

Черкаський державний технологічний університет
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

КИСЕЛЬОВ ВЛАДЛЕН БОРИСОВИЧ

УДК 004:621.31 :004.942](043.3)

ДИСЕРТАЦІЯ

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

05.13.06 – інформаційні технології

Технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ В.Б. Кисельов

Науковий керівник Ситник Олександр Олексійович
доктор технічних наук, професор

Черкаси – 2021

АНОТАЦІЯ

Кисельов В.Б. Інформаційна технологія моделювання процесів зносостійкості слабкострумівих електричних контактних пар ковзання. – Кваліфікаційна наукова праця 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 слабкострумівих електричних контактних пар ковзання з урахуванням дії струмового навантаження.

У дисертаційній роботі проведено аналіз існуючих інформаційних систем підприємств по технічному обслуговуванню та ремонту обладнання.

В результаті дослідження виявлено недолік існуючих інформаційних систем підприємств в підході до технічного обслуговування обладнання, який полягає в недосконалості технології прогнозування ресурсу пристроїв з електричними контактними парами ковзання. З метою розвитку та вдосконалення інформаційних систем технічного обслуговування та ремонту обладнання промислових підприємств розроблена інформаційна технологія моделювання процесів зносостійкості слабкострумівих електричних контактних пар ковзання. В процесі розробки інформаційної технології запропоновано підходи та методи, які дозволяють підвищити якість існуючих моделей зносу слабкострумівих електричних контактних пар ковзання. Розроблено метод оцінки та урахування додаткового зносу контактних пар ковзання при дії струмової комутації.

Вдосконалено математичну модель зносу контактних пар ковзання шляхом урахування додаткового зносу під струмом.

Наукова новизна одержаних результатів:

- *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 слабкострумівих 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 слабкострумівих 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 напрацювання, що ґрунтується на використанні інженерної моделі зносу та дозволяє проводити моделювання зносостійкості слабкострумівих електричних контактних пар ковзання з середнім рівнем достовірності отриманих результатів більшим за 94%, що свідчить про добре підібрані моделі (похибка до 7%).

У першому розділі проведено аналіз сучасного стану питання моделювання зносостійкості слабкострумівих електричних контактних пар

ковзання. На основі аналізу факторів, які впливають на знос слабкострумових електричних контактних пар ковзання визначено основні особливості існуючих сучасних моделей механічного зносу та сформульовано основні підходи до моделювання зносу слабкострумових електричних контактних пар ковзання і визначено пріоритетні напрямки досліджень. Сформульовано основні завдання дослідження:

- розробка інформаційної технології моделювання зносу електричних контактних пар ковзання;
- розробка методу визначення основних параметрів зносу електричних контактних пар ковзання;
- удосконалення моделі прогнозу ресурсу електричних контактів з урахуванням струмового зносу;
- розробка показників оцінки зносу слабкострумових електричних контактних пар ковзання;

У другому розділі запропоновано модель механічного зносу слабкострумових електричних контактних пар ковзання на основі інженерного методу. Розроблено модель зносу плоскої ламелі при роботі зі сферичним контактом, модель зносу циліндричного проводу при поперечному русі сферичного контакту. Проведено аналіз формул ідеалізованих моделей зносу електричних контактів. Розроблено модель зносу реальних слабкострумових електричних контактних пар ковзання та методику оцінки додаткового зносу під струмом.

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.

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

Практичне значення одержаних результатів.

Цінність роботи з практичної точки зору полягає в розробці спеціалізованого комплексу інженерних програм та методики проведення досліджень зносостійкості для підвищення експлуатаційної надійності контактних пар ковзання основного виробничого обладнання підприємств. Розроблені алгоритми та математично-програмне забезпечення розширили можливості інформаційної системи підприємства, що дозволило автоматизувати процес оброблення результатів експериментальних досліджень та підвищити їх рівень автоматизації.

Результати дисертації 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» та використані у виробничому процесі на ТОВ «Елеватормаш» м. Черкаси та АТ "Черкаський автобус" для вдосконалення процесу контролю якості та надійності обладнання. Результати дисертаційної роботи підтверджені актами використання та впровадження.

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

ABSTRACT

Kiselyov 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 current load.

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

As a result of the study, the lack of existing information systems of enterprises in the approach to equipment maintenance is revealed, which consists in the imperfection of the technology for predicting the resource of devices with electrical contact pairs of slides. 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 process of developing information technology, approaches and methods have been developed that can improve the quality of existing models of wear of low-current electrical contact slip pairs. A method for estimating and taking into account 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 by taking into account additional wear under current.

Scientific novelty of the results obtained:

- *for the first time*, a new method for estimating and accounting for additional wear of sliding contact pairs under the action of current switching has been developed, which is based on the theory of current wear, and the average error of models obtained as a result of theoretical transformations practically

corresponds to 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 based on the developed method of 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 of maintenance and repair of equipment in the field of forecasting the timing of preventive repairs of the main production equipment of the enterprise and optimize its operating conditions, which, as a result, will lead to a reduction in repair and maintenance costs.

- *improved* mathematical model of bridge erosion of low-current electrical contact sliding pairs was found using regression analysis methods, which allows improving the accuracy of modeling by reducing the average error by 7% (from 9% to 2%) for the quadratic model and by 3% (from 9% to 6%) for the power model;

- *improved* mathematical model of the process of wear resistance of electric contact pairs of sliding, taking into account the geometry of contacts, contact pressure and operating cycles, which is based on the use of an engineering Wear model and allows you to simulate the wear resistance of low-current electric contact pairs of sliding with an average level of reliability of the results obtained more than 94%, which indicates well-selected models (error up to 7%).

In the first chapter, the current state of modeling the wear resistance of low-current electric sliding contact pairs is analyzed. Based on the analysis of factors affecting the wear of low-current electric slip contact pairs, the main features of existing modern models of mechanical wear are determined and the main approaches to modeling the wear of low-current electric slip contact pairs are formulated and priority research areas are determined. The main objectives of the study are formulated:

- development of Information Technology for modeling the wear of electric sliding contact pairs;
- development of a method for determining the main wear parameters of electric sliding contact pairs;
- improvement of the model for predicting the life of electrical contacts, taking into account current wear;
- development of wear assessment indicators for low-current electrical slip contact pairs;

In the second chapter, we propose a model of mechanical wear of low-current electric sliding contact pairs based on the engineering method. A model of flat lamella wear when working with a spherical contact and a model of cylindrical wire wear during transverse movement of a spherical contact are developed. Formulas of idealized models of wear of electrical contacts are analyzed. A model of wear of real low-current electric sliding contact pairs and a method for estimating additional wear under current are developed.

In the third chapter, a method for selecting the permissible wear limits of low-current electric sliding contact pairs is developed. A method for predicting the wear resistance of low-current electric sliding contact pairs is proposed. The wear of de-energized low-current electric sliding contact pairs was studied and modeled by MATLAB tools. MATLAB studies and simulations of wear of low-current electric sliding contact pairs when they are powered by Direct Current are carried out.

In the fourth chapter, an information technology for modeling the wear resistance processes of low-current electric sliding contact pairs is developed. A comparative analysis of serial computer modeling tools is conducted and their priority is determined. The organization of the modeling system and the structure of the software package, software modules of the system are determined, and the characteristics of the modeling system are determined. A software package has been created for modeling the wear of low-current electrical sliding contact pairs using MATLAB tools.

Practical significance of the results obtained.

The value of the work from a practical point of view lies in the development of a specialized set of engineering programs and methods for conducting wear resistance studies to improve the operational reliability of sliding contact pairs of the main production equipment of enterprises. The developed algorithms and mathematical software expanded the capabilities of the Enterprise Information System, which made it possible to automate the process of processing the results of experimental studies and increase their level of automation.

The results of the dissertation were implemented in the educational process at 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. The results of the dissertation work are confirmed by acts of Use and implementation.

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

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

- [1] V. B. Kyselov "Method Of Constructing A Mathematical Model Of Wear-Resistance In Potentiometer Sensors". *Vіsnyk Cherkaskogo Derzhavnogo Tekhnologìchnogo Unìversytetu*, №3, с. 5–12, 2020. *Запропоновано метод побудови математичної моделі зносостійкості потенціометричних датчиків з урахуванням струмового навантаження.*
- [2] О. О. Ситник, К. М. Ключка, В. Б. Кисельов, та Г. О. Кисельова, "Моделювання місткової ерозії слабкострумових електричних контактів засобами MatLab", *Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки*, Кам'янець-Подільський, Вип. 21, с. 40 – 52, 2020. *Запропоновано моделі механічної ерозії слабкострумових електричних контактних пар отриманих методом ідентифікації.*
- [3] О. О. Ситник, В. Б. Кисельов, та Г. О. Кисельова, "Про один з методів побудови математичної моделі зносостійкості плівкових потенціометрів", *Молодий вчений*, №2 (78), с. 189 – 192, 2020. *Створено математичну модель механічного зносу контактних пар ковзання для плівкових потенціометрів при постійному значенні енергії в зоні тертя.*
- [4] Г. О. Кисельова, та В. Б. Кисельов, "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. *Запропоновано рекурентні алгоритми реалізації методу простих ітерацій.*
- [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. *Запропонував спосіб розв'язання рівнянь в програмі MatLab.*
- [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. *Запропонував алгоритм для визначення похибок у складі емпіричних даних.*
- [7] Г. О. Кисельова, та В. Б. Кисельов, "Застосування процесу Ейткена при розрахунках інтегралів з особливостями чисельними методами", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, №1, с. 34 – 41, 2010. *Запропонував метод конструювання адаптивних алгоритмів.*
- [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. *Запропонував модульну структуру універсального алгоритму чисельного розв'язку.*
- [9] А. А. Сытник, 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. *Запропонував спосіб визначення характеристик вимірювальних перетворювачів.*
- [10] А. А. Киселева, В. Б. Киселев, А. М. Корнеев и С. Ю. Протасов, "Численно-аналитический способ вычисления интегралов с особенностями", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, №3, с. 64 – 69, 2008. *Запропонував спосіб виділення особливості при наближеному обчисленні.*
- [11] Alexander Sytnik, Sergey Protasov, Vladlen Kyselov, and Hanna Kyselova, "Investigation of common criteria for assessing the wear resistance of low-current contact pairs". *Danish scientific journal. Denmark*. vol. 2, no. 45, pp. 43–49, 2021. *Запропонував метод прогнозування зносостійкості контактних пар ковзання дротяних потенціометрів, що працюють під струмовим навантаженням.*

- [12] О. О. Ситник, К. М. Ключка, Г. О. Кисельова, та В. Б. Кисельов, "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. *Здобувачем проведено математичне моделювання місткової ерозії електричних контактних пар засобами математичної системи MATLAB.*
- [13] О. О. Ситник, Г. О. Кисельова, та В. Б. Кисельов, "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. *Запропонував використання показників для моделювання зносостійкості електричних контактних пар ковзання.*
- [14] О. О. Ситник, Г. О. Кисельова, та В. Б. Кисельов, "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. *Провів аналіз залежності зміни вихідної напруги потенціометра зі штучною та природною нульовою точкою при закорочуванні витків обмотки.*
- [15] Г. О. Кисельова, та В. Б. Кисельов, "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. *Розробив алгоритм чисельного розв'язання рівняння.*
- [16] Г. О. Кисельова, та В. Б. Кисельов, "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.

Запропоновано ефективний метод чисельного розв'язку рівнянь в MatLab.

- [17] А. А. Сытник, Н. В. Раевский, А. А. Киселева, и В. Б. Киселев, "Кубатурный фильтр Калмана в задачах статистического оценивания параметров радиолокационных систем", на *I Міжнар. наук.-техн. конф. Обчислювальний інтелект*, Черкаси, 2011, с. 484 – 486.
Запропонував алгоритм зниження похибок статистичної оцінки параметрів.
- [18] А. А. Киселева, и В. Б. Киселев, "Численно-аналитический способ вычисления интегралов с особенностями", на *конф. Интегральные уравнения — 2009 =Integral equations — 2009*, Киев, 2009, с. 89 – 91.
Запропонував спосіб наближеного обчислення з виділенням особливості.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ.....	17
ВСТУП.....	18
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПИТАННЯ МОДЕЛЮВАННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ СЛАБКОСТРУМОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ КОНТАКТНИХ ПАР КОВЗАННЯ	25
1.1 Процеси, які впливають на знос слабкострумових електричних контактних пар ковзання.....	25
1.2 Аналіз моделей механічного зносу контактних пар ковзання.....	30
1.3 Аналіз впливу електричного струму на знос електричних контактних пар ковзання	39
1.4 Показники оцінки зносу слабкострумових електричних контактних пар ковзання.....	43
1.5 Загальні відомості про інформаційні технології моделювання зносостійкості обладнання.....	45
Висновки по розділу 1.....	55
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИ МОДЕЛЮВАННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ СЛАБКОСТРУМОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ КОНТАКТНИХ ПАР КОВЗАННЯ.....	58
2.1 Метод моделювання та оцінки механічного зносу слабкострумових електричних контактних пар ковзання.....	58
2.1.1 Знос плоскої ламелі при роботі зі сферичним контактом....	60
2.1.2 Знос циліндричного проводу при поперечному русі сферичного контакту.....	64
2.1.3 Аналіз формул ідеалізованих моделей зносу електричних контактних пар ковзання.....	68

2.2 Знос реальних слабкострумів електричних контактних пар ковзання.....	69
2.3 Метод оцінки додаткового зносу слабкострумів електричних контактних пар ковзання під струмом.....	75
2.4 Моделювання місткової ерозії слабкострумів електричних контактних пар засобами MATLAB.....	77
Висновки по розділу 2.....	92
РОЗДІЛ 3 ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЗНОСУ СЛАБКОСТРУМОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ КОНТАКТНИХ ПАР КОВЗАННЯ.....	
3.1 Вибір допустимих меж зносу слабкострумів електричних контактних пар ковзання.....	93
3.2 Методика прогнозування зносостійкості слабкострумів електричних контактних пар ковзання.....	100
3.3 Моделювання зносу знеструмлених слабкострумів електричних контактних пар ковзання засобами MATLAB.....	109
3.4 Моделювання зносу слабкострумів електричних контактних пар ковзання при живленні їх постійним струмом засобами MATLAB.....	113
Висновки по розділу 3.....	122
РОЗДІЛ 4 ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ МОДЕЛЮВАННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ СЛАБКОСТРУМОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ КОНТАКТНИХ ПАР КОВЗАННЯ.....	
4.1 Розробка інформаційної технології моделювання процесу зносу.....	123
4.2 Структура пакету програм.....	132
4.3 Робота пакету програм.....	142
Висновки по розділу 4.....	155

	16
Висновки.....	156
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	158
Додаток А Лістинг основних модулів програм.....	171
Додаток Б Лістинг допоміжних модулів програм.....	176
Додаток В Лістинг баз даних програм.....	180
Додаток Г Інформація про впровадження результатів дисертаційного дослідження	183
Додаток Д Список публікацій здобувача за темою дисертації	188

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ

Україномовні скорочення:

АСУ ТП – автоматизована система управління технологічними процесами;

ІС – інформаційна ситема;

ІТ – інформаційна технологія;

КВПіА – контрольно-вимірювальні прилади і автоматизація;

КЕК – ковзаючі електричні контакти;

ПД – потенціометричний датчик;

ПЗ – програмне забезпечення;

ПП – пакет програм;

ППР – планово-попереджувальний ремонт;

ТО – технічне обслуговування;

ТОіР – технічне обслуговування і ремонт;

Англомовні скорочення:

СММІS – Computerized Information Maintenance Management System, комп'ютеризована інформаційна система управління технічним обслуговуванням;

СМMS – Computerized Maintenance Management System, комп'ютеризована система управління технічним обслуговуванням;

ЕАМ – Enterprise Asset Management, управління корпоративним контентом;

ЕRР – Enterprise Resource Planning, система планування ресурсів підприємства;

ВСТУП

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 не своєчасна — 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.

Мета і завдання дослідження. 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.

Завдання:

- розробка інформаційної технології моделювання процесів зносостійкості слабкострумових електричних контактних пар ковзання;
- розробка методу визначення основних параметрів зносу електричних контактних пар ковзання;

- удосконалення математичної моделі прогнозу ресурсу електричних контактів з урахуванням струмового зносу;
- розробка узагальнених показників оцінки зносу слабкострумівих електричних контактних пар ковзання;

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

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

Методи дослідження. В дослідженні використовуються 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:

- удосконалено математичну модель місткової ерозії слабкострумівих 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 напрацювання, що ґрунтується на використанні інженерної моделі зносу та дозволяє проводити моделювання зносостійкості слабкострумівих електричних контактних пар ковзання з середнім рівнем достовірності отриманих результатів більшим за 94%, що свідчить про добре підібрані моделі (похибка до 7%).

- 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.

Практичне значення одержаних результатів. Практична цінність роботи полягає в розробці спеціалізованого комплексу інженерних програм та методики проведення досліджень зносостійкості для підвищення експлуатаційної надійності контактних пар ковзання основного виробничого обладнання підприємств. Впровадження алгоритмів та математично-програмного забезпечення розширило можливості інформаційної системи підприємства, дозволило автоматизувати процес оброблення результатів експериментальних досліджень та підвищити їх рівень автоматизації.

Реалізація. Дисертаційна робота виконана в Черкаському державному технологічному університеті. Дослідження проводились в рамках науково-дослідницької роботи: «Моделювання процесу технічної експлуатації силових трансформаторів з урахуванням закону дифузійно-немонотонного розподілу їх відмов» (номер державної реєстрації 0117U003070), (виконавець).

Сучасний розвиток різних галузей науки характеризується взаємним проникненням. Дослідження процесів зносу під струмовим навантаженням є однією з таких робіт.

В даний час в приладобудуванні та автоматичі відсутня єдина методика обліку та оцінки допустимої величини зносу електричних контактів, яка враховувала б їх механічні та струмові навантаження. Дослідження по зносу в більшості випадків носять емпіричний і розрізнений характер. На кожному підприємстві встановлюються свої критерії працездатності, що створює неідентичність оцінки надійності їх на суміжних виробництвах. На проведення випробувань по зносу контактних пар витрачається багато часу і матеріальних засобів.

Теоретичні та експериментальні дослідження зносостійкості слабкострумових контактних пар з метою підвищення технічного ресурсу обладнання слід вважати перспективними.

Предметом цієї роботи є розробка інформаційної технології моделювання процесів зносостійкості слабкострумових електричних контактних пар ковзання і створення методики прогнозування їх ресурсу при проектуванні та експлуатації. Для вирішення даної проблеми необхідно було провести наступні роботи:

1. Вибрати прийнятні для контролю параметри зносу і на підставі дослідження точнісних характеристик приладів, встановити допустимі межі їх зносу.

2. Створити теоретичну модель механічного зносу електричних контактних пар ковзання для приладів при постійному і змінному значеннях енергії в зоні тертя.

3. Дослідити на реальних конструкціях приладів вплив на механічний знос величини і роду струму, що проходить через зону контактування.

4. Створити на базі проведених досліджень математичну модель для урахування впливу струмового навантаження на параметри зносу контактних пар ковзання.

5. Визначити в залежності від похибки приладу допустимі межі зносу проводу і контакту для потенціометрів зі штучною і природною, нульовими точками.

6. Розробити інженерні методики прогнозування зносостійкості контактних пар при струмовому навантаженні.

7. Розробити інформаційну технологію моделювання процесів зносостійкості слабкострумових електричних контактних пар ковзання.

За даними проведених автором у дисертаційній роботі досліджень на захист виносяться:

1. Ідеалізовані моделі механічного зносу двох типів: електричні контактні пари площина-сфера; циліндр-сфера при постійному і змінному значеннях енергії в зоні тертя.

2. Математична модель зносу електричних контактних пар ковзання з урахуванням струмового навантаження.

3. Формули для визначення допустимого зносу електричних контактних пар в залежності від рівня похибки приладу.

4. Формули для розрахунку зносостійкості електричних контактних пар, що працюють під струмовим навантаженням.

5. Інформаційна технологія моделювання процесів зносостійкості слабкострумових електричних контактних пар ковзання.

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 матеріалів дисертації. Матеріали, основні положення та результати дисертаційної роботи доповідались і надруковані в збірниках докладів і матеріалів науково-технічних конференцій, семінарів, симпозіумів: 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 у науковому періодичному виданні інших держав [11], 10 статей у наукових фахових виданнях України, що входять до переліку, затвердженого МОН України, [1] – [10], 7 публікацій у збірниках міжнародних та вітчизняних науково-практичних і наукових конференцій [12] – [18]. Одноосібна 1 публікація [1].

Детальний список публікацій здобувача за темою дисертації наведено у додатку Д.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, посилання та п'яти додатків. Загальний обсяг роботи становить 189 сторінок, із них основного тексту дисертації – 157 сторінок, 57 рисунків, 10 таблиць, посилання включає 117 найменувань та займає 12 сторінок, а також 5 додатків на 20 сторінках.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПИТАННЯ МОДЕЛЮВАННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ СЛАБКОСТРУМОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ КОНТАКТНИХ ПАР КОВЗАННЯ

1.1 Аналіз процесів, які впливають на знос слабкострумівих електричних контактних пар ковзання

Електричним контактом називається дотик тіл, що забезпечує безперервність електричного кола, а також пристрій, що містить дотичні деталі [1]. Головним призначенням електричних контактів є безперешкодне проходження електричного струму через поверхню контакту [1], [2], [3].

Роль електричних контактів в сучасній техніці істотно зросла в зв'язку з тенденцією до мініатюризації пристроїв управління і контролю, появою величезної кількості портативних пристроїв [4]. При цьому номінальні площі електричного контакту скоротилися, наблизившись до мікрометрового і нанометрового діапазонних розмірів, а кількість контактів в одиниці об'єму збільшилася на порядки [3]. Вимоги до надійності контактів різко зросли, а необхідність зниження перехідного опору і, отже, тепловиділення в контактах стали дуже актуальними.

В цілому, по конструкції всі види контактів можуть бути розділені на два класи — нерухомі (контактні з'єднання) і рухомі [5]. У рухомих контактах, в крайньому випадку, один з нерухомих компонентів притискається до рухомого компоненту і відводиться від нього при замиканні, перемиканні і розмиканні електричного кола, що знаходиться під струмовим навантаженням. Залежно від призначення виділяють комутуючі (розривні) і струмознімальні (ковзаючі і ті, що котяться) контакти [2], [3]. Перші працюють в переривчастому режимі (численні слабкострумівих контакти реле і контакти електричних апаратів в силових ланцюгах), а другі контакти постійно знаходяться в умовах тертя і зношування (щітки

електричних машин, повзунки потенціометрів, струмознімання транспортних і підйомно-транспортних пристроїв) [3], [6].

Аналіз роботи електричних контактів вимагає розгляду наступних основних процесів: формування фактичної площі контакту, тертя в умовах дії електричного струму і зношування під дією механічних і електричних факторів [1], [7].

Розглядаючи сукупність механічних, електричних і фізико-хімічних факторів можна запропонувати схему видів зношування за ДСТУ 2823-94, представлену на рис. 1.1 [8].

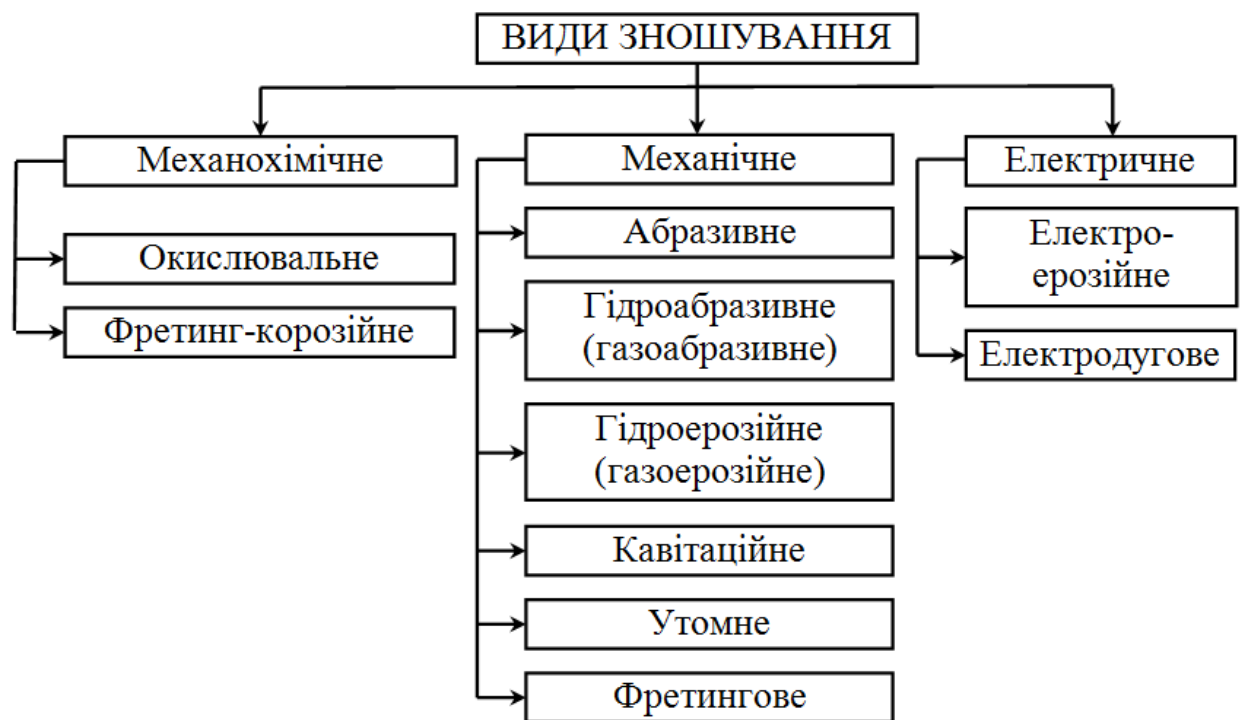


Рисунок 1.1 – Види зношування за ДСТУ 2823-94 [8]

Навіть для багатьох нерухомих контактів, зокрема, затискних, надзвичайно важливо забезпечити максимальну площу механічного контакту, виключаючи утворення в процесі роботи непровідних, наприклад, оксидних, плівок. У різних контактах тертя та знос відіграють більш важливу роль, оскільки при конструюванні необхідно враховувати силу розмикання контакту, яка визначається силою тертя, і ресурс контакту, що залежить від зносостійкості [9]. Найбільш складною проблемою при

конструюванні рознімних контактів є гарантія сумісності вимог мінімального зносу і стабільного мінімального значення контактного електричного опору. Так як контактний тиск робить найбільш сильний вплив на обидві ці характеристики, необхідно визначити оптимальну величину контактного тиску [10].

З'єднання з ковзаючими електричними контактами (КЕК) відносяться до найбільш широко використовуваних в електротехніці [7]. Достатньо зауважити, що велика частина всієї електричної енергії в процесі її генерування і споживання, принаймні, один раз проходить через КЕК. Незважаючи на велике значення КЕК в техніці, залишаються невирішеними ряд проблем по забезпеченню надійності та ефективності їх роботи [6]. Інтенсивність зношування КЕК залишається більш високою в порівнянні з іншими типами контактів [2], [3], [11].

Практично всі типи електричних контактів, за винятком нерозбірних (паяних і зварних), можуть розглядатися як рухливі системи, працездатність яких, в основному, обумовлена параметрами тертя і зношування.

Характерною особливістю КЕК є їх зношування в процесі роботи, як і в звичайних парах тертя, з тією особливістю, що робочі навантаження контактів зазвичай невеликі [12]. Електричне зношування проявляється в перенесенні матеріалу одного елемента на інший, іскрінні і дугоутворенні, що призводять до різкого погіршення якості поверхні, що в свою чергу збільшує швидкість механічного зношування.

Взаємозв'язок між фрикційними і електричними процесами є важливою рисою рухомих контактів, так як плями, через які передається струм, повністю або частково збігаються з плямами, що сприймають механічне навантаження. Тому стан поверхні розділу і поведінка граничних плівок впливає одночасно як на процеси тертя, так і струмопроходження.

Сукупність механічних і фізико-хімічних факторів в електричному контакті, можна представити у вигляді схеми (рис. 1.2) [13]. Параметрами з'єднання 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 з'єднання 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.

