовірнісних статистичних моделей, які успішно використані при побудові нових спеціалізованих комп'ютерних програм.

ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. V. B. Kyselov "Method Of Constructing A Mathematical Model Of Wear-Resistance In Potentiometer Sensors". *Visnyk Cherkaskogo Derzhavnogo Tekhnologichnogo Universytetu*, №3, с. 5–12, 2020.

2. Ситник О. О., Ключка К. М., Кисельов В. Б., Кисельова Г. О. "Моделювання місткової ерозії слабкострумів електричних контактів засобами MatLab", *Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки*, Кам'янець-Подільський, Вип. 21, с. 40 – 52, 2020.

3. Ситник О. О., Кисельов В. Б., Кисельова Г. О. "Про один з методів побудови математичної моделі зносостійкості плівкових потенціометрів", *Молодий вчений*, №2 (78), с. 189 – 192, 2020.

4. Кисельова Г. О., Кисельов В. Б. "Ітераційний алгоритм розв'язування нелінійних інтегральних рівнянь типу Вольтери II роду в середовищі MATLAB", *Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки*, Вип. 12, с. 42 – 50, 2015.

5. О. О. Ситник, Г. О. Кисельова, та В. Б. Кисельов, "Застосування методу квадратур для чисельних розрахунків лінійних диференціальних рівнянь", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, №2, с. 90 – 95, 2013.

6. М. В. Раєвський, О. О. Ситник, та В. Б. Кисельов, "Використання лінійних фільтрів Калмана для калібрування акселерометрів за допомогою даних глобальних навігаційних супутникових систем", *Відбір і обробка інформації*, № 35(111), с. 38 – 46. 2011.

7. Кисельова Г. О., Кисельов В. Б. "Застосування процесу Ейткена при розрахунках інтегралів з особливостями чисельними методами", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, №1, с. 34 – 41, 2010.

8. О. О. Ситник, Г. О. Кисельова, та В. Б. Кисельов "Універсальний алгоритм розрахунку інтегрального рівняння Вольтерри II роду із застосуванням формул Ньютона-Котеса", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 3, с. 36–42, 2010.

9. А. А. Сьтник, А. В. Козак, В. Б. Киселев, и А. А. Киселева, "Определение дифференциального уравнения измерительного преобразователя по импульсной переходной функции", *Моделювання та інформаційні технології*, Вип. 45, с. 16 – 22, 2008.

10. Киселева А.А., Киселев В.Б., Корнеев А.М., Протасов С.Ю. "Численно-аналитический способ вычисления интегралов с особенностями", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, №3, с. 64 – 69, 2008.
11. Sytnik Alexander, Protasov Sergey, Kyselov Vladlen, Kyselova Hanna "Investigation of common criteria for assessing the wear resistance of low-current contact pairs". *Danish scientific journal. Denmark*. no. 45, p. 43–49, 2021.
12. Ситник О.О., Ключка К.М., Кисельова Г.О., Кисельов В.Б. "Компьютерна модель місткової ерозії електричних контактів" на *Міжнар. наук.-практ. конф. Проблеми енергоефективності та автоматизації в промисловості та сільському господарстві*, Кропивницький, 2020, с. 49 – 51.
13. Ситник О.О., Кисельова Г.О., Кисельов В.Б. "Метод побудови математичної моделі зносостійкості електричних контактних пар ковзання під струмом", на *XX Міжнар. наук. конф. Математичні проблеми технічної механіки*, Дніпро, 2020, с. 63 – 64.
14. Ситник О.О., Кисельова Г.О., Кисельов В.Б. "Підвищення технічного ресурсу дротяних потенціометрів з нульовою точкою", на *VII Міжнар. наук.-практ. конф., присвяч. пам'яті проф. Ю.П. Кунченка, Обробка сигналів і негаусівських процесів*, Черкаси, 2019, с. 149 – 152.
15. Кисельова Г.О., Кисельов В.Б. "Чисельний розв'язок нелінійних інтегральних рівнянь Вольтери II роду з використанням формул Ньютона-Котеса підвищеної точності", на *VI Міжнар. наук.-практ. конф., присвяч. пам'яті проф. Ю.П. Кунченка, Обробка сигналів і негаусівських процесів*, Черкаси, 2017, с. 85 – 88.
16. Кисельова Г.О., Кисельов В.Б. "Чисельний розв'язок лінійних диференціальних рівнянь із застосуванням методу квадратур", на *V Міжнар. наук.-практ. конф., присвяч. пам'яті проф. Ю.П. Кунченка, Обробка сигналів і негаусівських процесів*, Черкаси, 2015, с. 100 – 102.
17. Сытник А. А., Раевский Н. В., Киселева А. А., Киселев В. Б. "Кубатурный фильтр Калмана в задачах статистического оценивания параметров радиолакационных систем", на *I Міжнар. наук.-техн. конф. Обчисловальний інтелект*, Черкаси, 2011, с. 484 – 486.
18. Киселева А.А., Киселев В.Б. "Численно-аналитический способ вычисления интегралов с особенностями", на *конф. Интегральные уравнения — 2009 =Integral equations — 2009*, Киев, 2009, с. 89 – 91.