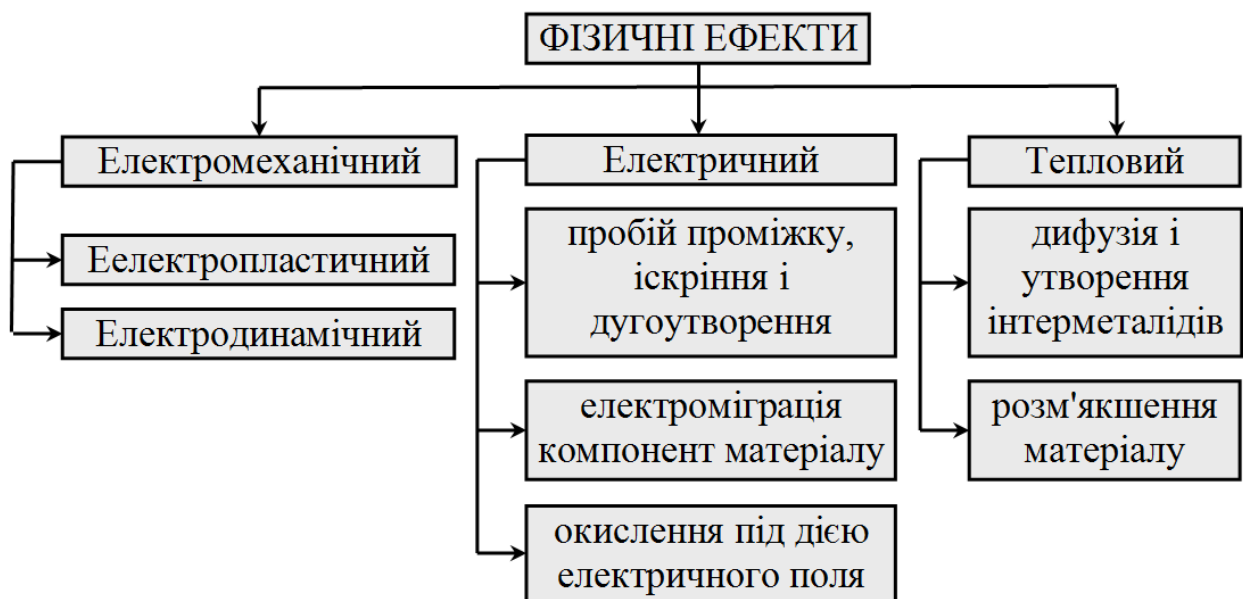


Рисунок 1.2 – Фізичні явища, що визначають проходження струму через електричний контакт [13]

Роль граничних плівок

Фактори дії граничного шару можна розділити на групи, виділивши в них позитивні і негативні (рис. 1.3) [3]. Розуміння причин і процесів утворення плівок дозволяє мінімізувати їх негативні впливи на роботу з'єднувачів і дає можливість проводити попереджувальні та коригувальні дії в процесі експлуатації.

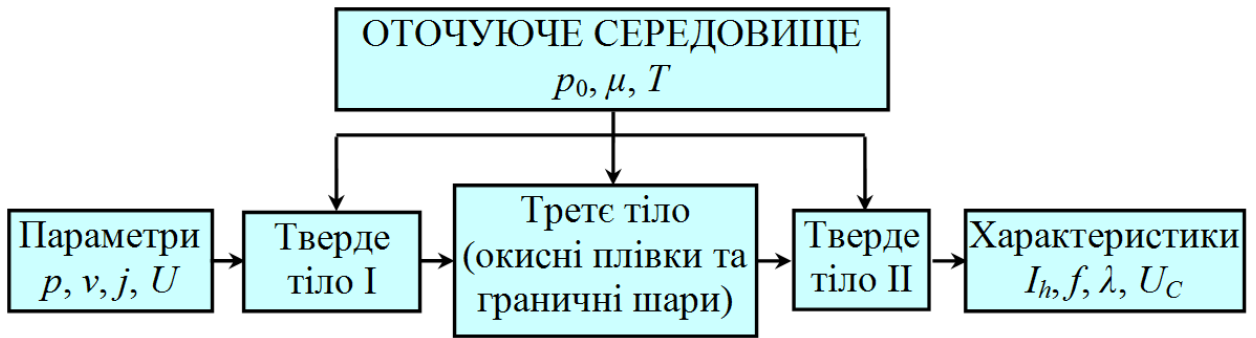


Рисунок 1.3 – Схема факторів, що визначають роботу ковзних електричних контактів [3]

Основні шляхи підвищення надійності рухомих контактів. Можна виділити три основних напрямки підвищення ефективності контактів (рис. 1.4) [2]:

- розробка нових контактних матеріалів, покриттів і мастил;
- застосування спеціальних методів впливу на структуру і стан поверхні розділу;
- удосконалення конструкції контакту.

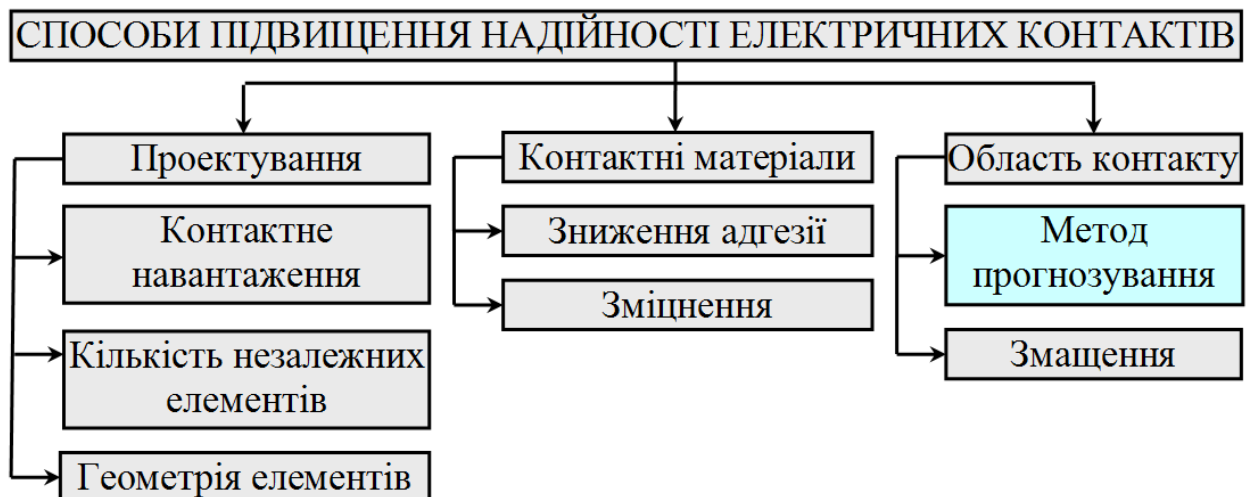


Рисунок 1.4 – Основні шляхи підвищення надійності рухомих контактів

Спільною рисою методів, пов'язаних з використанням нових матеріалів і мастил, є прагнення до створення на поверхнях контакту матеріалів тонких перехідних шарів, що не впливають на процес передачі струму через контакт, але різко знижують ймовірність захоплення, зварювання та інтенсивного

механічного зношування [2]. Найбільш відомо і розроблено застосування композиційних матеріалів, що містять в складі тверді мастила, що володіють електропровідністю. Крім того, увагу фахівців, які проєктують різні типи контактів, привертають рідкі і консистентні (пластичні) контактні мастила [3].

Надійність рухомих контактів може бути також підвищена за рахунок включення в роботу декількох паралельних одиночних контактних пар, так як збільшення числа контактних плям підвищує стабільність контактного опору [3]. Зокрема, відомо застосування розрізних і комбінованих щіток для підвищення ефективності роботи електричних машин. Даний метод застосований і в потенціометрах з декількома повзунками, що ковзають по резистивному шару.

1.2 Аналіз моделей механічного зносу контактних пар ковзання

Моделі зносу використовуються для прогнозування реакції матеріалу на ситуацію зносу і для прогнозування швидкості видалення матеріалу з поверхні тіла [14], [15]. Класична теорія зношування починається з розгляду швидкості видалення матеріалу як функції швидкості ковзання, твердості матеріалу, прикладеного навантаження [16], [17], [18]. Існують чотири основні теорії для побудови моделі зносу: підхід балансу маси, підхід балансу енергії, аналіз напруг/деформацій і підхід контактної механіки для визначення поведінки матеріалу [18].

Знос може відбуватися в декількох різних формах і ці процеси відрізняються один від одного, коли ви розглядаєте тіла, які знаходяться в контакті, спосіб, яким матеріал видаляється, і в якій кількості [17], [19]. Ці процеси не завжди відбуваються окремо, тобто в даній ситуації можуть бути присутніми кілька процесів. Основними процесами є: стирання, адгезія, ерозія, фретинг і кавітація [20], [21], [22]. Наприклад, стирання відбувається як фізичний ефект канавки, коли більш тверда з двох поверхонь буде вгризатися в більш м'який матеріал і згодом видаляти матеріал. Відмінності між процесами зношування призводять до можливих відмінностей в

механізмі руйнування матеріалу, наприклад, за рахунок зсуву матеріалу або за рахунок ініціювання і поширення тріщин; отже, процес зношування повинен враховуватися при моделюванні [23], [24]. Основні моделі механічного зносу наведено в табл. 1.1 [18].

Таблиця 1.1 – Основні моделі механічного зносу

Модель	Математичний опис	Позначення
1	2	3
Класична Теорія зносу: Амонтона (1699) — Кулона (1781)	$F = \mu \cdot N,$	F – сила тертя; μ – коефіцієнт тертя; N – нормальне навантаження.
Хольма (1946)	$V = z \cdot \frac{P}{P_m},$	V – об'єм матеріалу, що видаляється на одиницю відстані ковзання; z – ймовірність видалення атома на атомну зустріч; P – прикладене навантаження; p_m – тиск потоку зношеної поверхні,
Арчарда (1953)	$V = S \cdot K \cdot \frac{P}{P_m},$	V – об'єм матеріалу, що видаляється; S – відстань ковзання; K – коефіцієнт зносу; P – прикладене навантаження; p_m – тиск потоку досліджуваного матеріалу.
Fouvry et al (2001)	$V = \alpha_v \left(\sum E_D - E_{DA} \right),$	V – об'єм видаленого матеріалу; α_v – коефіцієнт енергії зносу; E_D – накопичена енергія, що розсіюється в матеріалі; E_{DA} – енергія, необхідна для активації носія.

1	2	3
Savio et al (2008)	$dV = A \cdot K_R \cdot P \cdot v \cdot dt,$	dV – зміна об'єму; A – площа контакту; K_R – коефіцієнт зносу; P – тиск, прикладений до площі контакту; v – швидкість ковзання; dt – зміна в часі.

Класична Теорія зносу

Згідно з джерелом [25], у розвитку моделей зносу з середини до кінця ХХ століття спостерігалися три основні етапи або тенденції. Вони такі: засновані на емпіричних рівняннях, засновані на підході контактної механіки і засновані на підході механіки руйнування. На жодному рівні не було досягнуто загальної згоди щодо зносу: його наслідків, керуючих змінних та найкращого методу підходу та вивчення цього явища. Наприклад, в ході свого дослідження НС Meng [25] виявив, що в цілому 100 змінних були використані в більш ніж 180 моделях і що немає двох робіт, що узгоджуються по важливості будь-якої однієї змінної в процесі зношування.

Тертя є дуже важливим поняттям і нерозривно пов'язане зі зносом. Воно залишалося відносно езотеричною темою до тих пір, поки такі постаті, як Амонтон (Гийом Амонтон (фр. Guillaume Amontons; 1663—1705) [12], [26] не почали вивчати в цій галузі. Рівняння 1.1 дає запропоновану гіпотезу:

$$F = \mu \cdot F_N, \quad (1.1)$$

де F – сила тертя, μ – коефіцієнт тертя, а F_N – нормальне прикладене навантаження. Це рівняння тертя засноване на двох основних припущеннях: по-перше, розподіл напруг не залежить від нормального навантаження. По-друге, прикладене навантаження пропорційне реальній площі контакту; якщо кожна поверхня вважається, складається зі складної топографії нерівностей,

то реальна площа контакту називається загальною площею, що розділяється між нерівностями, що зустрічаються.

Хольм (1946) [12], [26].

Хольм почав розглядати процес зношування стосовно відносного руху поверхневих шорсткостей. Він припускав, що окремі атоми на протилежних площинах рухаються назустріч один одному і стикаються. Його гіпотеза свідчила, що кількість матеріалу, видаленого під час цих атомних взаємодій, є функцією властивостей контактуючих матеріалів і навантаження, прикладеного до контакту. Це співвідношення визначається рівнянням 1.2.

$$V = z \cdot \frac{P}{p_m}, \quad (1.2)$$

У наведеному вище рівнянні V – об'єм матеріалу, що видаляється на одиницю відстані ковзання, z – ймовірність видалення атома на атомну зустріч і буде залежати від властивостей контактуючих матеріалів, P – прикладене навантаження, а p_m – тиск потоку зношеної поверхні, який можна порівняти з твердістю матеріалу.

Арчард (1953) [27], [28] – [31].

Арчард вивчив процес зношування і вирішив, що існує ряд ключових міркувань, які повинні бути включені в модель зносу. Він намагався об'єднати ці розрізнені змінні в одне передбачуване рівняння. Модель Арчарда заснована на русі і взаємодії протилежних частинок на будь-якому з контактуючих тіл. Слід зазначити, що він посилався на Хольма у своїх публікаціях, і його роботу можна розглядати як розширення або подальший розвиток рівняння зносу Хольма; вони обидва зосереджені на підході контактної механіки, але Арчард вирішив, що режим зносу буде залежати від більшого числа впливів, ніж Хольм.

Крім того, він припустив, що деформація, яка відбувається має пластичний характер і що найбільш важливою властивістю матеріалу є "тиск потоку" більш м'якого металу. Рівняння 1.3 – це рівняння зносу Арчарда.

$$V = S \cdot K \cdot \frac{P}{p_m}, \quad (1.3)$$

де V – об'єм матеріалу, що видаляється (m^3), S – відстань ковзання (m), K – коефіцієнт зносу, P – прикладене навантаження (H), p_m – тиск потоку досліджуваного матеріалу. Видно, що швидкість видалення матеріалу прямо пропорційна прикладеному навантаженню і не залежить від фактичної площі контакту.

Сучасні математичні моделі зносу

У сучасних дослідженнях в цій області використовуються чотири домінуючі методології. Це енергетичний баланс, баланс маси, аналіз напруг/деформацій і, нарешті, підхід контактної механіки [32]. Немає прямого зв'язку або згоди між різними моделями і рівняннями, які можна знайти в літературі, і з посиланням на роботу Менга і ін. існує цілий ряд змінних і механізмів, які розглядаються тільки в одній або двох роботах. Було проведено дуже велику кількість досліджень в дуже специфічних областях застосування і ситуаціях зносу. У деяких випадках автори, мабуть, довільно вибирали не тільки змінні, які мають найбільше значення для зносу контактуючих матеріалів, але і найкращий спосіб підходу до вирішення проблеми. Формальної стандартизації як такої в цій галузі не було, і це створює труднощі як для дослідників, так і для інженерів, які намагаються боротися з наслідками зносу в його різних формах [33].

Fouvy et al (2001) [34].

Fouvy зі співавторами почала розслідування енергії, поглиненої твердим матеріалом, який піддається зносу, викликаному тертям. Цей метод заснований на концепції, згідно з якою кінетична енергія, що надходить в трибосистему або застосовувана до неї, буде зменшена дисипативними ефектами, тобто існує кілька способів витрачання цієї енергії: робота, виконувана з контактуючими матеріалами проти тертя, для отримання тепла і деформації поверхневих нерівностей (або пружним, або пластичним способом) і, отже, виробництво частинок зносу. Спочатку вони досліджували

придатність рівняння Арчарда стосовно ситуації, коли фрикційні характеристики системи не були постійними. Вони досягли цього шляхом використання ряду зразків з різною пористістю, в яких було суспендовано тверде мастило. Таким чином, коефіцієнт тертя змінювався за рахунок зміни пористості матеріалу (над якою вони мали контроль).

Автори розглядали метод енергетичного балансу. Вони заявили, що "об'єм зносу можна порівняти з накопиченою роботою тертя, розсіяною через середовище". Знову ж таки, ця робота тертя може сприяти ряду деструктивних процесів, таких як стирання, виділення тепла, утворення і видалення фрагментів зносу і т.д. для початку автори стверджують що обсяг утвореної речовини зносу буде результатом повної енергії, розсіяної в матеріалі, енергії, необхідної для активації зносу, а також буде залежати від коефіцієнта енергетичного зносу. Ця залежність показана в рівнянні 1.4:

$$V = \alpha_V \left(\sum E_D - E_{DA} \right), \quad (1.4)$$

де V – об'єм видаленого матеріалу, α_V – коефіцієнт енергії зносу, E_D – накопичена енергія, що розсіюється в матеріалі і E_{DA} – це енергія, необхідна для активації носія. В експерименті фреттінга розсіяна енергія прирівнюється до площі всередині фреттінгового контуру, яка є добутком прикладеної тангенціальної сили на відхилення контакту, зображеного на діаграмі розсіювання [20], [21]. Крім того, енергія, прикладена до початку зносу, отримана з цього експерименту.

Наступним етапом в розробці цієї моделі є вивід коефіцієнта енергетичного зносу. Для цього автор пропонує порівняти енергетичні компоненти зносу, детально описані вище, з фізичними енергетичними компонентами, тобто енергією зв'язку між молекулами складеного матеріалу, енергією активації, необхідної для ініціювання окислення, і механічною енергією (кінетичної, зсувної). У наступному рівнянні енергія зносу, необхідна для виходу одного Молю матеріалу з межі розділу, порівнюється з межею плинності матеріалів і обсягом продукту. Таким чином, це порівняння механічних елементів енергії:

$$E_{a_y} = a_y \cdot V_o \cdot N, \quad (1.5)$$

де E_{a_y} – енергія зношування матеріалу (Дж/моль), a_y – межа плинності матеріалу, V_o – атомний об'єм, N – число Авогадро. Тепер енергія зносу розглядається як функція енергії, необхідної для механічної деформації поверхні матеріалу в поєднанні з енергією активації, необхідної для початку окислення. Енергія на моль зношеного матеріалу задається рівнянням 1.6:

$$\varphi_{mol} = C_f \cdot (E_{\sigma_y} + E_a), \quad (1.6)$$

де φ_{mol} – це енергія яку потрібно вносити, C_f – постійна, пов'язана з розташуванням контактів, електронна E_{σ_y} і механічна енергії для отримання матеріалу, і E_a – енергія активації реакції окислення. Ця молярна енергія зносу тепер може бути використана для визначення енергетичного коефіцієнта зносу шляхом ділення загального об'єму матеріалу, що видаляється на енергію, необхідну на моль матеріалу.

$$\alpha_v = \frac{V}{\varphi_{mol}} = \frac{M}{\rho} \cdot \frac{1}{C_f \cdot (E_{\rho_y} + E_a)}, \quad (1.7)$$

де M – молярна вага, а ρ – щільність матеріалу. Результат цього рівняння 1.7 тепер можна використовувати для опису зносу матеріалу з використанням енергетичного підходу. Використовуючи дослідження на основі енергії, автор включив коефіцієнт тертя контактуючих матеріалів і тим самим усунув одну з невідповідностей моделі зносу Арчарда. Крім того, за допомогою представлення енергії активації зносу і використання коефіцієнта зносу автор стверджує, що механізми зносу можуть бути краще зрозумілі. Зокрема, трансформація мікроструктури матеріалів в період "активації зносу" може бути краще вивчена і зрозуміла завдяки цим визначенням.

Savio et al (2008) [35].

Savio і співавтори вибрали в якості основного напрямку своїх досліджень полірування скляних форм і процес видалення властивого їм матеріалу. Це дуже складний дослід, в якому одночасно будуть працювати два основних механізми, що зношуються або "ушкоджуються". Автор

використовує поліруючий елемент з полірувальним інструментом і абразивну дію суспензії, використовуваної для допомоги у видаленні матеріалу. Крім того, може бути також ерозивний елемент, але це не обговорюється автором.

Цей дослід отримав широкий інтерес і увагу в літературі та сприяв визнанню ряду ключових теорем. Перша гіпотеза полягає в хімічній дії: плівка матеріалу утворюється за рахунок дифузії суспензії в верхніх шарах скла із подальшим видаленням цього шару. Друга теорія передбачає абразивний тип впливу, при якому велика кількість дрібних тріщин індукується в матеріалі внаслідок механічного контакту, подальше руйнування відбувається через руйнування шорсткостей. По-третє, вводиться поняття пластичної течії, при якій піки матеріалу нагріваються за рахунок тертя, а потім деформуються під дією прикладеного до них тиску. Нарешті, гіпотеза фрикційного зносу — це розвиток описаної хімічної дії, при якому механічне видалення плівки тепер приписується подальшій хімічній взаємодії між зернами, зваженими в суспензії, і компонентами скла.

Вивчивши відповідну літературу в обраній ним області, автор прийшов до висновку, що найбільш відповідним методом для його дослідження є метод абразивного зносу. Він пропонує досліджувати змінні, що мають відношення до процесу, а саме: деформацію інструменту, швидкість ковзання, розміри інструменту і початкову шорсткість поверхні. Пристрій для зношування, що представляє інтерес, складається з сферичного інструменту, який шарнірно з'єднаний на трьох вимірах в декартовій системі координат, центрованої у верхній частині заготовки. У міру полірування скла буде відбуватися значне погіршення якості інструменту, і цей пристрій буде враховувати це погіршення для того, щоб прикладати постійний тиск. Таким чином, площа контакту матиме круглу форму, яка матиме розподіл тиску за типом Герца.

Тепер автор посилається на підхід Рея до моделювання зносу, тобто пов'язує енергію, розсіяну в матеріалі, з об'ємом сміття, що видаляється. У цьому випадку формула записується в диференціальній формі для

визначення швидкості втрати об'єму щодо часу. Для цього в рівняння 1.8 вводяться швидкість ковзання і тиск:

$$dV = A \cdot K_R \cdot P \cdot v \cdot dt, \quad (1.8)$$

де dV – зміна об'єму, A – площа контакту, P – тиск, прикладений до площі контакту, v – швидкість ковзання, dt – зміна в часі. Тепер ця функція може бути інтегрована для визначення об'єму, втраченого за весь експеримент наступним чином

$$\frac{\Delta V}{A} = \int_0^{\tau} K_R \cdot p \cdot v dt; \quad (1.9)$$

$$\frac{\Delta V}{A} = K_R \cdot v \cdot \int_0^{\tau} p dt. \quad (1.10)$$

У рівнянні 1.10 швидкість інструменту вважається постійною, як і коефіцієнт зносу; отже, тиск буде інтегровано щодо часу, протягом якого він застосовується. У випадку рівняння 1.9 швидкість інструменту не вважається постійною, як і коефіцієнт швидкості. Термін у лівій частині цього рівняння – це сукупна фрикційна робота, що застосовується. Якщо цей термін інтегрований щодо локального розподілу тиску, то робота тертя може бути описана як функція параметрів експерименту, як показано нижче:

$$\int_0^{\tau} K_R \cdot p \cdot v dt = K_R \cdot \frac{4 \cdot v_{tr}}{3 \cdot v_{av}} \cdot E_{eq} \sqrt{R_{eq}} \cdot \frac{\Delta^{1.5}}{p_a}, \quad (1.11)$$

де v_{tr} – тангенціальна швидкість інструменту, v_{av} – швидкість подачі інструменту, E_{eq} – еквівалентний модуль пружності, R_{eq} – еквівалентний радіус кривизни, p_a – крок подачі. Рівняння 1.11 є функція конкретних технологічних параметрів, які є напівемпіричним дослідженням процесу зношування. Він починається на чисто теоретичній основі і продовжує інтегрувати конкретні технологічні та експериментально отримані змінні, щоб пов'язати роботу тертя, виконану з результуючими параметрами зносу. У автора виявлено хорошу кореляцію з роботами, виконаними іншими авторами в області полірування/зносу.

1.3 Аналіз впливу електричного струму на знос електричних контактних пар ковзання

Аналіз існуючих фізичних методів і принципів комутації низьковольтних ланцюгів дає підстави вважати, що фундаментальним внеском у розвиток теорії фізичних процесів електричного зносу є роботи вчених О. Б. Брона, К. К. Намітокова, В. Т. Омельченко, Р. С. Кузнєцова, Г. А. Буткевича, І. С. Таєва, В. І. Раховського та ін. [13], [36], [37].

Комутуючі електричні контакти можна класифікувати по потужності розмикання, струму і напрузі, які визначають характер їх електричного зносу. За основу класифікації прийнято брати величину струму комутації. За струмом контакти прийнято поділяти на слабкострумові (до 10 А) середньострумові (від 10 А до 1 кА) сильнострумові (вище 1 кА) [38].

Факторами, що впливають на процес зносу електричних контактів під дією електричного струму є [39]:

- 1) геометрія контактів;
- 2) швидкість замикання-розмикання електричних апаратів;
- 3) фізико-хімічні особливості матеріалу контактів;
- 4) параметри і засоби гасіння електричної дуги;
- 5) електричні параметри комутованих ланцюгів;
- 6) параметри навколишнього середовища.

Основним фактором впливу на процес зносу електричних контактів під дією електричного струму є електрична ерозія [40]. Класифікаційна схема електричної ерозії наведена на рис. 1.5.

Зношування слабкострумових контактів відбувається за рахунок місткової ерозії матеріалу контактів в короткій дузі.

Причини зносу металевих контактів в умовах бездугової комутації на основі фізичних уявлень вказані в роботі [12]. У ній також було відзначено, що протікання електричного струму між двома замкнутими контактами відбувається не по всій поверхні контакту, а лише в окремих ділянках (опорних плямах). У роботі експериментально встановлено, що рідкі

контактні містки служать джерелом ерозії поверхні контактів при відсутності дугового розряду, і введено поняття «тонкого» перенесення, тобто, чисто місткового, що не залежить від форми контактів, на відміну від грубого — дугового перенесення. За традицією, що склалася весь спостережуваний знос комутуючих контактів прийнято розділяти на електричний і механічний.



Рисунок 1.5 – Класифікаційна схема електричної ерозії [13]

Незважаючи на значні успіхи в області вивчення фізики процесів і механізму електричного зносу, ще не досягнуто єдиної думки з багатьох спірних питань. Це перш за все пояснюється великими труднощами експериментального характеру, що мають місце при визначенні таких важливих характеристик електричної дуги, як щільність струму на контактах, температура і напруженість поля в різних частинах розряду, співвідношення електронної та іонної складової струму та ін., що призвело до появи численних теорій і гіпотез. В даний час загально визнаною є теплова теорія ерозії контактів на основі теплофізичних уявлень [12], [13], [26] [37] і електроіскрового способу обробки металів [41].

Відомо [12], що всякий раз, коли величина струму в колі і напруга на дуговому проміжку перевершують свої мінімальні значення, слідом за вибухом рідкого металевого містка між контактами формується спочатку коротка, а потім плазмова дуга.

Діаграма поділу мостикової і дугової стадій ерозії схематично представлена на рис. 1.6 [13].

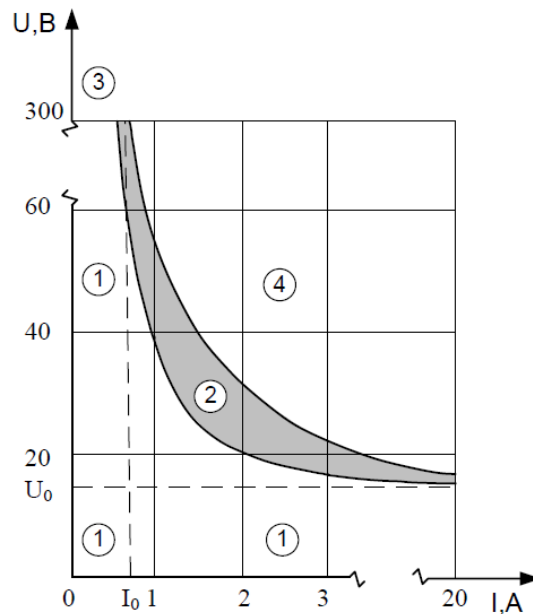


Рисунок 1.6 – U – I діаграма поділу мостикової і дугової стадій ерозії контактів [13]

В області 1 ($U < U_0$ при всіх значеннях I , а також $I < I_0$ при $U < 300$ В) явища газового розряду відсутні. В цьому випадку структурні порушення контактної поверхні з'являються в результаті мостикового перенесення матеріалу.

При збільшенні напруги в ланцюзі до значень $U > U_0$ при струмі $I > I_0$ відбувається перехід розряду спочатку до нестационарної (область 2), а потім до стаціонарної дуги розмикання (область 4) [13]. Мінімальний струм дуги I_0 (струм зрізу) для різних металів лежить в межах 0,5–10 А [13]. Забруднення поверхні контактів (окислення), як правило, веде до зменшення мінімальних значень струму і напруги дуги [13].