АНОТАЦІЯ

Кисельов В. Б. Інформаційна технологія моделювання процесів зносостійкості слабкострумових електричних контактних пар ковзання. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.06 – інформаційні технології. Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, 2021.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної науково-технічної задачі розробки інформаційної технології моделювання процесів зносостійкості

слабкострумових електричних контактних пар ковзання з урахуванням дії струмового навантаження.

У дисертаційній роботі отримано ряд наукових результатів, які дозволяють підвищити якість існуючих моделей зносу слабкострумових електричних контактних пар ковзання, зокрема: розроблено метод оцінки та урахування додаткового зносу контактних пар ковзання при дії струмової комутації; удосконалено математичну модель зносу контактних пар ковзання шляхом урахування додаткового зносу під струмом.

Загалом результати досліджень дозволяють: підвищити точність моделювання місткової ерозії слабкострумових контактних пар зменшивши середню похибку на 7% для квадратичної моделі і на 3% для ступеневої моделі; проводити моделювання зносостійкості слабкострумових електричних контактних пар ковзання з середнім рівнем достовірності отриманих результатів вищим за 94%.

Ключові слова: інформаційна технологія, інформаційні системи, електричні контакти, контактні пари ковзання, математична модель, зносостійкість, зношування, механічний знос, електрична ерозія.

АННОТАЦІЯ

Киселев В. Б. **Информационная технология моделирования процессов износостойкости слаботочных электрических контактных пар скольжения.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.13.06 – Информационные технологии. Черкасский государственный технологический университет, Черкассы, 2021.

Диссертационная работа посвящена решению актуальной научно-технической задачи разработки информационной технологии моделирования процессов износостойкости слаботочных электрических контактных пар скольжения с учетом действия токовой нагрузки.

В диссертационной работе получен ряд научных результатов, которые позволяют повысить качество существующих моделей износа слаботочных электрических контактных пар скольжения, в частности: разработан метод оценки и учета дополнительного износа контактных пар скольжения при действии токовой коммутации; усовершенствована математическая модель износа контактных пар скольжения путем учета дополнительного износа под током.

В целом результаты исследований позволяют: повысить точность моделирования мостиковой эрозии слаботочных контактных пар уменьшив среднюю погрешность на 7% для квадратичной модели и на 3% для ступенчатой модели; проводить моделирование износостойкости слаботочных электрических контактных пар скольжения со средним уровнем достоверности полученных результатов выше 94%.

Ключевые слова: информационная технология, информационные системы, электрические контакты, контактные пары скольжения, математическая модель, износостойкость, износ, механический износ, электрическая эрозия.