Містки можуть виникати як при замиканні, так і при розмиканні контактів. Якщо швидкість замикання контактів досить велика і при цьому відсутня вібрація, то мосткове перенесення при замиканні контактів відсутнє [42], причому мосткова ерозія на контактах, які розмикаються на кілька порядків більша, ніж на тих, що замикаються [13]. Істотний внесок у

вивчення місткової ерозії при розмиканні електричних контактів слабкострумових ланцюгів внесли роботи [38], [43] сильнострумових ланцюгів – [12], [44], [45]. Відомо, що жодна з існуючих теорій не в змозі досить повно і не суперечливо описати фізичні процеси і механізм місткової ерозії [46]. Так, останнім часом велися спроби створення нової теорії, здатної дати більш-менш повний математичний аналіз процесів, що відбуваються при розмиканні контактів. Така теорія, названа тепловою, викладена в роботі В. Т. Омельченка [43]. На основі даної теорії розроблені рекомендації для необхідного вибору як однорідних, так і різнорідних контактних матеріалів, які забезпечують підвищену зносостійкість і надійність роботи електричних низьковольтних апаратів.

При розмиканні контактів їх перехідний опір зростає досить швидко, так що зміни струму навантаження практично не відбувається [47]. Внаслідок цього зростає падіння напруги, збільшуються потужність джоулевих втрат і температура майданчика торкання, в результаті деякі ділянки контактних поверхонь розплавляються, а подальше переміщення рухомого контакту призводить до появи містка розплавленого металу. Механічні розтягуючі зусилля, нагрів містка до температури кипіння, електродинамічні сили відштовхування сприяють розриву містка. При відповідних умовах після розриву містка можуть виникнути різні форми електричного розряду для середньострумових і сильнострумових ланцюгів. Якщо струм і напруга перевищують деякі мінімально необхідні значення (рис. 1.6), то між контактами з'являється дуговий розряд (для мідних контактів ці значення становлять відповідно 0,43 А і 13 В) [48].

Залежно від умов експлуатації комутуючі контакти виходять з ладу з таких причин, як ерозія (місткове перенесення) [47], електричний і механічний знос (втрата маси, зміна форми і розмірів контакт-деталей), хімічний знос (корозія – головним чином окислення), зварювання (втрата здатності до розмикання) і відрив контактів (контакт-деталей) від контактотримачів [41].

Одним з видів електричної ерозії є місткова ерозія, що викликає спрямоване перенесення металу від одного контакту до іншого (зазвичай від анода до катода) [47]. Цей вид ерозії кількісно малий, але небезпечний, так як викликає утворення голок і глибоких кратерів. При цьому характерні відмови контактів через "заклинювання": виникаючі голки не дозволяють контактам або замкнутися, або розімкнутися.

1.4 Показники оцінки зносу слабкострумівих електричних контактних пар ковзання

Процес поступової зміни розмірів тіла при терті, що виявляється у відділенні з поверхні тертя матеріалу і (або) залишкової деформації, отримав назву зношування [8]. Результат же зношування, що виявляється у вигляді відділення матеріалу або в його залишковій деформації, отримав назву знос. Продуктами процесу зношування є частинки зносу, що відокремилися з поверхонь, що труться у вигляді полідисперсного матеріалу і матеріалу тіл, що труться, пластично відтісненого із зони тертя [49].

У сучасній літературі про тертя і зношування користуються абсолютними і відносними одиницями зносу [32], [50], [51].

До абсолютних одиниць зносу відносяться наступні параметри:

- а) висота зносу H ;
- б) площа поперечного перерізу зносу Q ;
- в) об'єм зношеного матеріалу $V = Q \cdot L$, де L – довжина шляху контактування [52];

г) вага зношеного матеріалу $\omega = \gamma \cdot V$, де γ – питома вага матеріалу.

Під відносним зносом розуміють знос на одиницю довжини шляху контактування L [52] або на одиницю енергії сил тертя $W = F \cdot L$, де F – сила тертя.

При цьому отримаємо [51]:

- а) відносний знос по висоті:

$$I_h = \frac{V}{L \cdot A_a} = \frac{H}{L}, \quad (1.12)$$

де A_a – номінальна площа контактування (по периметру);

б) відносний ваговий знос:

$$I_g = \frac{\omega}{L \cdot A_a} = \gamma \cdot I_h, \quad (1.13)$$

в) енергетична інтенсивність зносу:

$$I_w = \frac{V}{W} = \frac{I_h \cdot A_a}{F}. \quad (1.14)$$

Розрізняють і такі питомі характеристики зносу, як знос на одиницю фактичної площі торкання A_r при переміщенні на відстань діаметра плями торкання α , при цьому між відносними і питомими параметрами зносу зберігаються наступні залежності:

$$I_h = i_h \cdot \frac{A_r}{A_a}, \quad (1.15)$$

$$\text{де } i_h = \frac{V}{A_r \cdot \alpha} \text{ або } i_h = \frac{i_g}{\gamma}.$$

При знаходженні в контакті двох контактуючих матеріалів розрізняють номінальну (по периметру) A_a , контурну (по виступам) A_r і фактичну A_c площі торкання, для яких справедливі такі співвідношення:

$$\eta_1 = \frac{A_r}{A_c}, \quad (1.16)$$

$$\eta_2 = \frac{A_c}{A_a}, \quad (1.17)$$

$$\eta_3 = \frac{A_r}{A_a}, \quad (1.18)$$

$$\eta_3 = \eta_1 \cdot \eta_2. \quad (1.19)$$

За питомими характеристиками зносу можна виявити переважаючий вид зносу [49]:

а) при мікрорізанні $i_h \approx 10^{-1}$;

б) при пластичному відтисненні $i_h = 10^{-3} \div 10^{-4}$;

в) при пружному відтисненні $i_h = 10^{-6} \div 10^{-7}$;

Розрізняють також похідні зносу за часом: швидкість зносу $\frac{d\omega}{dt}$ і прискорення зносу $\frac{d^2\omega}{dt^2}$.

Порівняно велика кількість критеріїв оцінки зносу пояснюється:

1) для абсолютних одиниць вимірювання в конкретних умовах роботи контактної пари (для "сухих" електричних контактних пар – лінійні вимірювання; електричних контактних пар з мастилом – вагові);

2) для відносних одиниць – необхідністю порівняння зносу ідентичних електричних контактних пар.

1.5 Загальні відомості про інформаційні технології моделювання зносостійкості обладнання

Основним завданням при застосуванні інформаційних технологій (ІТ) в промисловості є оптимізація виробничих процесів для скорочення витрат. Одним з шляхів оптимізації є скорочення витрат на технічне обслуговування і ремонт основного виробничого обладнання [53]. Такі технології, як Predictive Maintenance (прогнозне обслуговування), вже добре зарекомендували себе в багатьох сферах і дозволяють знизити простой, збільшити продуктивність обладнання і оптимізувати собівартість виробництва [54].

Довговічність електричних контактів залежить від багатьох факторів, в тому числі, конструкції, виробництва, умов експлуатації та дотримання правил безпеки. Схематично загальна працездатність і ресурс контакту можуть бути описані кривою, представленою на рис. 1.7 [3].

Як видно з графіка, ймовірність відмов висока в початковий період роботи, коли відбувається приробіток контакту. Потім ймовірність відмов знижується і тривалий час залишається стабільною, відповідаючи

нормальному режиму роботи, а потім знову різко зростає при настанні режиму зношування. Термін служби електричних контактів визначається їх конструкцією, технологією виготовлення та умовами експлуатації.



Рисунок 1.7 – Ймовірність відмови $Y(t)$ у функції часу

Надійність може бути визначена як ймовірність безвідмовної роботи протягом терміну служби в заданих умовах

$$R(t) = 1 - F(t) = e^{-\lambda t}, \quad (1.20)$$

де λ – інтенсивність відмов, а t – час роботи. Функція $F(t)$ називається ймовірністю відмов і визначається як

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}. \quad (1.21)$$

Функція щільності ймовірності в припущенні часу до відмови, як випадкової величини дорівнює

$$f(t) = \frac{dR(t)}{dt}, \quad (1.22)$$

Точна оцінка терміну служби важлива для підвищення надійності та оптимізації необхідних для цього витрат. Ця оцінка використовується при призначенні ремонтів і заміні компонентів при планових зупинках, дозволяючи уникнути непередбачених і дорогих відмов [55]. Ключем до

підвищення надійності електричних контактів є можливість аналізу зносостійкості для прогнозування їх ресурсу.

Інформаційні технології моделювання зносостійкості виробничого обладнання, одним з компонентів якого є ковзні електричні контакти, застосовуються в комп'ютеризованих системах управління технічним обслуговуванням та при проектуванні нових екземплярів обладнання.

Комп'ютеризована система управління технічним обслуговуванням — сукупність програмного забезпечення, до складу якого входить база даних обладнання організації, модулі планування виконання технічного обслуговування і планово-попереджувального ремонту, складання заявок на виконання ремонту, компоненти складського обліку і заявок на закупівлю матеріалів [55], [56].

Дана система визначає графік обслуговування основного обладнання. Ці системи орієнтовані на зменшення витрат на ремонт обладнання та збільшення продуктивності [55].

ЕАМ (Enterprise Asset Management) — це система управління активами підприємства, спеціалізоване програмне забезпечення (ПЗ) для управління бізнес-процесами. В якості компоненти програмного ERP рішення, ЕАМ система забезпечує автоматизоване управління основними фондами, дозволяє враховувати і ефективно утримувати в робочому стані виробничі активи підприємства, розподіляти і контролювати діяльність персоналу, пов'язаного з управлінням активами організації [57].

Функціональне наповнення системи охоплює повний цикл операцій з управління активами підприємства, включаючи фінансову, довідкову та звітну інформацію. Рішення ЕАМ входить до складу модульного програмного комплексу ERP [56].

Результати впровадження системи ЕАМ:

- скорочення витрат на технічне обслуговування та ремонт зі збереженням рівня надійності обладнання;
- продовження життєвого циклу обладнання;

- зручне і прозоре управління активами організації.

ЕАМ система використовується:

- у виробничих і ремонтних підрозділах;
- в сервісних компаніях;
- фахівцями наступного профілю: інженери контрольно-вимірювальних приладів і автоматизації (КВПіА) (в тому числі з ремонту АСУ ТП), механіки, технологи, техніки, енергетики, метрологи, постачальники, економісти, бухгалтери [57].

Функціональні можливості системи ERP ЕАМ:

- облік виробничих активів підприємства;
- моніторинг технічного стану обладнання.

Облік виробничих активів підприємства:

- облік обладнання та інструментів;
- управління ремонтним персоналом;
- звіти по ТОіР;
- довідники з управління основними фондами.

Моніторинг технічного стану обладнання:

- облік і планування витрат по ТОіР;
- планування ремонту обладнання;
- сховище ремонтної документації;
- управління сервісним обслуговуванням обладнання;

Застосування ЕАМ-систем допомагає скоротити витрати, пов'язані з ремонтом і обслуговуванням обладнання, що істотно позначиться на безперебійному випуску продукції, зниженні незапланованих простоїв обладнання і в кінцевому підсумку допоможе знизити собівартість продукції, а значить і збільшити кінцевий прибуток підприємства [56].

Інформаційна система управління процесами експлуатації виробничих фондів підприємства, такими як оперативна експлуатація та диспетчеризація, технічне обслуговування і ремонт (ТОіР), матеріально-технічне та фінансове забезпечення ТОіР, управління ремонтним персоналом, документаційне

забезпечення ТОiP, управління складськими запасами, взаємодія з філіями та сервісними організаціями [56] підтримує вирішення стратегічних завдань підприємства — підвищення ефективності виробничих фондів (фондовіддачі) і персоналу, оптимізація витрат на експлуатацію при мінімумі ризиків і необхідної продуктивності, підвищення надійності, раціональне використання технічного ресурсу і т. д. [55].

Аналіз сучасних інформаційних систем (IC) технічного обслуговування та ремонту обладнання IT-Enterprise EAM, CMMS & EAM system Champs, Seascope, NERPA EAM, Галактика EAM, Ellipse EAM, SAP Predictive Maintenance and Service, Global-EAM, Infor EAM, IBM Maximo, Oracle EAM, IFS EAM, SAP AIN показує, що подібні системи (рис. 1.8) зазвичай отримують інформацію про технічний стан обладнання від відповідних датчиків та опрацьовують її за спрощеними алгоритмами, що не завжди дозволяє попередити відмову обладнання [58].

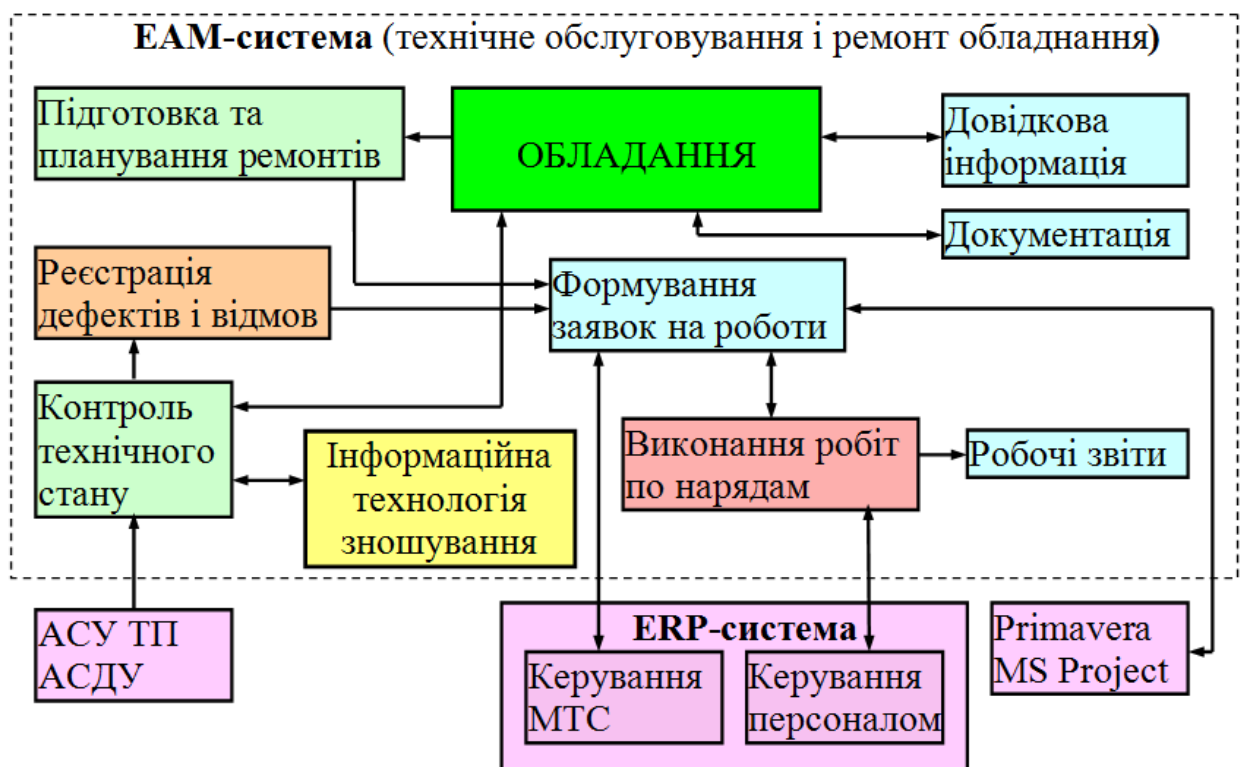


Рисунок 1.8 – ЕАМ-система та інформаційна технологія моделювання процесів зносостійкості

Одним з найбільш ефективних підходів до підвищення надійності роботи промислового обладнання є попереджувальні ремонти на підставі обробки апріорної інформації з використанням сучасних інформаційних технологій моделювання зносостійкості [59], [60].

Більшу частину обсягу ТОіР становлять профілактичні роботи, які забезпечують якісну роботу обладнання за рахунок попередження пошкоджень складальних одиниць і агрегатів та підтримки їх технічних характеристик в межах встановлених допусків [59].

Ремонт здійснюється в разі відмови обладнання і призначений для приведення його до працездатного стану та відновлення ресурсу.

На рис. 1.9 наведено класифікацію видів ремонту.

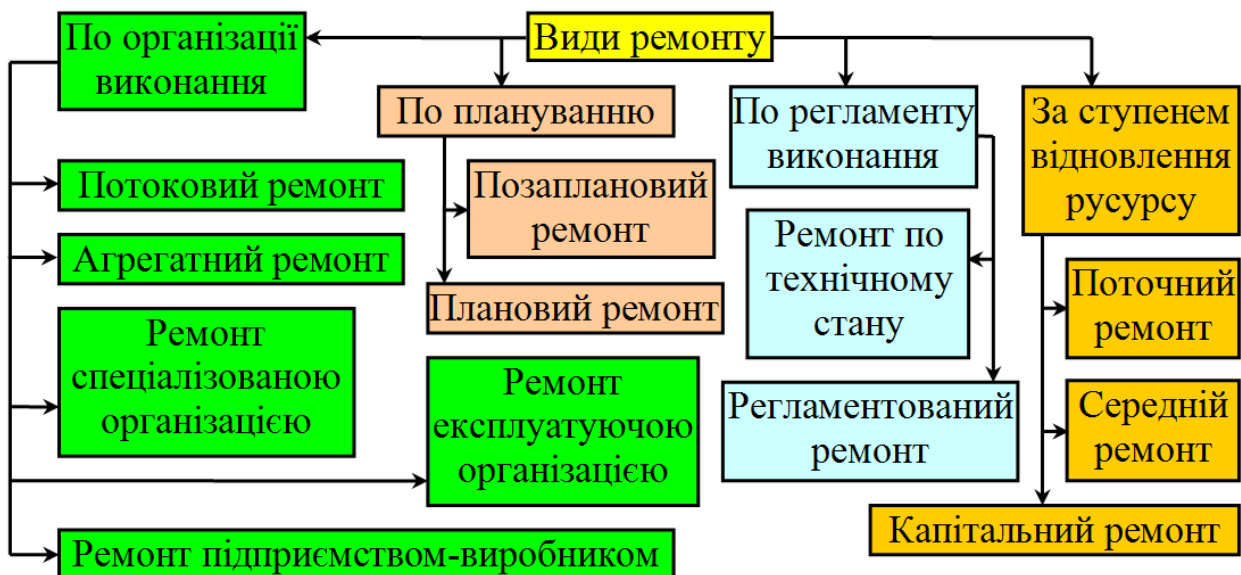


Рисунок 1.9 – Види ремонту обладнання

ТОіР обладнання за напрацюванням

Для більшості видів техніки, переважно застосовується стратегія ТОіР, заснована на обов'язковому плануванні їх термінів, обсягів, підготовки і виконання, тобто планово-попереджувальних ремонтів (ППР) [59], [60].

Операції системи ТОіР зазвичай складаються з двох складових частин: контрольної та виконавчої. Планово-попереджувальний характер системи ТОіР визначає планове і примусове (через встановлене напрацювання або проміжок часу) виконання контрольної частини операцій і подальше

виконання за потребою виконавчої частини. Частина операцій ТОіР (наприклад, мастильні операції) виконуються в плановому порядку без попереднього контролю [60].

Оптимальну структуру ремонтного циклу вибирають з використанням різних критеріїв: закономірностей зміни і гранично допустимих значень параметрів технічного стану машин, їх складальних одиниць і деталей, максимальної продуктивності машин, допустимого рівня ймовірності безвідмовної роботи, мінімальних питомих сумарних витрат на ТОіР [60].

Для оцінки ремонтних особливостей обладнання в якості еквівалента прийнятий умовний вид обладнання, трудомісткість ремонту якого становить 10 людино-годин ця трудомісткість прийнята за одиницю складності ремонту.

ТОіР обладнання за фактичним технічним станом

Стратегія ТОіР за фактичним технічним станом являє собою сукупність правил щодо визначення режимів і регламенту діагностування обладнання та визначення необхідності його ремонту відповідно до фактичного технічного стану обладнання.

При даній стратегії ТОіР обладнання експлуатується до передвідмовного стану, тобто максимально можливого його напрацювання до заміни і мінімально можливих витрат на ТОіР [53].

Стратегія ТОіР за технічним станом об'єкта в свою чергу поділяється на дві стратегії: ТОіР з контролем параметрів обладнання; ТОіР з контролем рівня надійності обладнання.

Реалізація стратегії ТОіР за технічним станом з контролем параметрів потребує визначення різниці між попереджувальними допусками $\Delta L = L_2 - L_1$ на кожен з контрольованих параметрів системи (рис. 1.10) і періодичністю їх перевірок $\Delta t = t_2 - t_1$. Очевидно, що при заданому випадковому процесі $Y(t)$, граничному рівні L_2 і допустимій ймовірності відмови $Q_{дон}$ кожному фіксованому значенню попереджувального допуску ΔL відповідає конкретне значення періодичності перевірок Δt . При цьому чим більші ці значення, тим

менше витрати на перевірки (перевірки рідше) і більше витрат на заміну і ремонт (частіше заміни), і навпаки. Оптимальний варіант вибирають з умови забезпечення мінімальних сумарних витрат на перевірку, заміну і ремонт об'єкта. Для кожного об'єкта знаходять функції виду $c = f(\Delta t)$, які використовують при вирішенні завдання угруповання операцій ТО (в тому числі і операцій діагностування) в оптимальні форми технологічного регламенту для обладнання в цілому [59].

Область застосування стратегії ТОіР станом з контролем параметрів — дорогі системи з високою функціональною значимістю, що мають недостатню ступінь резервування (в тому числі і кратність резервування), і разом з тим володіють високим рівнем експлуатаційної технологічності і контролепридатності.

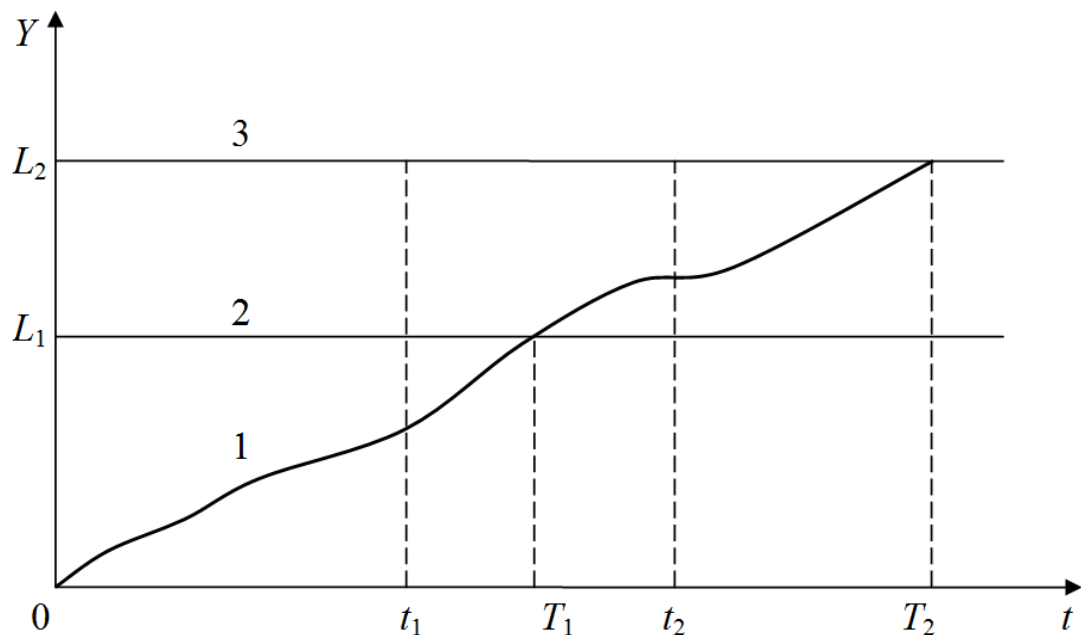


Рисунок 1.10 – Зміна в часі параметра технічного стану системи: 1, 2, 3 – області справного, несправного працездатного і непрацездатного станів відповідно; t_1 і t_2 – відповідно моменти першої і другої перевірок системи; T_1 і T_2 – відповідно моменти перетину реалізацією випадкового процесу $Y(t)$ рівнів L_1 і L_2 [59]

В якості вихідної інформації в даній стратегії використовуються наступні відомості: число однотипних об'єктів в технологічних системах; вид

відмови; місце прояву; причина прояву; наслідки; число відмов, виявлених за контрольний період часу; напрацювання сукупності однотипних об'єктів за контрольний період часу; вартість заміни об'єкта; вартість технічного обслуговування і ремонту.

Для обробки вихідної інформації використовуються відомі методи математичної статистики.

У зв'язку з тим, що ресурси і умови експлуатації деталей, складальних одиниць, агрегатів обладнання відрізняються один від одного, при будь-якій стратегії ТОіР вводиться система ремонтів (поточний, середній, капітальний).

В системі ППР види ремонту здійснюються в певній послідовності, а при ТОіР за технічним станом — в залежності від результатів діагностування.

Прогнозування технічного стану обладнання дозволяє планувати чергові та позачергові ремонти, списання з експлуатації та заміну об'єкта.

Технічна діагностика обладнання (ТДО) – елемент системи планово-попереджувальних ремонтів (ППР), що дозволяє вивчати і встановлювати ознаки несправності обладнання [60].

Нормативи трудовитрат (у людино-годинах на одиницю виміру) на проведення випробувань енергетичного обладнання наведені в табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Нормативи трудовитрат на проведення вимірювання перехідних опорів постійному струму контактів апаратів і шин розподільних пристроїв [60].

Види контактів апаратів і шин розподільних пристроїв	Одиниця вимірювання	Трудовитрати, люд. год. на одиницю вимірювання
Закриті	На 10 контактів	5,5
Відкриті	На 10 контактів	9,5

Як показує досвід, найбільш ефективно використання переваг ТДО досягається тоді, коли на підприємстві функціонує спеціальне інформаційне забезпечення діагностики обладнання з використанням комп'ютерної техніки.

Прогноз ресурсу контактів — це математичне представлення механізму відмов, з урахуванням дії експлуатаційних факторів. Однак багатофакторність впливів на даний механізм завжди вносить невизначеність в прогностичні моделі [61].

Висновки по розділу 1

Проведено аналіз процесів які впливають на зносостійкість електричних контактів. В результаті дослідження 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.

В результаті дослідження з'ясовано, що 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. Таким чином визначення ступеня зносу електричних контактів електро-механічного обладнання та окремих його складових можна здійснити математичним моделюванням механічних процесів зносостійкості з використанням інженерної моделі зносу на основі енергетичних параметрів.

В результаті дослідження з'ясовано, що основним фактором, який впливає на знос слабкострумових електричних контактів є місткова ерозія. Таким чином визначення ступеня зносу електричних контактів електро-механічного обладнання та окремих його складових можна здійснити математичним моделюванням механічних процесів зносостійкості з урахуванням струмового зносу.

В результаті дослідження з'ясовано, що основними показниками для оцінки ступеня зносу є об'єм або маса матеріалу втраченого (перенесеного) в результаті контактування, глибина або ширина контактного сліду який з'явився в результаті контактування, площа поперечного перерізу зони контактування. Враховуючи, що основним фактором який впливає на якість проходження струму для електричних контактів є фактична площа контактування, яка залежить від геометрії контактів, найбільш прийнятним показником для визначення ступеня зносу електричних контактів електро-

механічного обладнання та окремих його складових можна вважати глибину або ширину контактного сліду який з'явився в результаті контактування.

Проведено аналіз інформаційно-керуючої структури виробничого підприємства та її основних ІС. В процесі аналізу з'ясовано, що автоматизацію функції ТОіР виконують ЕАМ-системи. При більш детальному дослідженні ЕАМ-систем виявилось, що основна їх функція полягає в автоматизації процесів документообігу та планування ТОіР на основі паспортних даних обладнання, моніторингу режимів його роботи за допомогою датчиків, та оптимізації ППР з використанням статистичної обробки даних про аварійні ситуації та виконані ремонтні роботи. В результаті проведеного аналізу зроблено висновок про необхідність створення нової ІС для прогнозування технічного стану обладнання з використанням математичного моделювання процесів зносостійкості для розширення можливостей наявних ІС, підвищення ефективності ППР і зниження витрат на обслуговування обладнання.

Проведено аналіз процесу ТОіР основного виробничого обладнання підприємств в результаті якого з'ясовано, що найбільш надійним способом обслуговування обладнання є попереджувальний ремонт. Для здійснення попереджувального ремонту в сучасних умовах необхідно визначення ступеня зносу обладнання та окремих його складових, що можливо здійснити використовуючи паспортні дані обладнання з поступовим уточненням їх в процесі експлуатації обладнання на основі статистичних методів. Основною перевагою такого підходу є підвищення надійності обладнання і зменшення кількості аварійних зупинок обладнання, що призводять до підвищення кількості виробленої продукції і, як наслідок, прибутку підприємства. Недоліком такого підходу можна вважати високу вартість обслуговування обладнання (висока ймовірність передчасної заміни обладнання, яке ще не виробило свій ресурс), велику кількість планових зупинок обладнання, що призводить до зниження кількості виробленої продукції і фінансовим витратам. Збалансувати всі переваги і недоліки ППР в реальних умовах

виробництва достатньо складно, тому більш сучасним підходом до ТОіР є ремонт обладнання за технічним станом. Такий підхід вимагає встановлення спеціальних "аварійних" датчиків для постійного контролю обладнання та прогнозування технічного стану з використанням математичного моделювання статистично-ймовірнісними методами. Початкова вартість такого підходу значно перевищує вартість ППР, тому область застосування стратегії ТОіР з контролем параметрів рекомендовано обмежувати обладнанням, відмова якого призведе до зупинки всієї технологічної системи або небезпечної аварійної ситуації. З іншого боку, оперативний контроль технічного стану може забезпечити високу безвідмовність і запобігати раптовим відмовам, тому, в результаті проведеного аналізу зроблено висновок про необхідність створення нової інформаційної технології, яка поєднує переваги обох підходів. Для розширення можливостей наявних ІС, підвищення ефективності ППР 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 на потребує встановлення додаткових датчиків для напрацювання статистичної інформації.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИ МОДЕЛЮВАННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ СЛАБКОСТРУМОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ КОНТАКТНИХ ПАР КОВЗАННЯ

2.1 Метод моделювання та оцінки механічного зносу слабкострумів електричних контактних пар ковзання

Фізичні явища, що виникають в електричних контактних парах відносяться до недостатньо вивчених багатофакторних процесів. Для дослідження таких процесів останнім часом широко використовується метод ідентифікації, що дозволяє поєднувати наявну неповну гносеологічну і отриману дослідним шляхом стохастичну інформації [62].

Для оцінки зносу електричних контактних пар ковзання було використано інженерну модель. Відомо [63], [64] що об'єм V зношеного матеріалу залежить від величини витраченої на один перехід (цикл) енергії W і числа циклів N напрацювання ресурсу, тобто: $V = f(W, N)$. У цьому випадку диференціальне рівняння зносу виражається:

$$dV = \frac{\partial V}{\partial W} dW + \frac{\partial V}{\partial N} dN. \quad (2.1)$$

Якщо площа поперечного перерізу Q сліду зносу за довжиною контактування l не змінюється, тобто $V \sim Q$, де \sim – знак пропорційності, то можна записати:

$$dQ = \frac{\partial Q}{\partial W} dW + \frac{\partial Q}{\partial N} dN. \quad (2.1a)$$

Наведені рівняння використовуються для аналізу роботи електричних контактних пар, що працюють з мастилом, для яких характерне змінне значення енергії на кожному переході $W = \text{var}$. Для "сухих" електричних контактних пар знос в сталому режимі характеризується постійністю енергії на кожному переході $W = \text{const}$.

У цьому випадку диференціальні рівняння спрощуються:

$$dV = \frac{\partial V}{\partial N} dN; \quad (2.2)$$

$$dQ = \frac{\partial Q}{\partial N} dN. \quad (2.2a)$$

Звідси випливає, що при $l_u \cdot W = \text{const}$ $V \sim W \cdot N$ або $Q \sim W \cdot N$.

Витрачена в процесі тертя і зносу механічна енергія одного переходу залежить від значення максимальних дотичних напруг τ або контактного тиску P_κ і довжини шляху переходу l , тобто $W = f_1(\tau, l)$ або $W = f_2(P_\kappa, l)$.

Залежно від величини дотичних напружень і стану поверхонь сполучених тіл в місці контактування можуть проявлятися всі три види деформаційних процесів: пружне відтиснення, зняття і мікрорізання за рахунок частинок зносу.

При пружному контактуванні знос відбувається за рахунок тривалої фрикційної втоми, а при пластичній деформації за рахунок сил зминання і малоциклічної фрикційної втоми, тому об'єми зносу будуть в обох випадках пропорційні енергії тертя W_f , але з різними значеннями коефіцієнтів пропорційності.

Об'єм зношеного при мікрорізанні матеріалу буде пропорційний енергії сил зрізу W_s .

Виходячи з енергій переходу при терті W_f і зрізі W_s стосовно до роботи приладів були розглянуті наступні типові електричні контактні пари ковзання:

- а) площина-сфера;
- б) циліндр-сфера;

При цьому далі розглядається знос площини і циліндра з однорідною структурою (відсутність наклепу) спочатку для ідеалізованого випадку, коли сферичний контакт не зношується, а потім для реальних електричних контактних пар, коли зношуються обидва контакти, включаючи сферичний.

Приймається, що інші фактори які впливають на знос в процесі досліджень залишаються незмінними.

2.1.1 Знос плоскої ламелі при роботі зі сферичним контактом

Для визначення закономірності зносу електричної контактної пари площина-сфера в загальному випадку при $W = \text{var}$ в рівняння (2.1), а при $W = \text{const}$ у рівняння (2.2a) необхідно підставити відповідні похідні і провести їх інтегрування [65].

Вирішення поставленого завдання доцільно почати з "сухих" електричних контактних пар (випадок $W = \text{const}$).

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. 2.1 при постійному значенні довжини переходу l поперечний переріз сліду зносу Q при $H \ll R$ визначиться з рівнянь [65]:

$$Q = \frac{1}{2} \cdot H \cdot T; \quad (2.3)$$

$$H = \frac{T^2}{8 \cdot R}. \quad (2.4)$$

Після підстановки (2.4) в (2.3) і диференціювання, отримаємо:

$$Q = \frac{T^3}{16 \cdot R} = C_Q \cdot T^3; \quad (2.5)$$

$$dQ = \frac{3 \cdot T^2}{16 \cdot R} dT = 3C_Q \cdot T^2 dT. \quad (2.6)$$

Елементарні енергії на одному переході для сил тертя W_f і сил зрізу W_s можна виразити [65]:

$$dW_f = K_f \cdot P_\kappa dl; \quad (2.7)$$

$$dW_s = \tau_s \cdot dQ_1 dl, \quad (2.8)$$

де τ_s – межа плинності на зріз;

K_f – коефіцієнт тертя;

Q_1 – поперечний переріз сліду на одному переході.

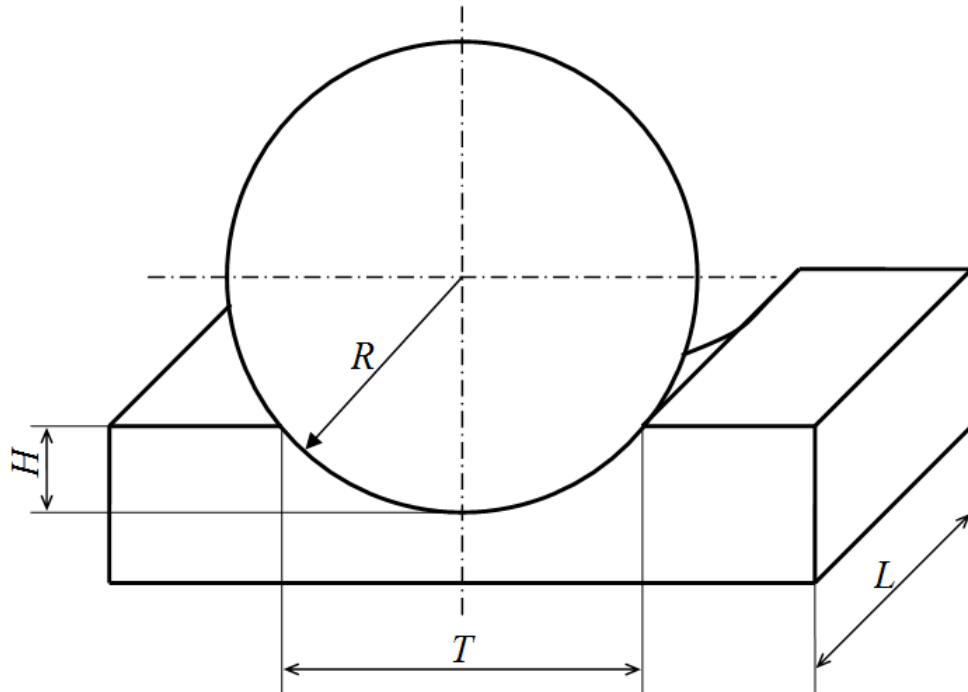


Рисунок 2.1 – Слід зносу пари площина-сфера при незмінному радіусі сфери R

Після інтегрування на довжині контактування l з урахуванням N переходів, отримаємо значення сумарної механічної енергії, витраченої на знос:

$$W_{f\Sigma} = K_f \cdot P_k \cdot l \cdot N;$$

$$W_{s\Sigma} = \tau \cdot \frac{T_1^3}{16 \cdot R} \cdot l \cdot N,$$

де K_f – коефіцієнт тертя;

P_k – контактний тиск;

N – число переходів;

τ – напруга зрізу;

$\frac{T_1^3}{16 \cdot R} = Q_1$ – площа перетину зносу за один перехід.

Відповідно до формули Герца [66], [67], [68] для випадку пружного контактування пари площина-сфера розмір плями контактування $T_1 \sim \tau \sim P_k^{\frac{1}{3}}$,

тоді енергія сил тертя $W_{f\Sigma}$ і зрізу $W_{s\Sigma}$ на одиницю довжини шляху виразиться:

$$W_{f\Sigma} \sim \tau^3 \cdot N \sim P_{\kappa} \cdot N,$$

$$W_{s\Sigma} \sim \tau^4 \cdot N \sim P_{\kappa}^{\frac{4}{3}} \cdot N.$$

Так як при постійному значенні енергії в процесі зносу W_1 контактний тиск P_{κ} і внутрішнє напруження τ повинні залишатися незмінними, то, прийнявши $W \sim Q \sim T^3$, отримаємо наступні рівняння зносу [65]:

$$T_f \sim \tau \cdot N^{\frac{1}{3}} \sim P_{\kappa}^{\frac{1}{3}} \cdot N^{\frac{1}{3}}; \quad (2.9)$$

$$T_s \sim \tau^{\frac{4}{3}} \cdot N^{\frac{1}{3}} \sim P_{\kappa}^{\frac{4}{3}} \cdot N^{\frac{1}{3}}. \quad (2.10)$$

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 [69].

Якщо прийняти рівномірними дії сил тертя і зрізу, то можна записати

$$Q = K_Q \cdot \tau^{\frac{7}{2}} \cdot N, \quad (2.11)$$

звідки

$$T_s \sim \tau^{\frac{7}{6}} \cdot N^{\frac{1}{3}} \sim P_{\kappa}^{\frac{7}{18}} \cdot N^{\frac{1}{3}}. \quad (2.12)$$

Якщо виходити з емпіричної інженерної моделі зносу [63], то прийнявши

$$Q \sim (\tau \cdot l)^{\frac{9}{2}} \cdot N,$$

одержимо

$$T \sim \tau^{\frac{3}{2}} \cdot N^{\frac{1}{3}} \sim P_{\kappa}^{\frac{1}{2}} \cdot N^{\frac{1}{3}}. \quad (2.13)$$

Визначення закономірностей зносу при змінному значенні енергії $W = \text{var}$, що характерно для електричних контактних пар тертя з мастилом, може бути зроблено за допомогою рівняння (2.4).

Визначивши з (2.11) частинні похідні

$$\frac{\partial Q}{\partial \tau} = \frac{7}{2} \cdot K_Q \cdot \tau^{\frac{5}{2}} \cdot N \quad \text{и} \quad \frac{\partial Q}{\partial N} = K_Q \cdot \tau^{\frac{7}{2}}$$

і підставивши в (2.10), отримаємо:

$$Q = \frac{7}{2} \cdot K_Q \cdot \tau^{\frac{5}{2}} \cdot N d\tau + K_Q \cdot \tau^{\frac{7}{2}} \cdot dN. \quad (2.14)$$

Функціонал $\tau = f(P_\kappa, T)$ може бути виражений рівнянням

$$\tau = K_\tau \cdot q = \frac{4 \cdot K_\tau \cdot P_\kappa}{\pi \cdot T^2} = K_P \cdot \frac{P_\kappa}{T^2}, \quad (2.15)$$

де q – питомий контактний тиск.

З (2.23) після диференціювання маємо

$$d\tau = -2 \cdot K_P \cdot \frac{P_\kappa}{T^3} dT. \quad (2.16)$$

Підставимо в (2.14) значення (2.6), (2.15) і (2.16):

$$3 \cdot C_Q \cdot T^2 dT = \frac{7}{2} \cdot K_Q \cdot N \cdot \left(\frac{K_P \cdot P_\kappa}{T^2} \right)^{\frac{5}{2}} \cdot \left(-\frac{2 \cdot K_P \cdot P_\kappa}{T^3} \right) dT + K_Q \cdot \left(\frac{K_P \cdot P_\kappa}{T^2} \right)^{\frac{7}{2}} dN.$$

Після перетворення отримаємо:

$$3 \cdot C_Q \cdot T^2 dT = \frac{7}{2} \cdot K_Q \cdot N \cdot \left(-\frac{2 \cdot K_P^{\frac{7}{2}} \cdot P_\kappa^{\frac{7}{2}}}{T^8} \right) dT + K_Q \cdot \left(\frac{K_P \cdot P_\kappa}{T^2} \right)^{\frac{7}{2}} dN.$$

Зробивши інтегрування, маємо:

$$C_Q \cdot T^3 = \frac{K_Q \cdot N \cdot K_P^{\frac{7}{2}} \cdot P_\kappa^{\frac{7}{2}}}{T^7} + \frac{K_Q \cdot N \cdot K_P^{\frac{7}{2}} \cdot P_\kappa^{\frac{7}{2}}}{T^7}. \quad (2.17)$$

З (2.17) випливає, що

$$T^3 \sim \frac{P_\kappa^{\frac{7}{2}} \cdot N}{T^7},$$

або

$$T \sim P_\kappa^{\frac{7}{20}} \cdot N^{\frac{1}{10}}. \quad (2.18)$$

У таблиці 2.1 подані результати розрахунку даної контактної пари для всіх розглянутих режимів зносу.

2.1.2 Знос циліндричного проводу при поперечному русі сферичного контакту

При незмінних геометричних розмірах контакту ($4 \cdot H_{БК} \rightarrow \infty$) об'єм зношеного матеріалу проводу складе (рис.2.2):

$$V \approx \frac{1}{3} \cdot Q_6 \cdot T_a. \quad (2.19)$$

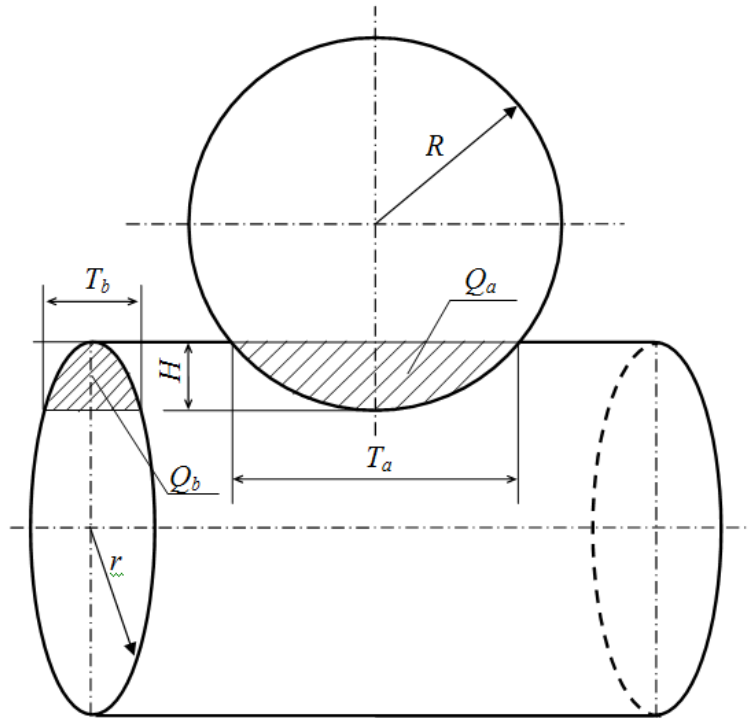


Рисунок 2.2 – Слід зносу пари циліндр-сфера при незмінному радіусі сфери R

Виразимо величину об'єму V через контрольований параметр зносу T_6 .

На підставі співвідношення (2.4) можна записати

$$H = \frac{T_6^2}{8 \cdot r} = \frac{T_a^2}{8 \cdot R},$$

звідси отримаємо:

$$T_a = T_\epsilon \cdot \sqrt{\frac{R}{r}}. \quad (2.20)$$

Після підстановки значень Q_ϵ (2.9) і (2.20) в (2.19), отримаємо:

$$V = \frac{T_\epsilon^4}{48 \cdot r} \cdot \sqrt{\frac{R}{r}} = C_V \cdot T_\epsilon^4 \quad (2.21)$$

і

$$dV = \frac{T_\epsilon^3}{12 \cdot r} \cdot \sqrt{\frac{R}{r}} dT_\epsilon = 4 \cdot C_V \cdot T_\epsilon^3 dT_\epsilon, \quad (2.22)$$

Енергії сил тертя W_f і зрізу W_s при одиничному переході на шляху dT_ϵ дорівнюватимуть [63]:

$$dW_f = K_f \cdot P_\kappa dT_\epsilon, \quad (2.23)$$

$$dW_s = \tau dQ dT_\epsilon. \quad (2.24)$$

Після інтегрування в межах зносу T_ϵ , одного переходу і з урахуванням роботи на N переходах, отримаємо:

$$W_{f\Sigma} = K_f \cdot P_\kappa \cdot T_{\epsilon 1} \cdot N, \quad (2.25)$$

$$W_{s\Sigma} = \frac{\tau \cdot P_\kappa \cdot T_{\epsilon 1}^4 \cdot N}{64 \cdot r} \cdot \sqrt{\frac{R}{r}}. \quad (2.26)$$

Прийнявши $T \sim \tau \sim P_\kappa^{\frac{1}{3}}$ і $W \sim V \sim T^4$, отримаємо

$$W_{f\Sigma} \sim \tau^4 \cdot N \sim P_\kappa^{\frac{4}{3}} \cdot N,$$

$$W_{s\Sigma} \sim \tau^5 \cdot N \sim P_\kappa^{\frac{5}{3}} \cdot N$$

або

$$T_f \sim \tau \cdot N^{\frac{1}{4}} \sim P_\kappa^{\frac{1}{3}} \cdot N^{\frac{1}{4}}, \quad (2.27)$$

$$T_s \sim \tau^{\frac{4}{5}} \cdot N^{\frac{1}{4}} \sim P_\kappa^{\frac{5}{12}} \cdot N^{\frac{1}{4}}. \quad (2.28)$$

Для рівноймовірної дії сил тертя і зрізу маємо:

$$V = K_V \cdot \tau^{\frac{9}{2}} \cdot N, \quad (2.29)$$

звідси параметр зносу буде

$$T_{\epsilon} \sim \tau^{\frac{9}{8}} \cdot N^{\frac{1}{4}} \sim P_{\kappa}^{\frac{9}{8}} \cdot N^{\frac{1}{4}}, \quad (2.30)$$

Для визначення закономірностей зносу при змінній енергії сил тертя і зрізу скористаємося рівнянням (2.1), для чого підставимо значення (2.22) і часткові похідні з рівняння (2.29). Потім, замінивши τ на P_{κ} по (2.15) і (2.16), отримаємо:

$$4 \cdot C_V \cdot T_{\epsilon}^3 dT_{\epsilon} = \frac{9}{2} \cdot K_V \cdot N \cdot \left(\frac{K_p \cdot P_{\kappa}}{T_{\epsilon}^2} \right)^{\frac{7}{2}} \cdot \left(-\frac{2 \cdot K_p \cdot P_{\kappa}}{T_{\epsilon}^3} \right) dT_{\epsilon} + K_V \cdot \left(\frac{K_p \cdot P_{\kappa}}{T_{\epsilon}^2} \right)^{\frac{9}{2}} dN,$$

або

$$4 \cdot C_V \cdot T_{\epsilon}^3 dT_{\epsilon} = \frac{9}{2} \cdot K_V \cdot N \cdot \left(-\frac{2 \cdot K_p^{\frac{9}{2}} \cdot P_{\kappa}^{\frac{9}{2}}}{T_{\epsilon}^{10}} \right) dT_{\epsilon} + K_V \cdot \left(\frac{K_p \cdot P_{\kappa}}{T_{\epsilon}^2} \right)^{\frac{9}{2}} dN. \quad (2.31)$$

Після інтегрування маємо:

$$C_V \cdot T_{\epsilon}^4 = \frac{K_V \cdot N \cdot K_p^{\frac{9}{2}} \cdot P_{\kappa}^{\frac{9}{2}}}{T_{\epsilon}^9} + \frac{K_V \cdot N \cdot K_p^{\frac{9}{2}} \cdot P_{\kappa}^{\frac{9}{2}}}{T_{\epsilon}^9},$$

звідки

$$T_{\epsilon}^{13} \sim P_{\kappa}^{\frac{9}{2}} \cdot N,$$

або

$$T_{\epsilon} \sim P_{\kappa}^{\frac{9}{26}} \cdot N^{\frac{1}{13}}. \quad (2.32)$$

Для даної пари в таблиці 2.1 подані розрахункові формули в залежності від переважаючого виду енергії і виду зносу: $V_1 \sim W_f$; $V_2 \sim W_s$; $V_3 \sim \frac{\bar{W}_f + \bar{W}_s}{2}$;
 $V_4 \sim \tau^{\frac{9}{2}} \cdot N$.

Для ідеалізованого випадку зносу сферичного контакту (при його твердості $H_{Бк} \ll H_{Бл}$) у парі з ламеллю отримаємо формули зносу для сфери (2.33), аналогічні формулам зносу циліндра зі сферичним контактом (2.21). Це пояснюється тим, що об'єм зношеного матеріалу сферичного контакту при $H \ll R$ і $H \sim T^2$ дорівнює:

$$V_C = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot H^2 \cdot (3 \cdot R - H) \sim T^4, \quad (2.33)$$

тобто об'єм зносу сфери і циліндра пропорційний $V_C \sim T^4$. Об'єм же зносу ламелі зі сферичним контактом $V_{\text{Л}} \sim T^3$.

Таблиця 2.1 – Формули зносу контактних пар в залежності від виду деформації ($T = K_T \cdot P_{\kappa}^{m_{PT}} \cdot N^{m_{NT}}$, $H = K_H \cdot P_{\kappa}^{m_{PH}} \cdot N^{m_{NH}}$)

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

Продовження таблиці 2.1

1	2	3	4
$V_4 \sim \tau^{\frac{9}{2}} \cdot N$	$W = \text{const}$	$T \sim P^{\frac{1}{2}} \cdot N^{\frac{1}{3}}$ $H \sim P \cdot N^{\frac{2}{3}}$	$T \sim P^{\frac{9}{8}} \cdot N^{\frac{1}{4}}$ $H \sim P^{\frac{3}{4}} \cdot N^{\frac{1}{2}}$
	$W = \text{var}$	$T \sim P^{\frac{3}{8}} \cdot N^{\frac{1}{12}}$ $H \sim P^{\frac{3}{4}} \cdot N^{\frac{1}{6}}$	$T \sim P^{\frac{9}{26}} \cdot N^{\frac{1}{13}}$ $H \sim P^{\frac{9}{13}} \cdot N^{\frac{2}{13}}$

2.1.3 Аналіз формул ідеалізованих моделей зносу електричних контактних пар

З таблиці 2.1 випливає, що при постійному значенні енергії W у зоні тертя, об'єм V зношеного матеріалу ламелі і циліндра при постійному контактному тиску P_k пропорційний напрацюванню ресурсу N , тобто $V \sim N^{m_N}$, де $m_N = 1$ – показник зв'язку об'єму з напрацюванням ресурсу є величина постійна. Залишаються постійними і показники зв'язку ресурсу N з лінійними розмірами T і H , m_{NT} і m_{NH} , побічно враховують зміни об'єму зносу матеріалу. На ці коефіцієнти не впливає характер і вид деформацій в зоні тертя.

При постійному ресурсі N , об'єм зношеного матеріалу ламелі і циліндра V зі зміною контактного тиску P_k залежить від переважаючого виду деформації $V \sim P^{m_p}$, де $m_p \geq 1$ – показник зв'язку об'єму з контактним тиском, який зростає з ростом деформації зрізу ($m_p = 1 \div 2 = \text{var}$). Це викликає відповідну нестабільність показників ступеня зв'язку контактного тиску з лінійними розмірами H і T , а також m_{PT} і m_{PH} .

При змінному значенні енергії W у зоні тертя обидва показники зв'язку об'єму з ресурсом і контактним тиском m_N і m_p залежать від переважаючого виду деформації. При цьому показник зв'язку ресурсу m_N може зменшуватися

в 3-4 рази, а показник зв'язку контактного тиску з об'ємом залишається приблизно на одному рівні. При збільшенні сил зрізу в зоні деформації він збільшується менше 10%.

Різде зменшення показника зв'язку ресурсу m_N при змінному значенні енергії (режим змащення) свідчить про можливість значного підвищення ресурсу електричних контактних пар.

2.2 Знос реальних слабкострумових електричних контактних пар ковзання

Вище розглядалися ідеальні випадки зносу, коли один з контактів в процесі тертя не змінював своєї геометричної форми і, отже, знос не залежав від довжини шляху контактування [65].

У реальних електричних контактних парах будуть зношуватися обидва контакти, внаслідок чого будуть змінюватися взаємно обидві поверхні контактування [70].

При роботі контактів витрачена в процесі тертя енергія буде пропорційна сумарному об'єму зношеного матеріалу ламелі V_l і контакту V_k .

$$\Sigma V = V_l + V_k, \quad (2.34)$$

тоді знос кожного контакту буде пропорційний відповідно

$$K_l = \frac{V_l}{V_l + V_k}, \quad (2.35)$$

$$K_k = \frac{V_k}{V_l + V_k}. \quad (2.36)$$

Аналіз коефіцієнтів зносу ламелі K_l і контакту K_k може бути проведений за формулою [12]:

$$V = Z \cdot \frac{P_k \cdot l_k}{H_B}, \quad (2.37)$$

де Z – коефіцієнт пропорційності;

l_k – довжина шляху контактування при N переходах;

H_B – твердість матеріалу.

Виразивши співвідношення твердості матеріалів через об'єми

$$B = \frac{H_{Бк}}{H_{Бл}} = \frac{V_{л}}{V_{к}}, \quad (2.38)$$

отримаємо відповідно відносні об'єми зносу ламелі і контакту:

$$K_{л} = \frac{1}{1 + \frac{1}{B}}, \quad (2.39)$$

$$K_{к} = \frac{1}{1 + B}. \quad (2.40)$$

Співвідношення об'ємів зношених матеріалів може бути визначено за геометричними розмірами електричних контактних пар.