ABSTRACT

Kyselov V. B. **Information Technology of modeling the processes of wear resistance of low-current electric sliding contact pairs.** – Qualification scientific work on the rights of a manuscript.

Dissertation for the degree of candidate of technical sciences in the specialty 05.13.06 – Information technologies. Cherkasy State Technological University, Cherkasy, 2021.

The dissertation work is devoted to solving the actual scientific and technical problem of developing information technology for modeling the wear resistance processes of low-current electrical contact sliding pairs, taking into account the action of a current load.

In the dissertation work, the analysis of existing information systems of enterprises for equipment maintenance and repair is carried out.

As a result of the study, the lack of existing information systems of enterprises in the approach to equipment maintenance was revealed, which consists in the imperfection of the technology for predicting the resource of devices with electrical contact sliding pairs. In order to develop and improve information systems for maintenance and repair of industrial equipment, an information technology for modeling the wear resistance processes of low-current electric sliding contact pairs has been developed. In the course of the development of information technologies, approaches and methods have been developed to improve the quality of existing models of wear of low-current electric sliding contact pairs. A method for estimating and accounting for additional wear of sliding contact pairs under the action of current switching is developed. The mathematical model of wear of sliding contact pairs is improved, taking into account additional wear under the action of current. The analysis of the accuracy characteristics of the devices(resolution) was carried out, which made it possible to establish permissible wear limits for wires and contacts for low-current electrical contact pairs of sliding potentiometers and Potentiometric sensors. It is determined that the permissible wear limits of electrical contact pairs depend on the class of the device, which determines the permissible limits of deviation of the initial parameters, and the electrical scheme of operation of the device in the equipment.

Using regression analysis methods, a mathematical model of bridge erosion of low-current electrocontact sliding pairs is found, which makes it possible to increase the accuracy of modeling by reducing the average error by 7% for the quadratic model and by 3% for the power model. A mathematical model of the process of wear resistance of electric sliding contact pairs is presented, taking into account the contact geometry, contact pressure and working cycles, which is based on the use of an engineering Wear model and allows modeling the wear resistance of low-current electric sliding contact pairs with an average level of reliability of the results obtained more than 94%. For the first time, a new method for estimating and accounting for additional wear of sliding contact pairs under the action of current switching is developed, based on the theory of current wear, and the average error of models obtained as a result of theoretical transformations practically corresponds to the models obtained as a result of regression analysis in Matlab studies, and is less than 6% for both cases, which indicates well-chosen models (up to 7%). For the

first time, the development of Information Technology for modeling the processes of wear resistance of low-current electrical contact slip pairs is based on the developed methodology for estimating and accounting for additional wear of contact slip pairs under the action of current switching, which allows you to expand the capabilities of the information system for maintenance and repair of equipment in the field of forecasting the timing of preventive repairs of the main production equipment of the enterprise and optimizing its operating conditions, which, as a result, allows, this will lead to a reduction in repair and maintenance costs. A specialized set of engineering programs and methods for conducting wear resistance studies has been developed to improve the operational reliability of sliding contact pairs of the main production equipment of enterprises. The implemented algorithms and mathematical support expanded the capabilities of the enterprise's Information System, which made it possible to automate the process of processing the results of experimental studies and increase the level of their automation.

The results of the dissertation were implemented in the educational process of Cherkasy State Technological University at the Department of electrotechnical systems in the materials of the lecture courses "electrical devices" and "mathematical modeling of systems and processes" and used in the production process at LLC "Elevatormash" Cherkasy and JSC "Cherkasy bus" to improve the process of quality control and reliability of equipment.

In the process of obtaining information technology, approaches and methods have been developed to improve the quality of existing models of wear of low-current electr.

Key words: information technology, information systems, electrical contacts, sliding contact pairs, mathematical model, wear resistance, wear, mechanical wear, electrical erosion.