Об'єми зносу ламелі і контакту складуть (рис. 2.3):

$$V_{л} = \frac{T^3 l}{16 \cdot R_f}. \quad (2.41)$$

При цьому співвідношення об'ємів дорівнюватиме:

$$B = \frac{\frac{4 \cdot l}{\pi \cdot T} \cdot \frac{R}{R_f}}{1 - \frac{R}{R_f}},$$

звідки співвідношення радіусів кривизни поверхонь тертя

$$\frac{R}{R_f} = \frac{1}{1 + \frac{4 \cdot l}{\pi \cdot T \cdot B}}. \quad (2.42)$$

$$V_{к} = \frac{\pi \cdot T^4}{64 \cdot R} \left(1 - \frac{R}{R_f} \right). \quad (2.43)$$

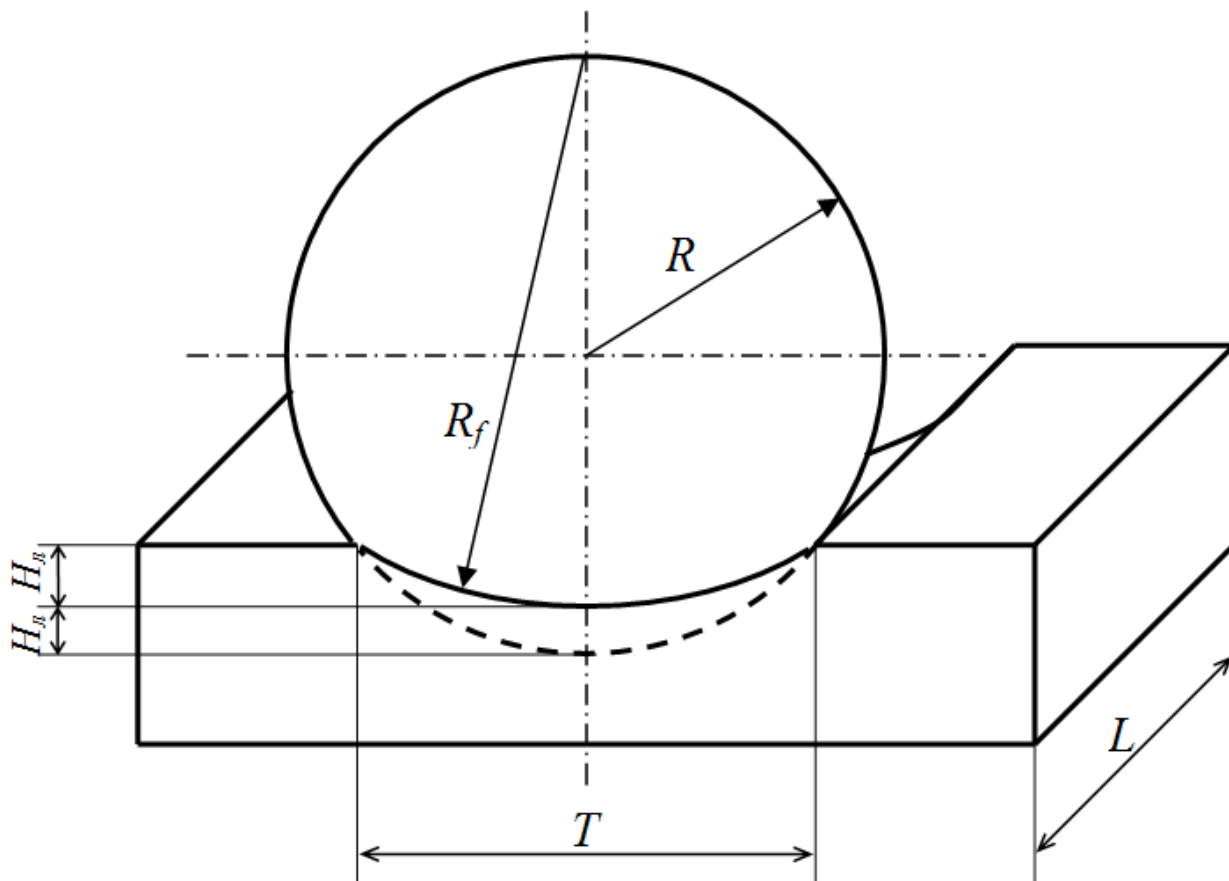


Рисунок 2.3 – Слід зносу пари площина-сфера при змінному значенні радіуса контактування сфери R_f

Так як T в процесі зносу змінюється, то величина $\frac{R}{R_f} = \text{var}$. Відповідно

будуть змінними і коефіцієнти відносного зносу K_l і K_k :

$$K_l = \frac{1}{1 - \frac{R}{R_f} + \frac{l}{T} \cdot \frac{R}{R_f}} = \text{var}, \quad (2.44)$$

$$K_k = \frac{1}{1 + \frac{l}{T} \cdot \frac{R}{R_f} - \frac{R}{R_f}} = \text{var}. \quad (2.45)$$

Це призводить до зміни закономірності зносу ламелі при $\frac{4 \cdot l}{\pi \cdot T \cdot B} \gg 1$.

В цьому випадку $R_f \approx \frac{4 \cdot l}{\pi \cdot T \cdot B} \cdot R$ і об'єм зносу ламелі складе:

$$V_n = \frac{T^3 l}{16 \cdot R_f} = \frac{\pi \cdot B \cdot T^4}{64 \cdot R}, \quad (2.46)$$

звідки випливає, що

$$T \sim N^{\frac{1}{3} \div \frac{1}{4}}. \quad (2.47)$$

Таким чином, в залежності від конкретних умов роботи пари площина-сфера показники ступеня зв'язку можуть змінювати свої значення в межах

$$m_{NT} = \frac{1}{3} \div \frac{1}{4} \text{ і } m_{NH} = \frac{3}{2} \div \frac{1}{2}.$$

Величина радіуса R_f може бути легко виміряна, що дає нам можливість судити про величину і закономірності зміни зношеного об'єму матеріалу.

Об'єм зносу ламелі (циліндричний цровод) складе (рис. 2.4)

$$V_n = \frac{1}{3} \cdot \frac{T_e^3}{16 \cdot R} \cdot T_a, \quad (2.48)$$

де

$$T_a = T_e \cdot \sqrt{\frac{R_f}{r}} \text{ або } T_e = T_a \cdot \sqrt{\frac{r}{R_f}}. \quad (2.49)$$

Після підстановки значення T_e з (2.49) в формулу (2.48) отримаємо для ω витків:

$$V_n = \frac{T_a^4 \cdot r^{\frac{1}{2}} \cdot \omega}{48 \cdot R_f^{\frac{3}{2}}}. \quad (2.50)$$

Об'єм зносу сферичного контакту буде дорівнює:

$$V_k = \frac{\pi \cdot T_a^4}{64 \cdot R} \cdot \left(1 - \frac{R}{R_f}\right). \quad (2.51)$$

При цьому співвідношення $B = \frac{V_n}{V_k}$ складе:

$$B = \frac{4 \cdot \omega \cdot C^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{R}{R_f}\right)^{\frac{3}{2}}}{3 \cdot \pi \cdot \left(1 - \frac{R}{R_f}\right)},$$

де

$$C = \frac{r}{R}.$$

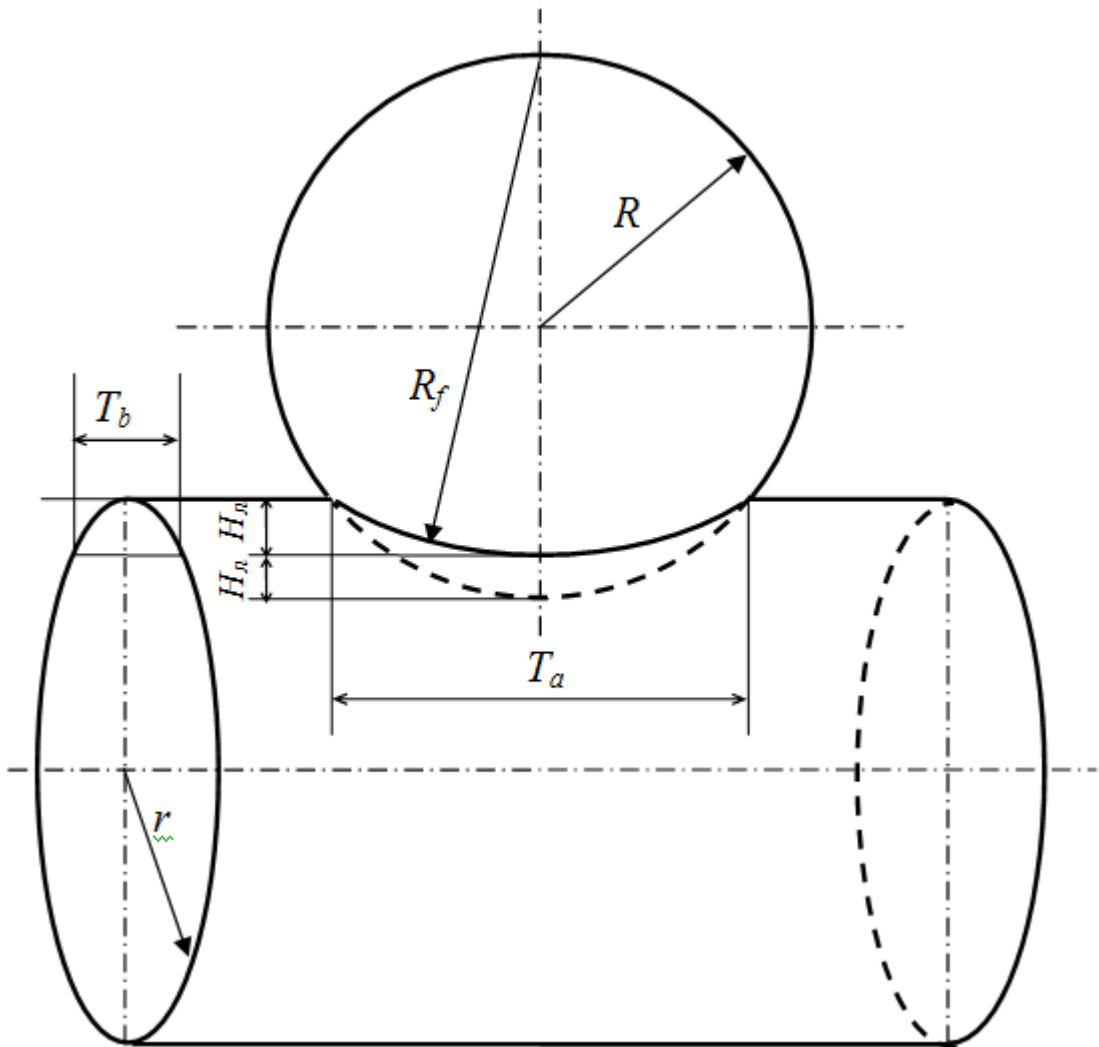


Рисунок 2.4 – Слід зносу пари циліндр-сфера при незмінному значенні радіуса контактування сфери R_f

Цей вираз приводить до рівняння:

$$B = \frac{4 \cdot \omega \cdot C^{\frac{1}{2}}}{3 \cdot \pi \cdot B} \cdot \left(\frac{R}{R_f} \right)^{\frac{3}{2}} + \frac{R}{R_f} - 1 = 0. \quad (2.52)$$

Якщо прийняти, що матеріал сфери і циліндра однорідний, їх твердість в процесі зносу не змінюється, і розглядати тільки зону усталеного зносу, то при постійних значеннях ω , C і B з рівняння (2.52) випливає, що відношення радіусів кривизни в зоні тертя $\frac{R}{R_f}$ прагне до постійної величини. Це

випливає також з рішення рівняння (2.60), яке після заміни $\frac{R}{R_f} = y^2$

приводиться до виду

$$a \cdot y^3 + y^2 - 1 = 0. \quad (2.53)$$

Відповідно до формули Кардана тут можливі випадки, коли один або всі корені рівняння (2.53) дійсні. Отже і співвідношення радіусів кривизни $\frac{R}{R_f} = y^2$ будуть постійною величиною.

Значення відносних коефіцієнтів зносу ламелі K_n і контакту K_k будуть також величинами постійними:

$$K_n = \frac{1}{1 + \frac{3 \cdot \pi \cdot \left(1 - \frac{R}{R_f}\right)}{4 \cdot \omega \cdot C^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{R}{R_f}\right)^{\frac{3}{2}}}}, \quad (2.54)$$

$$K_k = \frac{1}{1 + \frac{4 \cdot \omega \cdot C^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{R}{R_f}\right)^{\frac{3}{2}}}{3 \cdot \pi \cdot \left(1 - \frac{R}{R_f}\right)}}. \quad (2.55)$$

Об'єми зносу ламелі і контакту є частиною загального об'єму зношеного матеріалу і пов'язані співвідношеннями:

$$V_l = K_l \cdot \Sigma V, \quad (2.56)$$

$$V_k = K_k \cdot \Sigma V, \quad (2.57)$$

тому при постійних значеннях K_l , K_k закономірність зносу не буде змінюватися, а буде змінюватися тільки загальний коефіцієнт пропорційності K_v , куди увійде K_l або K_k .

Значення коефіцієнтів K_l і K_k будуть також залежати від виду і співвідношення деформаційних процесів, що відбуваються при терті електричні контактні пари.

2.3 Метод оцінки додаткового зносу слабкострумових електричних контактних пар ковзання під струмом

Сумарний об'єм зносу для електричних контактних пар ковзання під струмом при постійному числі циклів напрацювання N можна представити у вигляді суми двох складових [71]:

$$V_\Sigma = V_m + V_I, \quad (2.58)$$

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 [72]:

$$V_I = C \cdot I^\alpha, \quad (2.59)$$

де α – показник степені, що визначає вплив струму на знос.

Формула об'єму сумарного зносу може бути виражена через відносну величину бічного зносу [71]:

$$V_\Sigma = V_m \cdot \left(1 + \frac{V_I}{V_m}\right), \quad (2.60)$$

або

$$V_\Sigma = V_m \cdot (1 + K_I \cdot I^\alpha), \quad (2.61)$$

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

Стосовно до параметру зносу T сферичних електричних контактних пар в загальному випадку об'єм зносу можна представити рівнянням [71]:

$$V = m \cdot T^n.$$

Тоді

$$\frac{V_\Sigma}{V_m} = \left(\frac{T_\Sigma}{T_m} \right)^n.$$

Прийнявши $t = \frac{T_\Sigma}{T_m}$, з урахуванням рівняння (2.69) отримаємо:

$$t = \left(1 + K_I \cdot I^\alpha \right)^{\frac{1}{n}}.$$

$$V_\Sigma = V_m \cdot \left(1 + K_I \cdot I^\alpha \right), \quad (2.62)$$

У рівнянні (2.62), стосовно до зносу електричної контактної пари площина-сфера показник степені буде $n=3$ [65], [71], а для пари циліндр-сфера – $n=4$ [75], [71]. Коефіцієнт K_I і показник степені α необхідно визначати за даними досліду. Для цього зручно скористатися рівнянням [75]

$$\lg(t^n - 1) = \lg K_I + \alpha \cdot \lg I, \quad (2.63)$$

отриманим після логарифмування рівняння (2.62). При цьому залежність (2.63) виражається рівнянням прямої, де $\lg K_I$ – початкова координата, а показник степені α дорівнює тангенсу кута нахилу прямої лінії.

Для наближених розрахунків при $K_I \cdot I^\alpha < 0,1$ можна розкласти рівняння (2.62) в ряд Маклорена [73], [74], [75] обмеживши його двома доданками:

$$t \approx 1 + \frac{K_I}{n} I^\alpha = 1 + K_I \cdot I^\alpha. \quad (2.64)$$

У свою чергу рівняння (2.64) можна представити, як

$$t \approx e^{K_I \cdot I^\alpha}. \quad (2.65)$$

У рівнянні (2.65) коефіцієнти K_I і α можуть визначатися графічно, для чого, зробивши подвійне логарифмування, отримаємо рівняння прямої [75]

$$\ln^2 t = \ln K_I + \alpha \cdot \ln I. \quad (2.66)$$

2.4 Моделювання місткової ерозії слабкострумових електричних контактних пар засобами MATLAB

Комутація контактами малопотужних ланцюгів з активним навантаженням супроводжується ерозійними явищами, що викликаються утворенням розплавлених містків в зоні контактування в певні моменти руху контактів [76]. Визначення максимальних довжин містків має практичне значення не тільки для вивчення місткової ерозії, але і для оцінки швидкості замикання-розмикання та величини міжконтактних відстаней, необхідних для правильного вибору іскрогасних елементів [72], [12].

Функціонування електричних контактних пар супроводжується зношуванням контактуючих матеріалів внаслідок тертя і електричної ерозії. Протягом останніх десятиліть проводилися трибологічні випробування, математичне моделювання та моделювання для вивчення природи і наслідків механічного зносу матеріалів з покриттям і без покриття [3], [77], [78]. Дослідження були переважно зосереджені на різних механізмах зношування: стирання, адгезії, ерозії, корозійному зносі, втомному зносі, а також на різних їх комбінаціях [79], однак вплив місткової ерозії на процес електричного контактування залишається ще недостатньо вивченим [78], [80], [81].

На основі проведеного аналізу літературних джерел [12], [72], [78] з'ясовано, що розбіжності результатів вимірювання довжин і діаметрів містків, отриманих різними дослідниками і різними методами, досить значні. Такі розбіжності можуть бути пов'язані як з методикою проведення експериментів, так і з підходами до опрацювання отриманих результатів [80], [81]. На даний час методи обробки результатів експериментальних даних та представлення їх у вигляді математичних моделей набули значного розвитку. Зокрема побудова моделей багатofакторних процесів, яким є місткова ерозія,

де використання апріорної інформації, заснованої на законах фізики викликає певні труднощі, може бути проведено методами ідентифікації [82], [83].

Побудова математичної моделі місткової ерозії електричних контактних пар з використанням математичної системи MATLAB методом ідентифікації, тобто отримання за експериментальними даними математичної моделі реального об'єкта, поданої у вигляді алгебраїчних рівнянь (ідентифікацією при побудові математичної моделі будемо розуміти визначення числових значень коефіцієнтів синтезованих моделей) [83], [84].

Відомо, що в слабкострумових електричних контактних парах переважає місткова ерозія [76]. Різними авторами [72], [76] проводилися визначення довжин містків по осцилограмам напруги на контактах для різних струмів і контактних матеріалів, стосовно до вимог малопотужних контактних систем, використовуваних в автоматичі. Вимірювання проводилися на поляризованих реле, що відрізняються між собою матеріалом контактів. Для проведення вимірювань при знижених тисках повітря і різних газах, реле містилися в герметизовані балони, де створювалося необхідне середовище [76].

Максимальна довжина містка s в момент підривання його струмом i знаходиться зі співвідношення [72], [12]

$$s = v_{cp} \cdot \tau, \quad (2.67)$$

де v_{cp} — середня швидкість розмикання контактів поляризованих реле, яка визначається для кожного реле при заданих напрузі живлення і регулюванні, τ — відрізок часу від початку роз'єднання контактів до моменту вибуху містка, який визначається по осцилограмам напруги на містку.

Вимірами s при різних параметрах ланцюга було виявлено характерну властивість містків, а саме — відносна незалежність довжини містка s від напруги живлення, індуктивності і ємності ланцюга в деяких (досить широких) межах зміни цих параметрів при незмінному струмі містка i . Експериментальне визначення максимальних довжин містків для різних контактних матеріалів, середовищ і струмів подано на рис. 2.5. Крім того,

визначено, що максимальні довжини містків збільшуються зі збільшенням i , що мінімальним струмом, при якому з достатньою повторюваністю вдається виміряти s , є струм величиною 10 мА. Результати досліджень довжини містків ерозії (s , 10^{-4} см) від струму (i , мА) за даними [72] подано в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Результати досліджень довжини містків ерозії (s , 10^{-4} см) від струму (i , мА) за даними [72]

Сплав	Струм i , мА										
	10	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
1 – ПЛІ-10	0,5	1,14	1,52	1,87	2,21	2,56	2,9	3,23	3,56	3,88	4,21
2 – ПЛН-5	0,2	1,0	1,3	1,48	1,62	1,75	1,84	1,93	2,0	2,09	2,17
3 – ЗЛН-5	0,15	0,84	1,06	1,19	1,28	1,34	1,41	1,46	1,52	1,57	1,63
4, 5, 6 – ПЛН-5	0,05	0,59	0,86	1,03	1,15	1,27	1,34	1,41	1,46	1,51	1,57
7 – Ср 999	0,2	0,35	0,45	0,53	0,62	0,69	0,75	0,81	0,86	0,91	0,97
8 – мідь	0,05	0,09	0,12	0,12	0,13	0,13	0,14	0,14	0,13	0,12	0,12

Проведемо ідентифікацію моделі місткової ерозії методом регресійного аналізу [80], [81]. Мінімізованою функцією похибки (різниці між прогнозованою моделлю і даними експерименту) при регресійному аналізі є сума квадратів похибок [85], [86]. Завдяки цьому вдається застосувати метод найменших квадратів [86]. Тобто знайдемо апроксимуючу функцію залежності величини містка ерозії від струму так, щоб функція $s(i)$ проходила максимально близько до всіх точок отриманих експериментальним шляхом [87].

Ключовий момент полягає у виборі класу наближених функцій. Основна вимога до цих функцій – це незалежність результатів від початку відліку, тобто від зсуву по послідовності значень аргументу [87]. Іншими словами, необхідно, щоб кінцева множина функцій вибраного для апроксимації класу переходила сама в себе при заміні i на $i+k$. Такими властивостями володіють [80], [81]:

- лінійні комбінації статичних функцій $1, i, i^2, \dots, i^n$;

- експоненціальні функції e^{-ai} ;
- степеневі функції i^a .

Використання будь-якої іншої кінцевої множини функцій, крім перерахованих, вимагає наявності природного початку відліку, так як його вибір впливає на результат.

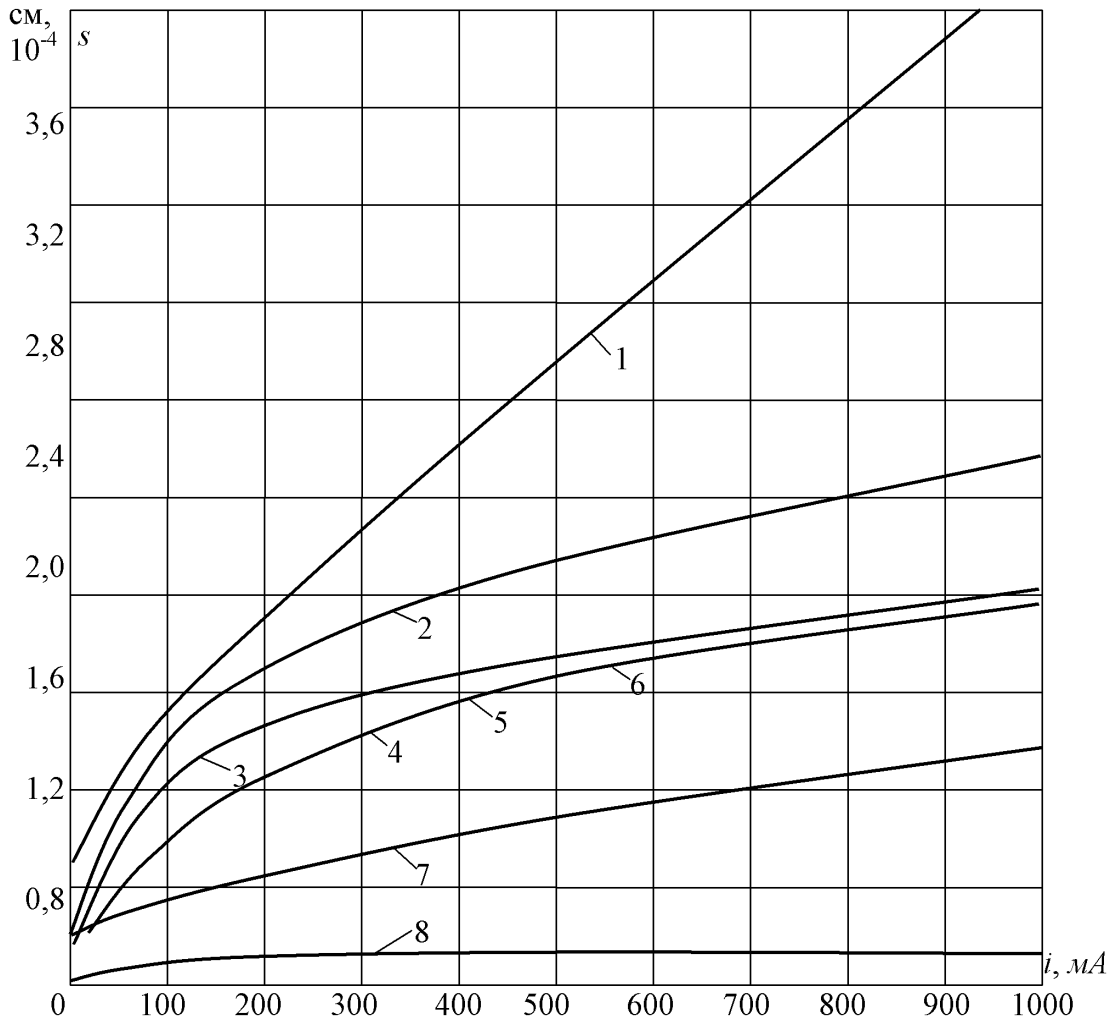


Рисунок 2.5 – Графік залежності довжини містка ерозії від величини комутованого струму для ряду контактних матеріалів [72]. Усереднені значення довжин містків при струмі до 1 А для різних контактних матеріалів: 1 – платино-іридієвий сплав з 10% іридію (ПЛІ-10); 2 – платино-нікелевий сплав з 5% нікелю (ПлН-5); 3 – золото-нікелевий сплав з 5% нікелю; 4 – Паладій-Срібний сплав з 40% срібла (ПдСр-40); 5 – ПдСр-40 (анод) – ПлН-5 (катод); 6 – пдср-40 (катод) – ПЛН-5 (Анод); 7 – срібло; 8 – безкиснева мідь у водні.

Оскільки при дослідженнях довжини містків ерозії від струму найбільш часто зустрічаються незмінні або повільно мінливі криві, то доцільно використовувати аналогічні залежності при виборі методів апроксимації [88]:

- лінійна апроксимація

$$s(i) = a_0 + a_1 \cdot i; \quad (2.68)$$

- квадратична апроксимація

$$s(i) = a_0 + a_1 \cdot i + a_2 \cdot i^2; \quad (2.69)$$

- експоненціальна апроксимація

$$s(i) = A \cdot e^{a_i}; \quad (2.70)$$

- степенева апроксимація

$$s(i) = A \cdot i^a. \quad (2.71)$$

Для обробки даних MATLAB використовує різні функції апроксимації даних поліномами за методом найменших квадратів – поліноміальної регресії [89]. Однією з таких функцій є `polyfit(x, y, n)`, яка повертає вектор коефіцієнтів полінома $p(x)$ степеня n , який з найменшою середньоквадратичною похибкою апроксимує функцію $y(x)$, результатом є вектор-рядок довжиною $n+1$, що містить коефіцієнти полінома в порядку зменшення степенів [89], [90].

Для проведення розрахунків в MATLAB місткової ерозії сплаву ПЛІ-10 вводимо вектори-стовбці експериментальних даних струму та довжини містка ерозії [80], [81]

```
>> i=[10 100 200 300 400 500 600 700 800 900 1000];
```

```
>> s=[0.5 1.14 1.52 1.87 2.21 2.56 2.9 3.23 3.56 3.88 4.21];
```

Для полінома першого степеня (лінійна апроксимація) в MATLAB

```
>> coeff1=polyfit(i,s,1)
```

```
coeff1 = 0.003562938870820 0.722564256525727
```

Для полінома другого степеня (квадратична апроксимація) в MATLAB

```
>> coeff2=polyfit(i,s,2)
```

```
coeff2 = -0.000000817889248 0.004385599991898 0.596754494347372
```

Подальше дослідження викликає певні труднощі, оскільки в MATLAB немає функцій експоненціальної та степеневі апроксимації [89].

Для проведення експоненціальної апроксимації в MATLAB прологарифмуємо праву і ліву частини рівняння (2.78). В результаті отримаємо

$$\ln(s) = \ln(A \cdot e^{a \cdot i}) \text{ або } \ln(s) = \ln(A) + a \cdot i.$$

Якщо ввести заміну $S = \ln(s)$, $B = \ln(A)$ то експоненціальна функція перетворюється на поліном першого порядку:

$$S = B + a \cdot i. \quad (2.72)$$

Врахувавши, що $A = e^B$ для експоненціальної апроксимації в MATLAB

```
>> S=log(s);
```

```
coeffe=polyfit(i,S,1);
```

```
coeffe=[coeffe(1) exp(coeffe(2))]
```

```
coeffe = 0.001772650510313 0.892458860657700
```

Для проведення степеневі апроксимації в MATLAB прологарифмуємо праву і ліву частини рівняння (2.79). В результаті отримаємо

$$\ln s = \ln(A \cdot i^a) \text{ або } \ln(s) = \ln(A) + a \cdot \ln i$$

Якщо ввести заміну $S = \ln(s)$, $B = \ln(A)$, $I = \ln i$ то степенева функція перетворюється на поліном першого порядку:

$$S = B + a \cdot I. \quad (2.73)$$

Врахувавши, що $A = e^B$ для степеневі апроксимації в MATLAB [89]

```
>> S=log(s);
```

```
I=log(i);
```

```
coeffs=polyfit(I,S,1);
```

```
coeffs=[coeffs(1) exp(coeffs(2))]
```

```
coeffs = 0.464957479263563 0.148352348369164
```

Результати апроксимації зведені в табл. 2.3.

Середня похибка апроксимації Δs для кожної моделі відповідного контактного матеріалу розраховується за формулою [80], [81]

$$\Delta s = \frac{\sum_{j=1}^n \frac{|s_j - s'_j|}{s_j}}{n} \cdot 100\% , \quad (2.74)$$

де s'_j – розрахункове значення в точці; i_j – за рівнянням апроксимації;

n – кількість точок апроксимації.

Таблиця 2.3 – Результати апроксимації дослідження залежності довжини містків ерозії від струму

Сплав	1 – ПЛН10	2 – ПдСр40	3 – ЗлН5	4,5,6 – ПЛН5	7 – Ср 999	8 – мідь
Лінійна регресія $s(i) = a_0 + a_1 \cdot i$ [10; 1000]						
a_1	0.0036	0.0016	0.0011	0.0013	0.00073	0.0000498
a_0	0.72	0.79	0.66	0.47	0.283	0.092
Δs %	3.42	12.88	13.53	19.15	5.15	13.58
Квадратична регресія $s(i) = a_0 + a_1 \cdot i + a_2 \cdot i^2$ [10; 1000]						
a_2	-0.00000082	-0.0000022	-0.00000176	-0.0000018	-0.00000042	-0.0000002
a_1	0.00439	0.00376	0.00289	0.003089	0.00115	0.0002555
a_0	0.59675	0.452	0.389	0.1958	0.218	0.0608
Δs %	2.45	7.46	8.65	8.41	1.88	4.5
Експоненціальна регресія $s(i) = A \cdot e^{a \cdot i}$ [10; 1000]						
a	0.00177	0.001525	0.00145	0.00212	0.00133	0.0005567
A	0.892	0.6437	0.5189	0.305	0.304	0.08586
Δs %	13.77	22.73	23.26	33.84	11.33	15.55
Степенева регресія $s(i) = A \cdot i^a$ [10; 1000]						
a	0.465	0.496	0.4898	0.717	0.35	0.2057
A	0.148	0.0788	0.0636	0.014	0.0786	0.0346
Δs %	8.05	9.09	11.56	16.88	6.2	9.21

Графіки відповідних функцій для Ср 999 подано на рис. 2.6 – 2.9.

Середня похибка апроксимації ΔS для кожної моделі різних контактних матеріалів розраховується за формулою [80]

$$\Delta S = \frac{\sum_{k=1}^m \Delta s_k}{m}, \quad (2.75)$$

де Δs_k – похибка апроксимації для кожної моделі відповідного контактного матеріалу за рівнянням апроксимації [88];

m – кількість досліджуваних функцій, $m = 6$.

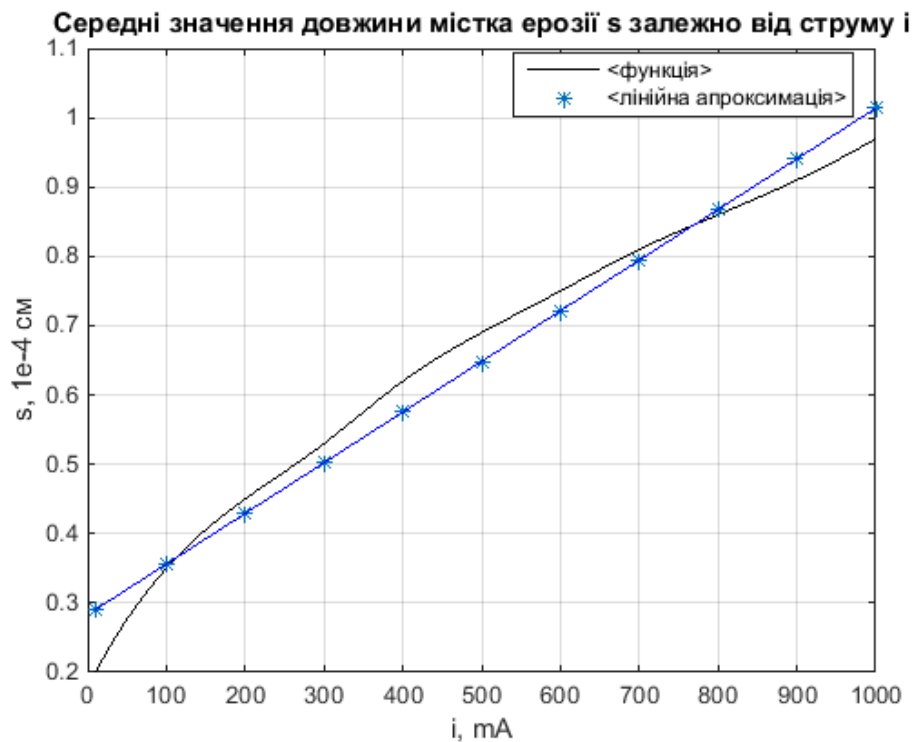


Рисунок 2.6 – Середні значення довжини містка ерозії $s(i)$ для сплаву Cr 999 за результатами експерименту та апроксимованою функцією $s(i) = a_0 + a_1 \cdot i$

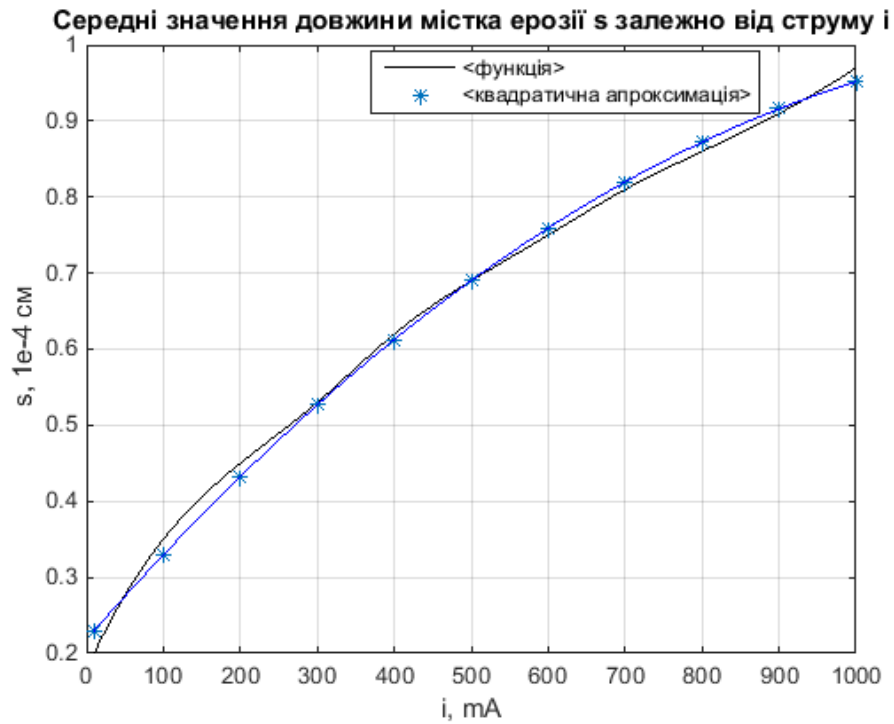


Рисунок 2.7 – Середні значення довжини містка ерозії $s(i)$ для сплаву Sr 999 за результатами експерименту та апроксимованою функцією

$$s(i) = a_0 + a_1 \cdot i + a_2 \cdot i^2$$

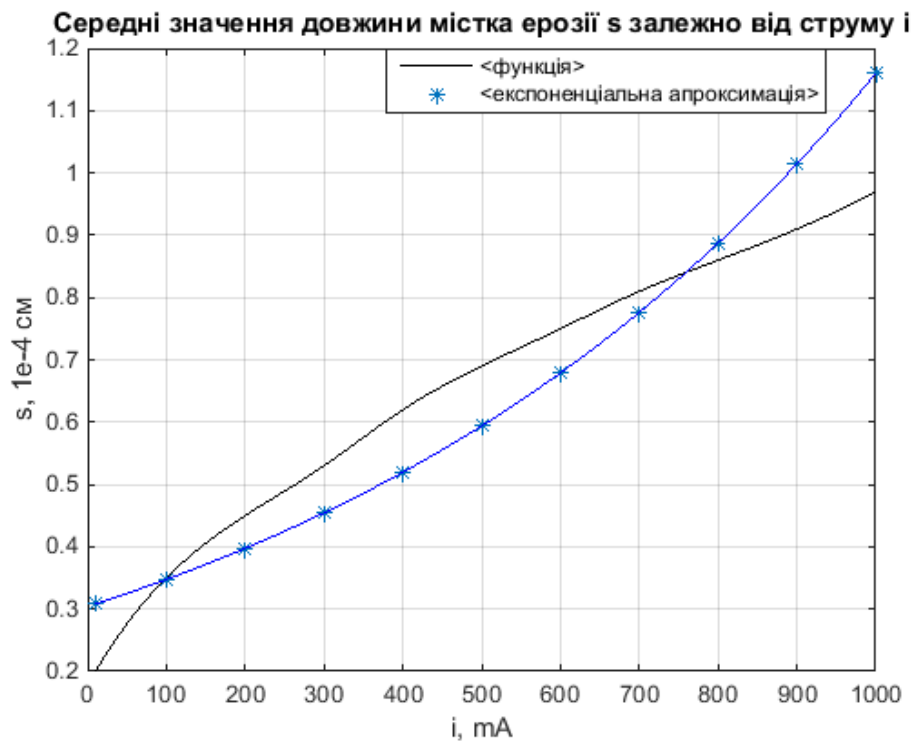


Рисунок 2.8 – Середні значення довжини містка ерозії $s(i)$ для сплаву Sr 999 за результатами експерименту та апроксимованою функцією $s(i) = A \cdot e^{a \cdot i}$

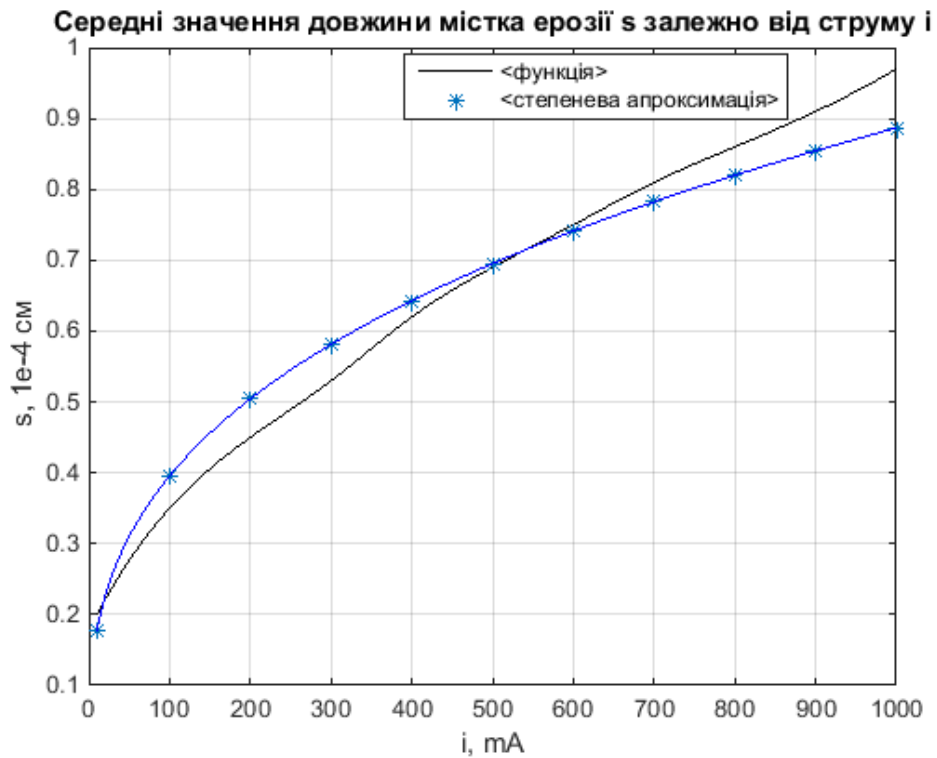


Рисунок 2.9 – Середні значення довжини містка ерозії $s(i)$ для сплаву Ср 999 за результатами експерименту та апроксимованою функцією $s(i) = A \cdot e^{a \cdot i}$

Середні похибки моделей місткової ерозії (2.75):

- лінійна модель

$$\Delta S = \frac{\sum_{k=1}^m \Delta s_k}{m} = \frac{3.42 + 12.88 + 13.53 + 19.15 + 5.15 + 13.58}{6} = 12.95\%;$$

- квадратична модель

$$\Delta S = \frac{\sum_{k=1}^m \Delta s_k}{m} = \frac{2.45 + 7.46 + 8.65 + 8.41 + 1.88 + 4.5}{6} = 5.56\%;$$

- експоненціальна модель

$$\Delta S = \frac{\sum_{k=1}^m \Delta s_k}{m} = \frac{13.77 + 22.73 + 23.26 + 33.84 + 11.33 + 15.55}{6} = 20.08\%;$$

- степенева модель

$$\Delta S = \frac{\sum_{k=1}^m \Delta s_k}{m} = \frac{8.05 + 9.09 + 11.56 + 16.88 + 6.2 + 9.21}{6} = 10.17\%.$$

Значення середньої похибки апроксимації від 7% до 15% свідчить про задовільно підібрану модель, а до 7% – добре підібрану модель [80], [81].

Аналіз результатів визначення середньої похибки показав, що тільки апроксимація експоненціальною функцією дає похибку більшу за 15%, тому така модель не може бути рекомендована в якості моделі місткової ерозії контактів.

В результаті дослідження отримано моделі місткової ерозії:

- лінійна модель

$$s(i) = a_0 + a_1 \cdot i; \quad (2.76)$$

де $a_0 = (1 \div 8) \cdot 10^{-1}$, $a_1 = (5 \div 360) \cdot 10^{-5}$;

- квадратична модель

$$s(i) = a_0 + a_1 \cdot i + a_2 \cdot i^2; \quad (2.77)$$

де $a_0 = (1 \div 8) \cdot 10^{-1}$, $a_1 = (2,6 \div 44) \cdot 10^{-4}$, $a_2 = - (2,0 \div 22) \cdot 10^{-7}$;

- степенева модель

$$s(i) = A \cdot i^a. \quad (2.78)$$

де $A = (1,4 \div 15) \cdot 10^{-2}$, $a = (2,1 \div 7,1) \cdot 10^{-1}$.

В результаті дослідження отримано вирази для математичних моделей місткової ерозії слабкострумових електричних контактних пар у вигляді алгебраїчних рівнянь лінійної квадратичної та степеневої регресії та визначено їх похибки з використанням математичної системи MATLAB. Оскільки середня похибка лінійної (12,95%) квадратичної (5,56%), та степеневої (10,17%) апроксимації не перевищує 15%, то отримані рівняння можуть бути використані в якості математичних моделей місткової ерозії контактів [91]. Однак необхідно відмітити, що квадратична функція більш якісна математична модель місткової ерозії слабкострумових електричних контактних пар, оскільки її похибка практично в два рази менша за похибки степеневої та лінійної моделей.

Проведемо порівняння отриманих молелей з відомою емпіричною формулою Р. Хольма для срібних контактів [72]

$$s(i) = 0,8 \cdot 10^{-5} \cdot \sqrt{i}. \quad (2.79)$$

В результаті дослідження виявлено, що для срібних контактів (Ср 999) коефіцієнт формули (2.78) степеневій моделі $A = 0,0785 \text{ см}^{-4}$ (див. табл. 2.3), що практично дорівнює відповідному коефіцієнту формули Хольма $A = 0,08 \text{ см}^{-4}$. Коефіцієнт формули (2.78) степеневій моделі $a = 0,35$ (див. табл. 2.3) суттєво відрізняється від коефіцієнта формули Хольма $a = 1/2 = 0,5$, що призводить до припущення про друкарську помилку. Якщо припустити, що в результаті уточнення коефіцієнт формули Хольма $a = 1/3$, то це практично відповідатиме результатам дослідження. В результаті уточнена емпірична формула Р. Хольма для срібних контактів буде мати вигляд

$$s(i) = 0,8 \cdot 10^{-5} \cdot \sqrt[3]{i}. \quad (2.80)$$

Такий підхід підтверджується моделюванням в MATLAB, результати якого подано на рис. 2.10 – 2.14.

```
>> coeff1H=[1/2 0.08];
fm07H= coeff1H(2)*I.^coeff1H(1);
plot(a,m7,'-k',I,fm07H,'*',a,fm7H,'-b'); grid on;
>> coeff1H=[1/3 0.08];
fm07H= coeff1H(2)*I.^coeff1H(1);
plot(a,m7,'-k',I,fm07H,'*',a,fm7H,'-b'); grid on;
```

Визначимо похибку уточненої формули Хольма (2.80) моделюванням в MATLAB, результати якого подано на рис. 2.12.

```
>> erH=1/n*sum(abs(m7-fm7H)./m7)*100
erm7H=abs(m7-fm7H);
plot(a,erm7H,'-k'); grid on;
erH = 8.654048933078862
```

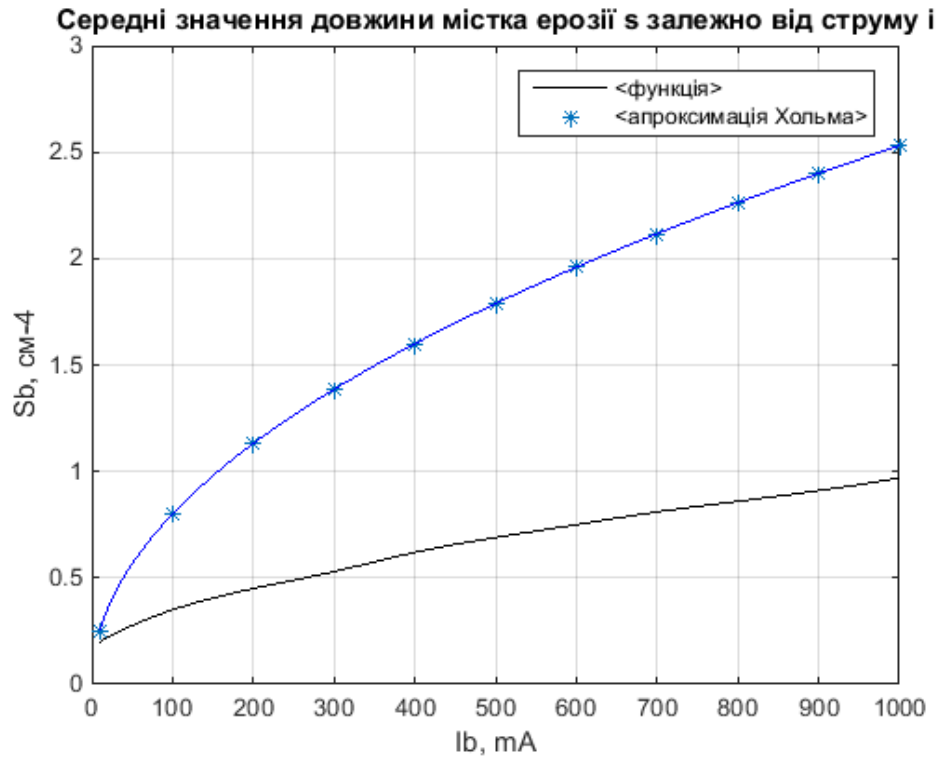



Рисунок 2.10 – Середні значення довжини містка ерозії $s(i)$ для сплаву Sr 999 за результатами експерименту та емпіричною формулою (2.79)

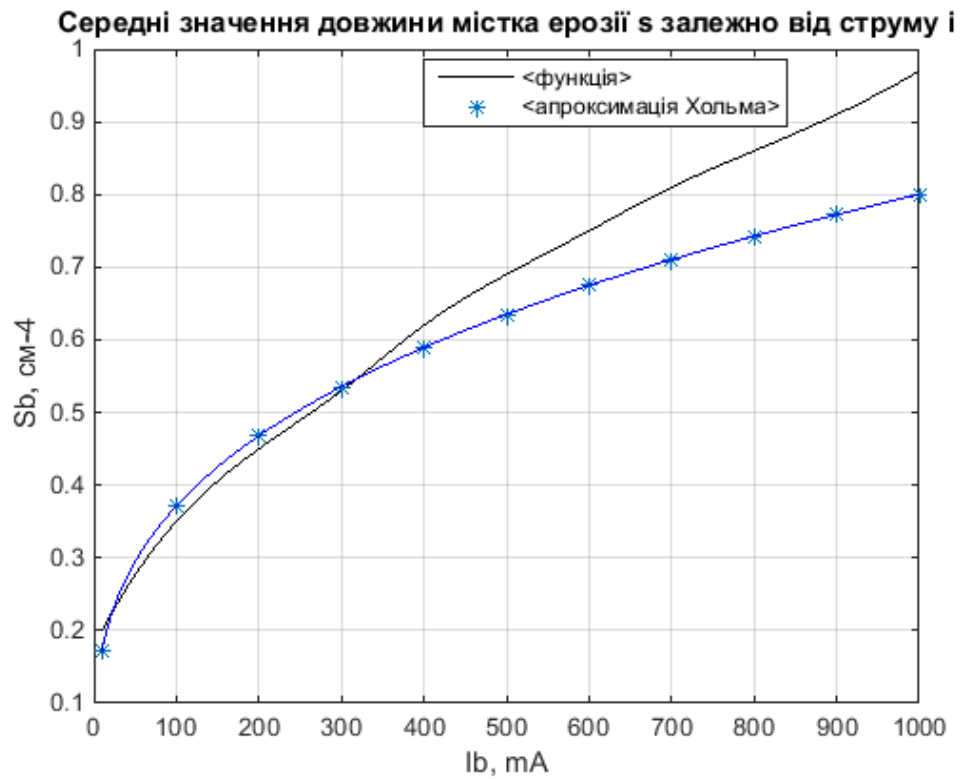


Рисунок 2.11 – Середні значення довжини містка ерозії $s(i)$ для сплаву Sr 999 за результатами експерименту та емпіричною формулою (2.80)

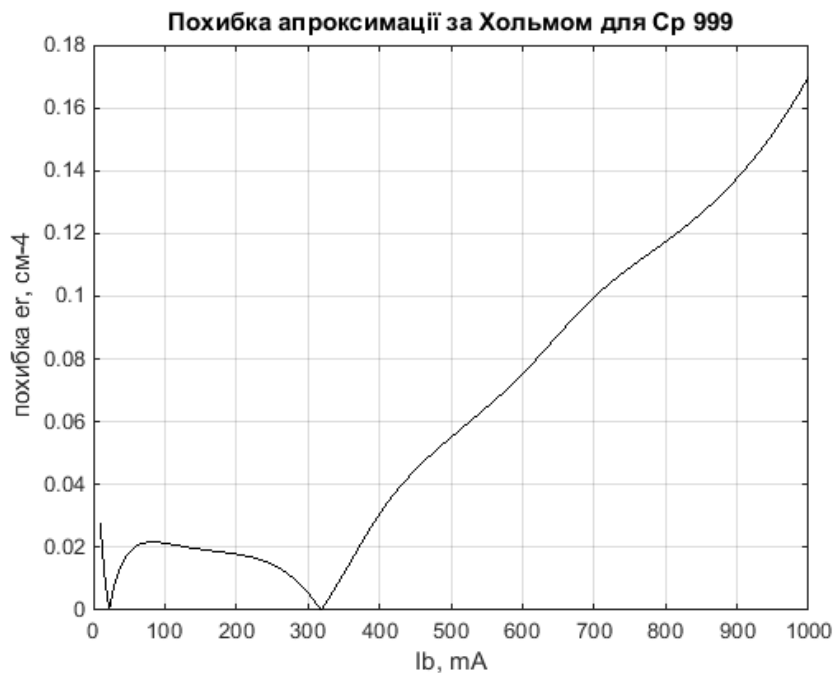


Рисунок 2.12 – Похибка емпіричної формули (2.80) для сплаву Sr 999

Проведемо порівняння похибок отриманих моделей з похибками відомої емпіричної формули Р. Хольма моделюванням в MATLAB, результати якого подано на рис. 2.13 для степеневій моделі і рис. 2.14 для квадратичної моделі.

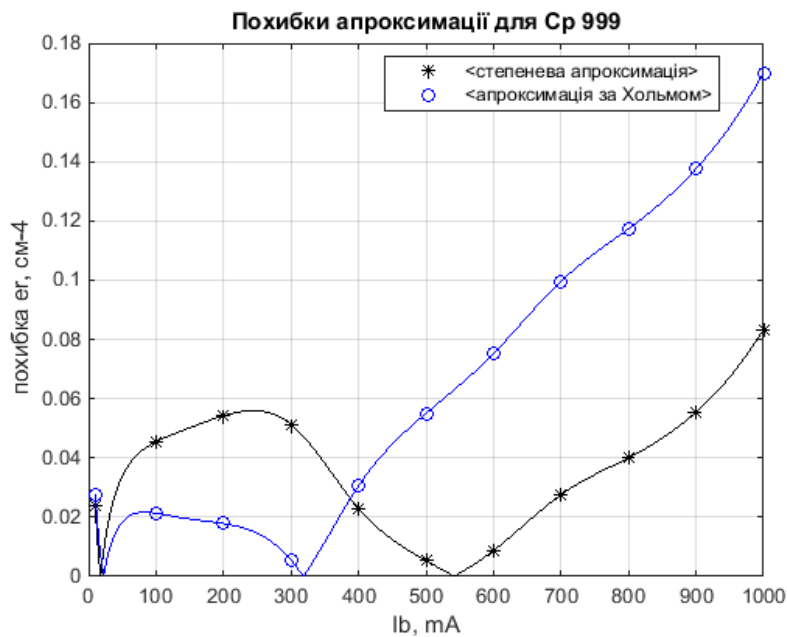


Рисунок 2.13 – Похибка емпіричної формули (2.80) та степеневій моделі (2.78) для сплаву Sr 999

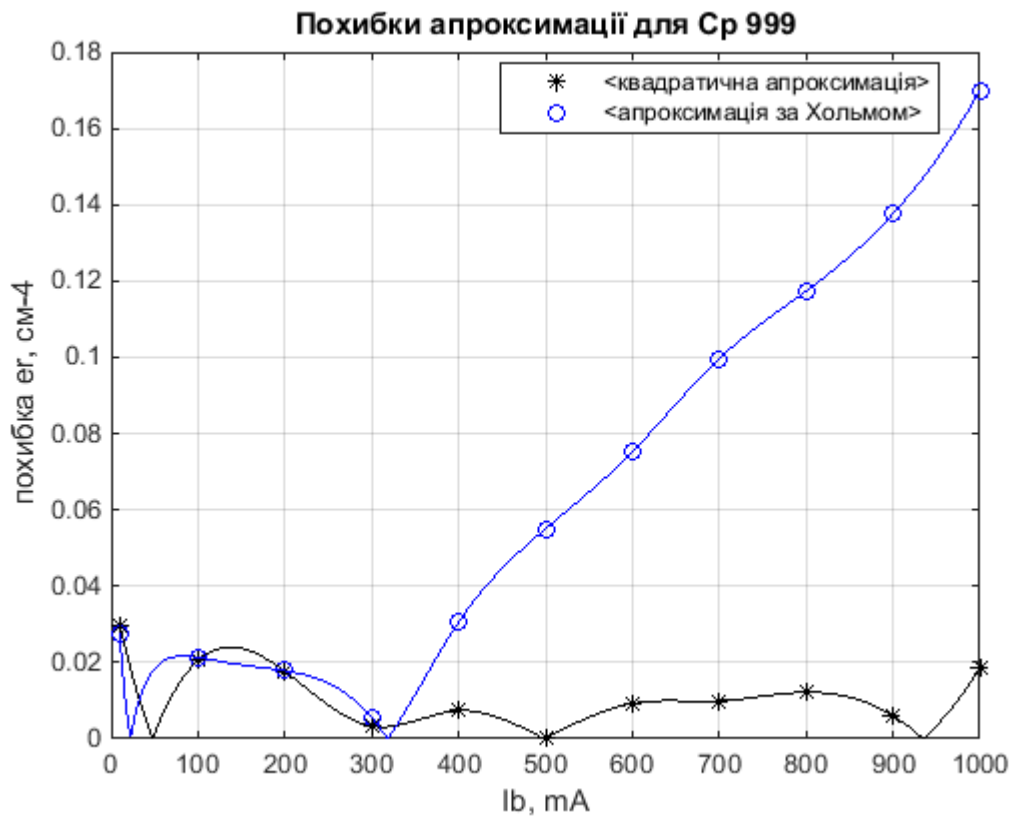


Рисунок 2.14 – Похибка емпіричної формули (2.80) та квадратичної моделі (2.85) для сплаву Cr 999

В результаті дослідження виявлено, що середня похибка відомої емпіричної формули Р. Хольма (2.80) для срібних контактів складає 9%, що свідчить про задовільно підібрану модель (від 7% до 15%) [91], а для моделей, отриманих в результаті дослідження: квадратичної моделі (2.77) 2%; степеневій (2.78) — 6%, що свідчить про добре підібрані моделі (до 7%) [91]. Таким чином використання отриманих моделей (2.77) і (2.78) дозволяє підвищити точність моделювання зменшивши середню похибку на 7% (з 9% до 2%) для квадратичної моделі і на 3% (з 9% до 6%) для степеневій моделі.

Висновки по розділу 2

Для визначення прийнятих показників ступеня зносу електричних контактів електро-механічного обладнання та окремих його складових (глибини та ширини контактного сліду який з'явився в результаті контактування) було розроблено метод моделювання зносостійкості на основі інженерної моделі зносу з урахуванням геометричної форми контактів.

Розроблено ідеалізовану енергетичну модель механічного зносу, що описує функціональні зв'язки вихідних параметрів (глибини H і хорди T) з основними факторами роботи (контактний тиск P_k , число циклів напрацювання N) для:

- а) контактних пар площина-сфера і циліндр-сфера в сталому режимі;
- б) двох видів деформації (сил тертя і сил зрізу);
- в) двох видів енергії сил зносу (постійної і змінної).

Встановлено, що залежність параметрів зносу від контактного тиску і числа циклів напрацювання має показову залежність, при цьому показник ступеня при контактному тиску збільшується з ростом останнього за рахунок зміни виду деформації, як при постійній, так і змінній енергії сил зносу.

Проведено теоретичні дослідження реального зносу розглянутих електричних контактних пар. Встановлено, що в реальній парі площина-сфера закономірності зносу можуть відрізнятися від ідеалізованих моделей. Для контактної пари циліндр-сфера повністю застосовні ідеалізовані моделі зносу.

Розроблено методику обліку додаткового зносу електричної контактної пари ковзання за рахунок струмової комутації. Запропоновано математичну модель струмового зносу. Метод полягає в оцінці частини об'єму зносу від впливу струму у загальному об'ємі (ширині) контактного сліду який з'явився в результаті контактування.

РОЗДІЛ 3

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЗНОСУ СЛАБКОСТРУМОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ КОНТАКТНИХ ПАР КОВЗАННЯ

3.1 Вибір допустимих меж зносу слабкострумових електричних контактних пар ковзання

Точна оцінка терміну служби важлива для підвищення надійності та оптимізації необхідних для цього витрат. Ця оцінка використовується при призначенні ремонтів і замін компонентів при планових зупинках, дозволяючи уникнути непередбачених і дорогих відмов [55]. Ключем до підвищення надійності електричних контактів є можливість аналізу експлуатаційного досвіду, надійної діагностики та прогнозування їх ресурсу [3].

В процесі тертя зношуються як обмотка, або активний шар плівки потенціометрів, так і струмознімач (контакт або щітка).

У плівкових потенціометрів величина зносу визначається мінімально можливою величиною товщини плівки [92], [93], [94].

Допустима величина зносу дротяних потенціометрів залежить від механічної міцності проводу, яка визначається за допустимим внутрішнім напруженням, що виникають за рахунок різниці коефіцієнтів лінійного розширення обмотки і каркаса при заданому діапазоні зміни температур [93], [94]. Продукти зносу, які виникають в процесі тертя при малих міжвиткових відстанях, можуть накопичуватися, що призводить до закорочення окремих витків [92], [78].

Враховуючи викладене, була обрана допустима величина глибини зносу по діаметру проводу $H \leq 0,2 \cdot d$ або еквівалентне значення меншої хорди майданчика зносу проводу [94]: $T_g \leq 0,8 \cdot d$.

Дана величина зносу зменшує небезпечний перетин проводу обмотки на 14% і гарантує додатковий міжвитковий проміжок по $0,1 \cdot d$ на обидві сторони проводу, що забезпечує безвідмовну роботу приладу [93].

Допустимий знос контакту струмознімача визначається точнісними параметрами приладу і електричною схемою його роботи.

Новий контакт струмознімача контактує з кожним витком обмотки. В процесі тертя майданчик контактування за рахунок зносу контакту збільшується, що призводить до закорочення частини витків обмотки [95].

Розглянемо вплив кутової роздільної здатності приладу на роботу при відсутності і при наявності короткозамкнутих витків під контактом [95].

Якщо при переміщенні струмознімача в момент комутації закорочується тільки один виток, то кутова роздільна здатність $\delta\varphi$ буде величиною постійною по всій довжині намотування і рівною [96]:

$$\delta\varphi = \frac{\varphi_n}{n} = \delta_e \cdot \varphi_n, \quad (3.1)$$

де δ_e – електрична роздільна здатність;

φ_n – номінальний кут (або довжина) намотування;

n – число витків обмотки.

При наявності зносу, коли контакт струмознімача закорочує k витків, кутова роздільна здатність на крайніх ділянках обмотки приймає своє значення до величини $\frac{1}{2} \cdot k \cdot \delta\varphi$, якщо відлік кута вести як і раніше від осі контакту.

При цьому електрична роздільна здатність приладу без природної нульової точки на ділянках $\varphi_1 = \frac{1}{2} \cdot k \cdot \delta\varphi$ і $\varphi_2 = \varphi_n - \frac{1}{2} \cdot k \cdot \delta\varphi$ буде

дорівнювати нулю, а на проміжному змінить своє значення з $\delta_e = \frac{1}{n}$ до

$\delta_e = \frac{1}{n-k}$. На рис. 3.1 пряма 1 представляє випадок зміни напруги при

точковому контактуванні, а пряма 2-для випадку наявності k замкнутих витків під контактом [96].

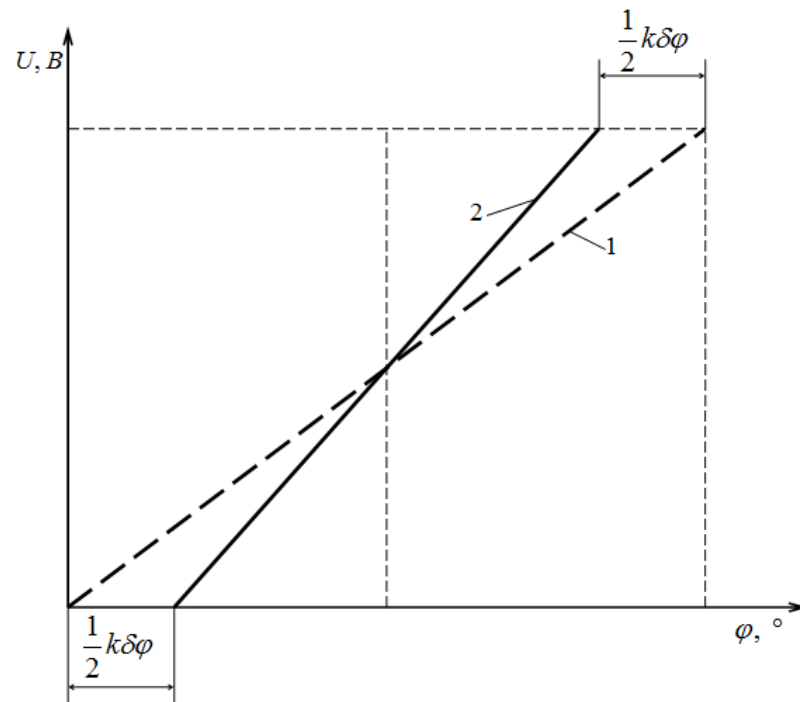


Рисунок 3.1 – Залежність зміни вихідної напруги потенціометра зі штучною нульовою точкою при закорочуванні струмознімачем k витків обмотки

У приладі з природною нульовою точкою з'являються додаткові зони нечутливості і поблизу нуля. На рис. 3.2 пряма 1 залежності $u = f(\varphi)$ при точковому контактуванні залишиться незмінною, а при наявності k замкнутих контактом витків на прямій 2 з'явиться додатковий перегин.

В цьому випадку для точкового контакту електрична роздільна здатність залишиться колишньою $\delta_e = \frac{1}{n}$, а при наявності k замкнутих витків

стане рівною $\delta_e = \frac{1}{n - 2 \cdot k}$. Внаслідок зносу контакту відбувається зміщення

точок початку і кінця контактування, що призводить до появи гістерезисної

петлі шириною $\pm \frac{1}{2} \cdot k \cdot \delta\varphi$.

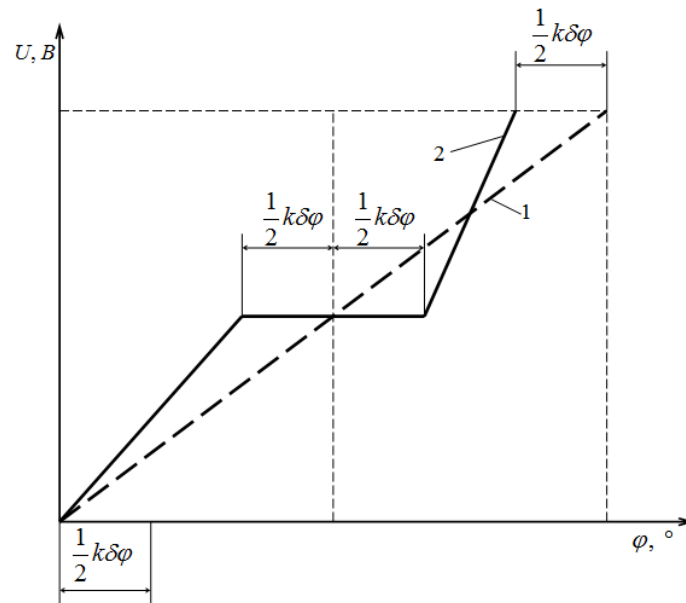


Рисунок 3.2 – Залежність зміни вихідної напруги потенціометра з природною нульовою точкою при закорочуванні струмознімачем k витків обмотки [96]

Гранична величина зносу контакту в цьому випадку буде визначатися величиною допустимої зони нечутливості системи і величиною кутової роздільної здатності приладу.

Величина зносу контакту T_k для k допустимих постійно закорочених витків може бути визначена за формулою:

$$T_k \leq (k+1) \cdot t + a = (k+1) \cdot d + (k+2) \cdot a, \quad (3.2)$$

де t – крок намотування, рівний $t = \alpha + a$;

d – чистий діаметр дроту;

a – міжвиткова відстань.

Для випадку відсутності постійно закорочених витків, максимально допустимий знос контакту складе:

$$T_0 \leq t + a = d + 2 \cdot a. \quad (3.3)$$

У приладах, що працюють в схемах стеження з природною нульовою точкою, допустима величина зносу контакту T_0 згідно (3.3) може бути обмежуючою технічний ресурс, ланкою всього потенціометра. У той же час для інших потенціометрів зі штучною нульовою точкою слабкою ланкою є знос обмотки, так як згідно (3.2) $T_k > T_0$.

На рис. 3.3 подані результати експериментальної перевірки впливу закорочування витків контактом для обох випадків.

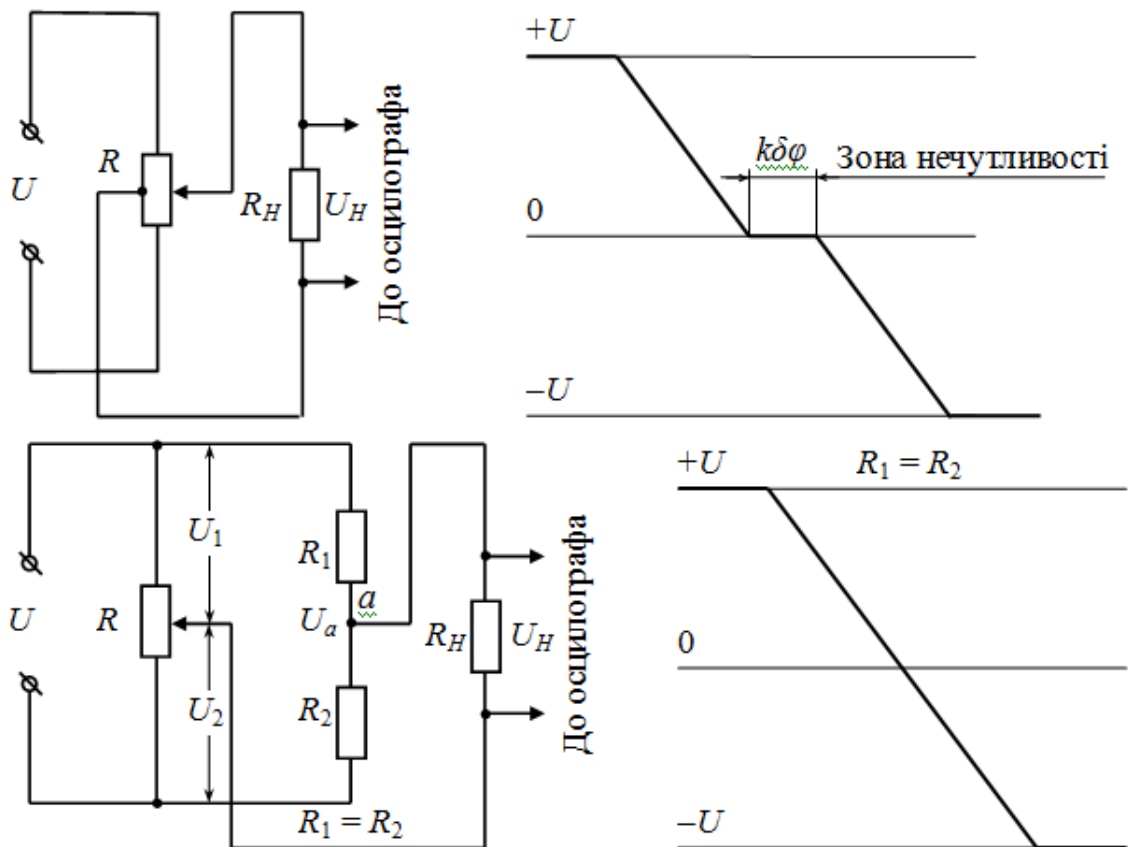


Рисунок 3.3 – Схеми зняття сигналу з потенціометра з середньою точкою і осцилограми роботи потенціометра при зношеному контакті струмознімача:

- а) потенціометр із середньою точкою, відпаяною безпосередньо від середнього витка; б) той же потенціометр і той же струмознімач, але середня точка створена штучно дільником R_1, R_2 .

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. 3.4).

Прийнявши $h \approx t - a = d$, можна записати, що

$$d^2 = D\Delta - \Delta^2. \quad (3.4)$$

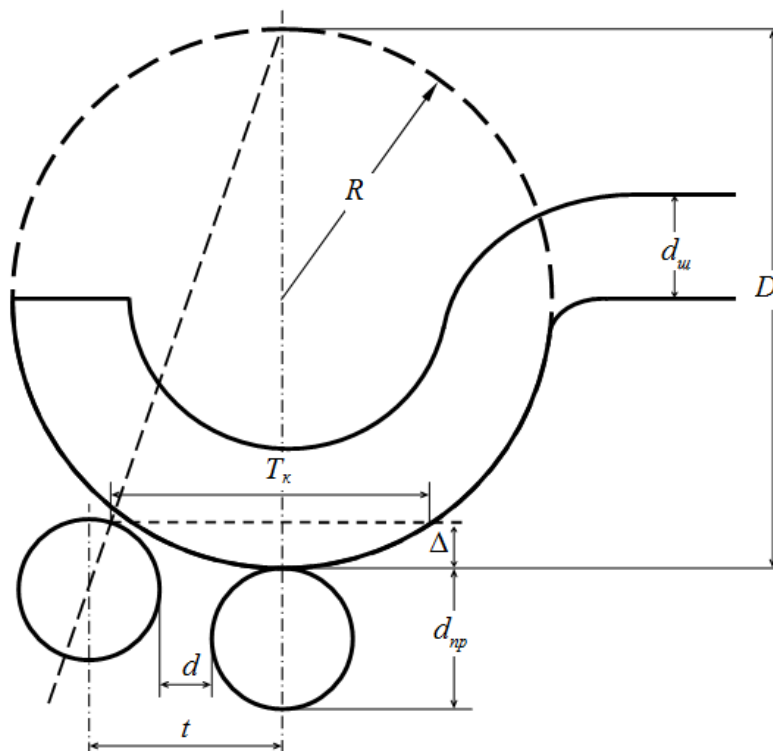


Рисунок 3.4 – Робота контакту при наявності витків обмотки потенціометра, що западають

Фото потенціометра типу ППБ-15Г13 з новим контактом і зношеним в результаті напрацювання $N = 50000$ циклів подано на рис. 3.5.

Нехтуючи через малість Δ^2 , отримуємо

$$R \leq \frac{d^2}{2\Delta}. \quad (3.5)$$

Якщо прийняти допустиму величину нерівномірності намотування по висоті, рівній половині допустимої величини зносу дроту [93]

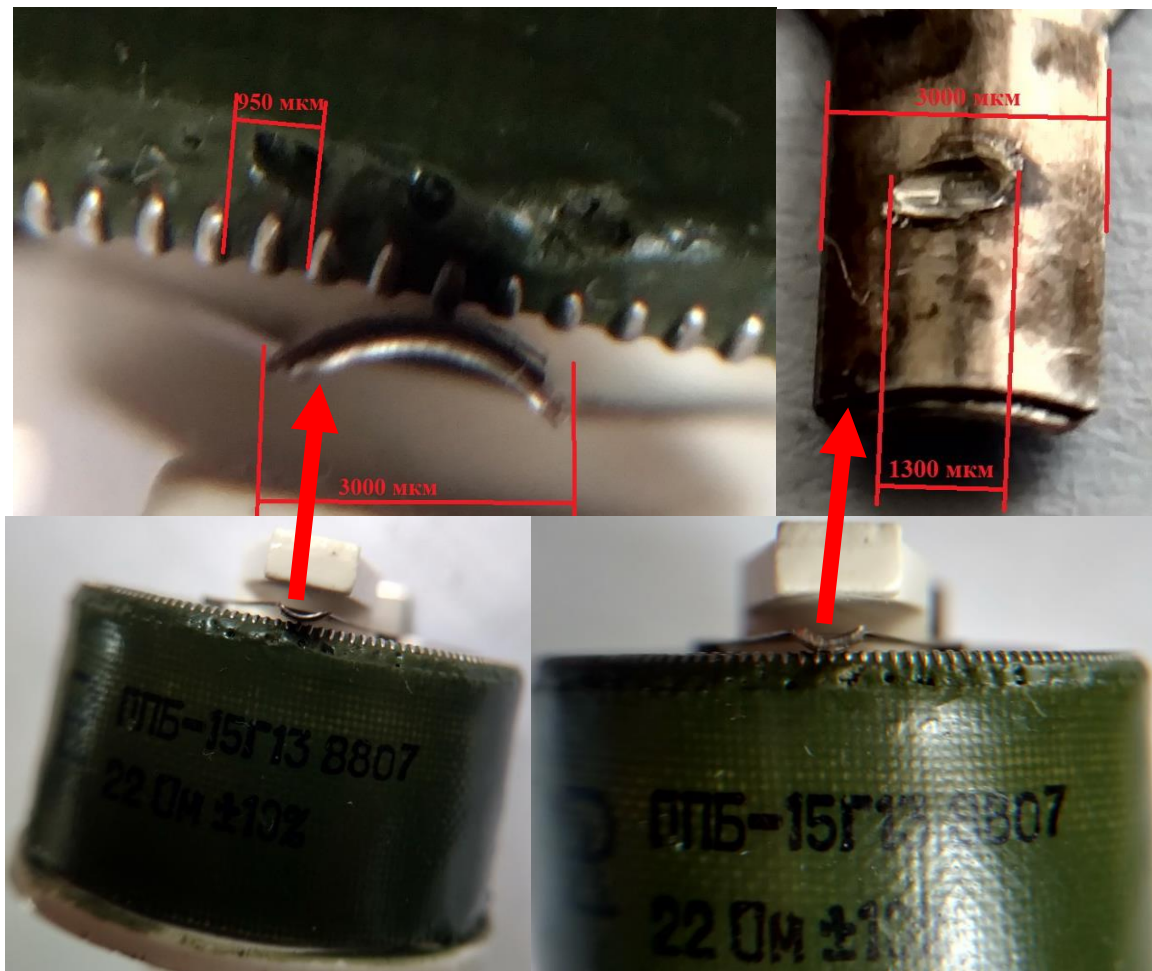
$$\Delta = \frac{0,2 \cdot d}{2} = 0,1 \cdot d, \quad (3.6)$$

то граничне значення радіуса контактування з (3.5) має бути:

$$R \leq 5 \cdot d. \quad (3.7)$$

При малих діаметрах проводу через малість радіуса контактування струмознімачі виконуються у вигляді "мухолапки" з діаметром щітки [93]

$$d_{uz} = (2 \div 3) \cdot d. \quad (3.8)$$



новий контакт

зношений контакт

Рисунок 3.5 – Потенціометр типу ППБ-15Г13 з новим контактом (справа) і зношеним (зліва) в результаті напрацювання $N = 50000$ циклів

При цьому мінімальний радіус заокруглення щітки приймає значення [93]

$$R \geq 2 \cdot d_{uz}. \quad (3.9)$$

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

$$H_k = \frac{T_k^2}{8 \cdot R}. \quad (3.10)$$

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.

Запропонований підхід до вимірювання основних параметрів зносу на прикладі потенціометра типу ППБ-15Г13 при кількості циклів напрацювання $N = 50000$ подано на рис. 3.6. Визначення розмірів хорди зносу проводиться шляхом порівняння і пропорційного перерахунку виміряного розміру контакту безпосередньо по збільшеному зображенню.

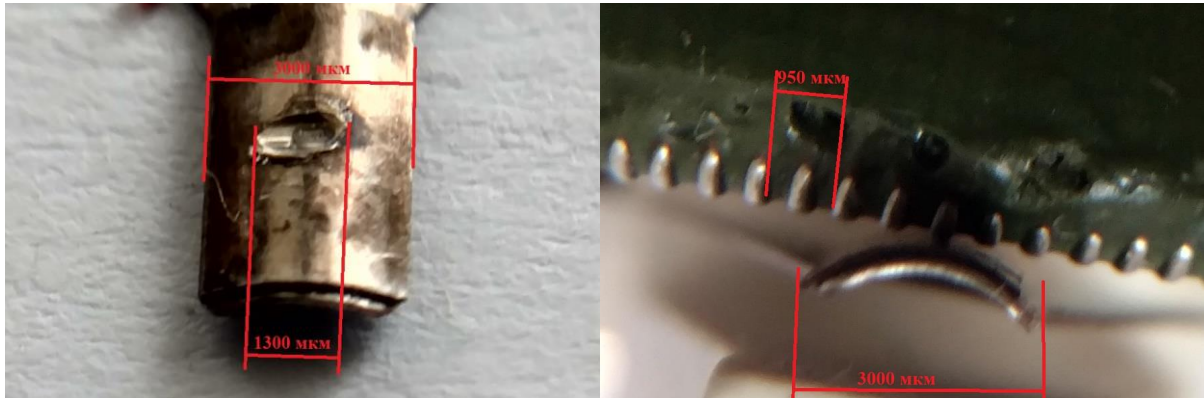


Рисунок 3.6 – Параметри зносу контакту потенціометра ППБ-15Г13

3.2 Методика прогнозування зносостійкості слабкострумівих електричних контактних пар ковзання

Одна з основних гіпотез про природу передбачення майбутнього полягає в тому, що висновки про можливість і ймовірності майбутньої події робляться на підставі вивчення, аналізу та узагальнення минулого явища. Ця ідея лежить в основі статистичної теорії передбачення [97].

У реальних явищах природи розрізняють три складових:

- 1) детерміновану частину, яка піддається точному розрахунку індуктивним методом;
- 2) імовірнісну частину, яка визначається дедуктивним методом після тривалого спостереження за процесом з метою визначення ймовірнісних характеристик;
- 3) чисто випадкову частину.

Синтез детермінованої і ймовірнісної частин забезпечує найкраще передбачення. Прийнято розрізняти два основних підходи до задачі прогнозування – подієвий і прецесійний, крім цього розрізняють точкові і інтервальні прогнози [98].

Існуючі основні методи прогнозування можна розбити на три групи [97].

Перша група методів ґрунтується на екстраполяції, яка передбачає тільки кількісні зміни.

Друга група методів пов'язана з моделюванням, побудовою математичної моделі досліджуваного явища і дозволяє передбачити як кількісні так і якісні оцінки.

Третя група — методи експертних оцінок (метод Делфі та інші).

Для прогнозування використовуються закономірності детермінованих і стохастичних подій [98]. Первинна стохастична інформація попередньо повинна бути оброблена в просторі трьох вимірів: параметр, час, ймовірність (куб інформації). Так само повинні бути впорядковані і параметри процесу за ступенем інформативності (за методом вагових коефіцієнтів, за величиною дисперсії або за критерієм знаків) [97], [99].

Засобом реалізації прогнозуючих оцінок служать розрахунки, моделювання та випробування.

При дослідженні багатofакторних процесів отримана інформація завжди носить стохастичний характер і вимагає формалізації з метою встановлення головних, основних закономірностей, досліджуваного об'єкта — його моделі. Одним з поширених в даний час методів побудови математичних моделей є ідентифікація [100], [101], [102].

У багатьох випадках побудова моделі починається з використання основних фізичних законів.

Побудова моделі з використанням методів ідентифікації зводиться до наступних етапів [97]:

а) вибір структури моделі з фізичних міркувань;

- б) підгонка параметрів до наявних даних;
- в) перевірка і підтвердження моделі;
- г) використання моделі за призначенням.

Під математичною моделлю мають на увазі оператор, яким цей об'єкт описується. Він може бути представлений: диференціальним рівнянням, перехідною функцією, частотною характеристикою, алгебраїчним рівнянням та ін.

При ідентифікації ставиться завдання не визначення самого оператора, а встановлення його наближеного значення, його оцінки [100].

Для прогнозування зносостійкості контактних пар був використаний метод ідентифікації, що дозволяє отримати модель зміни хорди сліду зносу проводу T як основного параметра в залежності від впливу найбільш істотних факторів експлуатації: контактного тиску P_k , числа циклів напрацювання ресурсу N і струму комутації I при інших постійних факторах (постійному значенні шляху і швидкості переміщення контакту, нормальних умов навколишнього середовища). Вибір зазначених параметрів базується на матеріалах вже наявних досліджень щодо зносу [65], [71], [75], [98], [103].

Дослідження впливу кожного фактора повинно проводитися методом активного експерименту на 3-5 режимах роботи електричних контактних пар з виміром 10-20 точок зносу.

Методика обробки результатів випробувань представлена на рис. 3.7 у вигляді узагальненої структурної схеми моделювання та прогнозування зносостійкості контактних пар, що складається з ряду етапів.

Етап I передбачає впорядкування даних результатів випробувань за всіма режимами і чинниками, що впливають, в лінійному і логарифмічному масштабах у вигляді варіаційних рядів.

На II етапі проводиться імовірно-статистична обробка результатів випробувань по кожному режиму роботи заданого фактора.



Рисунок 3.7 – Блок-схема обробки результатів випробувань, моделювання та прогнозування зносостійкості

При цьому визначаються частоти варіаційного ряду $V_i = \frac{W_i}{\Sigma n}$, різниця між суміжними точками частостей $D_i = V_i - V_{i-1}$, перевіряється відповідність отриманого емпіричного розподілу теоретичному за критерієм Колмогорова [104]

$$D_{\max} \cdot \sqrt{n} < 1. \quad (3.11)$$

Потім для всіх m режимів роботи при заданому факторі, що впливає визначають математичне очікування і дисперсію ($\lg T_{cp}$, $S_{\lg T_{cp}}$), а також перевіряють однорідність отриманих дисперсій за критерієм Кохрена [105]:

$$\omega_{\max} = \frac{[S_i^2]_{\max}}{\sum_{i=1}^m S_i^2}. \quad (3.12)$$

На етапі III перевіряється похибка результатів випробувань по кожному режиму роботи. Відносна похибка результатів випробувань δ визначалася, стосовно логарифмічно-нормального закону розподілу, виходячи з об'єму вибірки випробувань n і рівня двосторонньої довірчої ймовірності α або квантиля u_α з системи рівнянь [106]:

$$n = R \cdot Q, \quad (3.13)$$

$$Q = \frac{u_\alpha^2}{\delta^2}, \quad (3.14)$$

де R – коефіцієнт, що залежить від величини середнього квадратичного відхилення $S_{\lg T_{cp}}$ і визначається таблично [106].

Похибка дослідів визначалася за заданими значеннями коефіцієнта $Q = \frac{n}{R}$ і довірчої ймовірності α також таблично [106].

При цьому величини похибок вимірювання, дослідів і необхідна похибка повинні задовольняти нерівності:

$$\delta_{\text{вим}} \leq \delta_{\text{досл}} \leq \delta_{\text{тр}}. \quad (3.15)$$

Якщо $\delta_{\text{досл}} > \delta_{\text{тр}}$, то повинні уточнюватися вихідні дані шляхом збільшення об'єму випробувань.

Етап V передбачає для кожного впливаючого фактора проведення лінійного регресійного аналізу за методом мінімуму середньої квадратичної похибки [105].

Теоретичною передумовою для визначення окремих параметрів теоретичної лінії регресії по кожному з факторів, що впливають є енергетична модель зносу (див. розділ 2), яка виражається рівнянням:

$$T = K_T \cdot P_{\kappa}^{m_{PT}} \cdot N^{m_{NT}}. \quad (3.16)$$

Це рівняння в логарифмічній системі координат є лінійним.

Теоретичний процес математичного обґрунтування моделі становить IV етап методики.

Рівняння теоретичної лінії регресії, наприклад для залежності $T = f(N)$ при $P_{\kappa} = 1 \text{ cH}$ приймає наступний вигляд [105]:

$$Y = a + b(x - \bar{x}) = Y_0 + b \cdot x, \quad (3.17)$$

де

$$a = \bar{y} = \frac{\sum y_i}{n}; \quad \bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}; \quad y_i = \lg N_i; \quad x_i = \lg T_i; \quad b = \frac{\sum (x_i - \bar{x}) \cdot y_i}{\sum (x_i - \bar{x})^2},$$

або $Y_0 = \lg K_T$ так як при $P_{\kappa} = 1 \text{ кH}$ значення $m_{PT} \lg P_{\kappa} = 0$ і $b \cdot x = m_{NT} \cdot \lg N$.

Аналогічним чином до виду (3.17) приводиться залежність $T = f(P_{\kappa})$ при $N_i = \text{const}$ і визначається показник степені m_{PT} .

Етап VI передбачає визначення меж довірчої області для оцінки теоретичних ліній регресії кожного з факторів, що впливають. При цьому загальна вибіркова дисперсія визначається з рівняння [105]:

$$S_Y^2 = S_a^2 + S_R^2 \cdot (x - \bar{x}), \quad (3.18)$$

де

$$S_a^2 = \frac{S^2}{m}; \quad S_b^2 = \frac{S^2}{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2}; \quad S^2 = \frac{1}{m-2} \cdot \sum_{i=1}^m (y_i - Y_i)^2.$$

Довірчі межі для параметрів рівняння теоретичної лінії регресії визначаються з урахуванням відповідних дисперсій за формулами:

$$a - t_{\alpha,k} \cdot S_a < a < a + t_{\alpha,k} \cdot S_a; \quad (3.19)$$

$$b - t_{\alpha,k} \cdot S_b < b < b + t_{\alpha,k} \cdot S_b; \quad (3.20)$$

$$Y - t_{\alpha,k} \cdot S_Y < Y < Y + t_{\alpha,k} \cdot S_Y, \quad (3.21)$$

де $t_{\alpha,k}$ – значення коефіцієнта Стюдента для рівня значущості α і числа

степенів свободи $k = \sum_{i=1}^m n_i - 2$.

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 інформацій, починаючи з етапу I.

Етап VII являє собою оператор обробки всіх реалізацій n -факторного аналізу у вигляді повної моделі процесу зносу:

$$T = K_{TI} \cdot P_{\kappa}^{m_{PT}} \cdot N^{m_{NT}}, \quad (3.22)$$

$$K_{TI} = K_T \cdot (1 + K_I \cdot I^{\alpha})^{m_{NT}}. \quad (3.23)$$

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 (етап IV).

Етап VIII передбачає операцію прогнозування зносостійкості різних типів електричних контактних пар дротяних потенціометрів.

Нижнє гарантоване значення допустимого зносу хорди T_{gap} може бути визначено за такою формулою [106]:

$$\lg T_{gap} = \lg T_{дон} + 1,51 \cdot S_{\lg T}^2 - t_{\alpha,k} \cdot \frac{S_{\lg T}}{\sqrt{n}} \cdot \sqrt{1 + 2,65 \cdot S_{\lg T}^2}, \quad (3.24)$$

де $t_{\alpha,k}$ – значення коефіцієнта Стюдента для рівня значущості α і числа степенів свободи $k = \sum_{i=1}^m n_i - 2$, $S_{\lg T}$ – середнє значення дисперсії з усіх дослідів даної електричної контактної пари; $T_{дон}$ – допустимий, рівень зносу проводу обмотки приладу. Виходячи з допустимого гарантованого рівня зносу проводу (рівняння 3.24), використовуючи модель зносу (рівняння 3.22, 3.23), легко оцінити гарантований рівень зносостійкості N_{zap} :

$$\lg N_{zap} = \frac{\lg T_{zap} - \lg K_{TI} - m_{PT} \cdot \lg P_k}{m_{NT}}. \quad (3.25)$$

Для інженерної практики з метою вибору необхідного рівня N , P_k або K_I може бути рекомендований графічний метод розрахунку.

Відомо [92], що основними факторами, що обмежують технічний ресурс є надійність контактування і зносостійкість, при цьому перший фактор найбільш критичний для електричних контактних пар з неблагородних металів, а другий – для благородних.

У ряді випадків, особливо при великих контактних тисках, обумовлених необхідністю підвищення надійності контактування приладу зносостійкість є обмежуючим технічний ресурс фактором і для електричних контактних пар з неблагородних металів.

Отже в більшості випадків реальної експлуатації приладів за допустимою величиною зносостійкості можна проводити оцінку їх технічного ресурсу. В першу чергу це відноситься до приладів, обмотки яких виконані з благородних металів.

Узагальнена структурна схема алгоритму моделювання зносостійкості контактних пар ковзання представлена на рис. 3.8. Так як надійність контактування істотно підвищується з ростом контактного тиску, то при наявності відповідної моделі відмов $q = f(R_k, P_k, V, N)$ і моделі зносу $T = \varphi(P_k, N)$ може бути вирішена задача оптимального вибору параметрів P_k і N роботи електричної контактної пари [107].

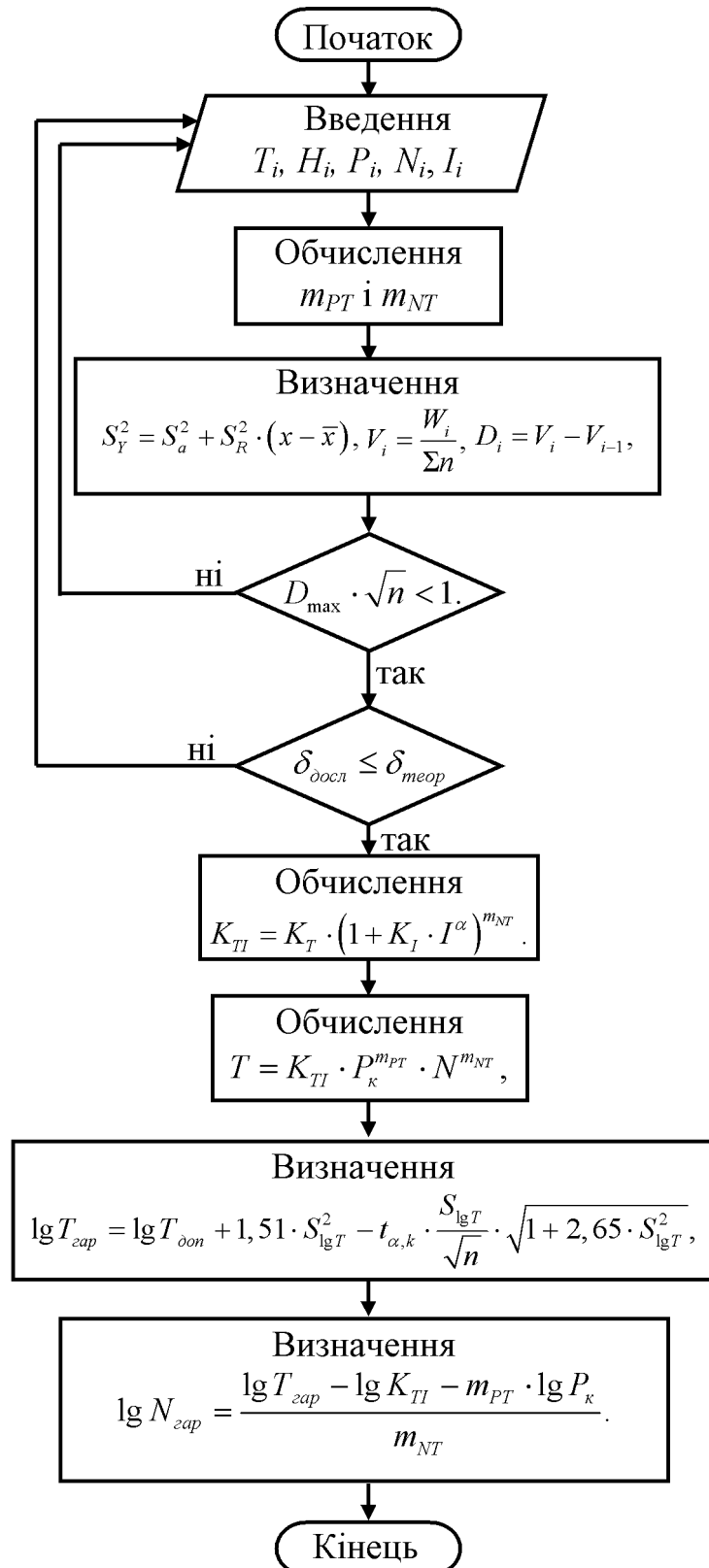


Рисунок 3.8 – Узагальнена структурна схема алгоритму моделювання зносостійкості контактних пар ковзання

3.3 Моделювання зносу знеструмлених слабкострумівих електричних контактних пар ковзання засобами MATLAB

Визначення показників степені і коефіцієнтів пропорційності рівняння зносу за параметром T проводилося методом найменших квадратів за допомогою регресійного аналізу в програмі MATLAB [89].

Так за даними вимірювань зносу потенціометрів типу ПП2-12 (рис.3.9), (табл. 3.1) була побудована залежність $T(N)$ при $P_k = 10 \text{ сН}$, представлена на рис. 3.10, звідки випливає, що показник степені $1/4$, що відповідає теоретичним значенням для ідеалізованої пари циліндр-сфера (2.38).

Таблиця 3.1 – Залежність величини середніх значень хорди зносу від кількості циклів напрацювання при тиску $P_k = 10 \text{ сН}$.

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

Вимірювання параметрів зносу потенціометрів ПП2-12 для $N = 100000$ циклів подано на рис. 3.9.

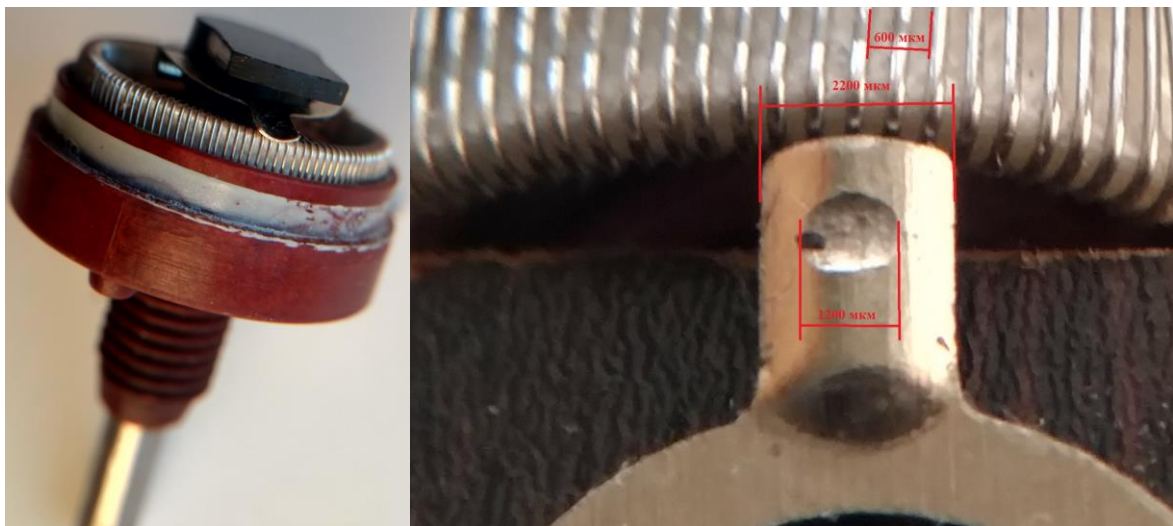


Рисунок 3.9 – Параметри зносу контакта потенціометра ПП2-12

Для знеструмленої контактної пари при $P_k = \text{const}$ залежність (3.22) приймає вигляд

$$T = K_{PTI} \cdot N^{m_{NT}}, \quad (3.26)$$

де

$$K_{PTI} = K_{TI} \cdot P_{\kappa}^{m_{PTI}}. \quad (3.27)$$

Визначаємо коефіцієнти m_{NT} та K_{PTI} моделюванням в MATLAB. Для проведення степеневі апроксимації в MATLAB прологарифмуємо праву і ліву частини рівняння (3.26). В результаті отримаємо

$$\ln T = \ln(K_{PTI} \cdot i^{m_{NT}}) \text{ або } \ln(T) = \ln(K_{PTI}) + m_{NT} \cdot \ln N$$

Якщо ввести заміну $y = \ln(T)$, $b = \ln(K_{PTI})$, $x = \ln N$ то степенева функція перетворюється на поліном першого порядку:

$$y = b + m_{NT} \cdot x. \quad (3.28)$$

Враховавши, що $K_{PTI} = e^b$ для степеневі апроксимації в MATLAB отримаємо:

```
N=[500 5000 10000 20000];
```

```
T=[150 230 300 390];
```

```
h=500;
```

```
n=0:h:25000;
```

```
x=log(N);
```

```
y=log(T);
```

```
coeff1=polyfit(x,y,1);
```

```
coeff1(2)=exp(coeff1(2));
```

```
mNT= coeff1(1)
```

```
KPTI= coeff1(2)
```

```
t1= KPTI*n.^ mNT;
```

```
t10= KPTI*N.^ mNT;
```

```
plot(n,t1,'-k',N,T,'ok'); grid on;
```

```
xlabel('N, цикл')
```

```
ylabel('T, мкМ')
```

```
title('Знос знеструмлених слабкострумових електричних контактних пар')
```

```
legend('<ступенева апроксимація>', '<експериментальні точки>')
```

```
mNT = 0.2497
```

$K_{PTI} = 30.4642$

Коефіцієнти для механічного зносу (3.26), отримані в результаті моделювання:

$$m_{NT} = 0,2497 \text{ і } K_{PTI} = 30,4642.$$

Результат моделювання механічного зносу слабкострумових електричних контактних пар ковзання в MATLAB з використанням регресійного аналізу подано на рис. 3.7.

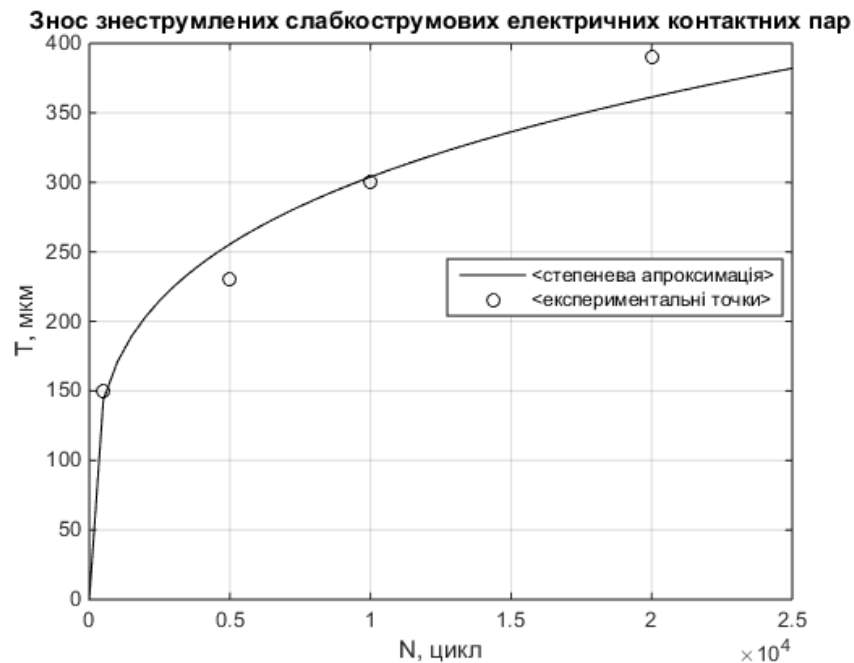


Рисунок 3.10 – Механічний знос слабкострумових електричних контактних пар ковзання при моделюванні в MATLAB з використанням регресійного аналізу

Визначаємо похибку апроксимації для отриманої залежності та експериментальних даних при моделюванні в MATLAB за (2.74):

```
>> m=length(T);
er=1/m*sum(abs(T-tl0)./tl0)*100
ert=abs(T-tl0);
plot(N,ert,'-k'); grid on;
xlabel('N, цикл')
ylabel('похибка er, мкм')
title('Похибка апроксимації степеневою функцією для знестр. КП')
```

$$er = 5.8821$$

Середня похибка для моделей, отриманих в результаті регресійного аналізу при дослідженнях в MATLAB і складає

$$\Delta s_{\text{апрокс.}} = 5,8821.$$

Результат визначення похибки моделювання механічного зносу слабкострумівих електричних контактних пар ковзання в MATLAB з використанням регресійного аналізу подано на рис. 3.11.

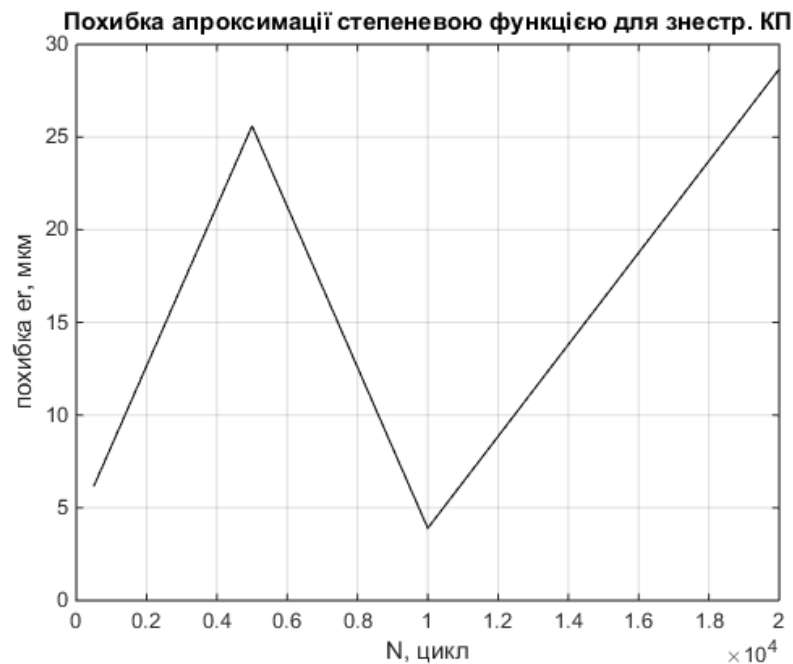


Рисунок 3.11 – Похибка моделювання механічного зносу слабкострумівих електричних контактних пар ковзання в MATLAB з використанням регресійного аналізу

Коефіцієнт для механічного зносу моделі (2.27), отриманий в результаті теоретичного дослідження:

$$m_{NT} = \frac{1}{4}.$$

Визначимо коефіцієнт K_{PTI} , як середньє значення всіх K_{PTI} , отриманих в результаті обробки експериментальних даних:

$$K_{PTI} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n K_{PTI_i} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{T_i}{N_i^{\frac{1}{4}}} \right),$$

де n – кількість експериментальних даних.

При використанні MATLAB отримаємо:

```
>> KPTI=sum(T./N.^(1/4))/length(T)
```

```
KPTI = 30.4670
```

Коефіцієнт для механічного зносу KPTI:

$$K_{PTI} = 30,467.$$

Визначаємо похибку теоретичної моделі та експериментальних даних при моделюванні в MATLAB за (2.74):

```
coeff1=[1/4 KP];
```

```
tl0= coeff1(2)*N.^coeff1(1);
```

```
er=1/length(T)*sum(abs(T-tl0)./tl0)*100
```

```
er = 5.8788
```

Середня похибка для теоретичної моделі складає

$$\Delta s_{теор.} = 5,8788.$$

В результаті дослідження виявлено, що середня похибка для 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%) [91]. Таким чином використання отриманих моделей механічного зносу дозволяє проводити моделювання зносостійкості слабкострумових електричних контактних пар ковзання з середнім рівнем достовірності отриманих результатів 94%.

3.4 Моделювання зносу слабкострумових електричних контактних пар ковзання при живленні їх постійним струмом засобами MATLAB

Визначення показників степені і коефіцієнтів пропорційності рівняння зносу за параметром T проводилося методом найменших квадратів за допомогою регресійного аналізу в програмі MATLAB.

Так за даними вимірювань (табл. 3.2) була побудована залежність 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, представлена на рис. 3.12.

Таблиця 3.2 – 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
$T-, мкм$	390	460	490	540	560
$T+, мкм$	390	500	570	590	680

Використавши залежності (3.22) і (3.23) з урахуванням (3.27)

$$T = K_{PTI} \cdot (1 + K_I \cdot I^\alpha)^{m_{NT}} \cdot N^{m_{NT}}, \quad (3.32)$$

або

$$K_{PTI} = \frac{T}{(1 + K_I \cdot I^\alpha)^{m_{NT}} \cdot N^{m_{NT}}} \quad (3.33)$$

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

$$\left(\frac{T}{K_{PTI} \cdot N^{m_{NT}}} \right)^{\frac{1}{m_{NT}}} - 1 = K_I \cdot I^\alpha,$$

$$T_{NT} = K_I \cdot I^\alpha, \quad (3.34)$$

де

$$T_{NT} = \left(\frac{T}{K_{PTI} \cdot N^{m_{NT}}} \right)^{\frac{1}{m_{NT}}} - 1. \quad (3.35)$$

Визначасмо коефіцієнти для (3.23) моделювання величини хорди зносу T_{-} , *мкм* для негативного полюса напруги в MATLAB з використанням регресійного аналізу [89].

```
>> mNT = 0.2497;
KPTI = 30.4642;
I=[0.5 1 1.5 3];
T=[460 490 540 560];
N=20000;
TNT=(T./KPTI/N^mNT).^(1/mNT)-1;
h=0.5;
i=0.4:h:3.5;
LI=log(I);
LT=log(TNT);
coeff1=polyfit(LI,LT,1);
coeff1(2)=exp(coeff1(2));
alfaiK=coeff1(1)
KiK=coeff1(2)
alfaiK = 0.6331
KiK = 2.5877
```

Результат моделювання величини хорди зносу T_{-} , *мкм* для негативного полюса напруги в MATLAB з використанням регресійного аналізу подано на рис. 3.12.

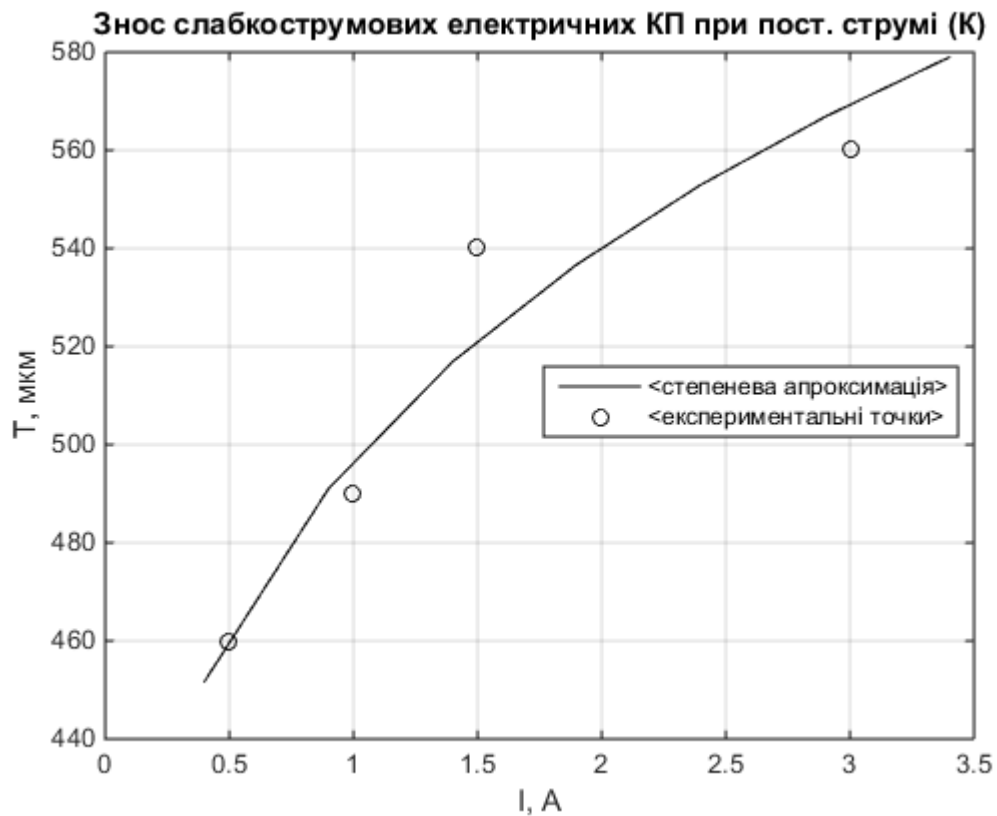


Рисунок 3.12 – Залежність величини хорди зносу $T-$, мкм для негативного полюса напруги в MATLAB з використанням регресійного аналізу

```
>> t1=KPTI*(1+KiK.*i.^alfaiK).^mNT.*N.^mNT;
t10=KPTI*(1+KiK.*I.^alfaiK).^mNT.*N.^mNT;
plot(i,t1,'-k',I,T,'ok'); grid on;
xlabel('I, A')
ylabel('T, мкм')
title('Знос слабкострумових електричних КП при пост. струмі (К)')
legend('<степенева апроксимація>', '<експериментальні точки>')
```

Результат визначення похибки моделювання величини хорди зносу $T-$, мкм для негативного полюса напруги в MATLAB з використанням регресійного аналізу подано на рис. 3.13.

```
>> m=length(T);
er=1/m*sum(abs(T-t10)./t10)*100
ert=abs(T-t10);
```

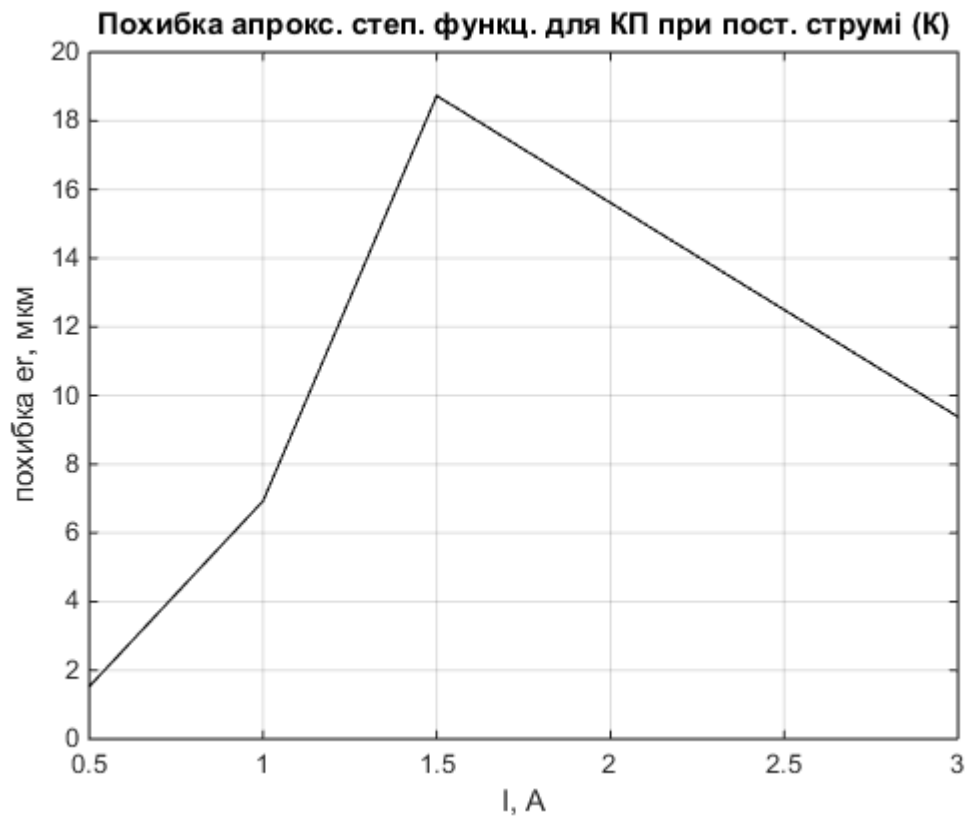


Рисунок 3.13 – Похибка моделювання величини хорди зносу T , мкм для негативного полюса напруги в MATLAB з використанням регресійного аналізу

```
plot(I,ert,'-k'); grid on;
xlabel('I, A')
ylabel('похибка ег, мкм')
title('Похибка апрокс. степ. функц. для КП при пост. струмі (К)')
er = 1.7414
```

Результат тривимірного моделювання величини хорди зносу $T(N, I)$, мкм від кількості циклів i струму для негативного полюса напруги в MATLAB з використанням регресійного аналізу подано на рис. 3.14.

```
>> [I,N]=meshgrid(0.5:0.5:3.0,500:500:20000);
TIK=KPTI*(1+KiK.*I.^alfaiK).^mNT.*N.^mNT;
mesh(I,N,TIK);
xlabel('I, A'); ylabel('N, цикл'); zlabel('T, мкм'); title ('Знос електричних КП при пост. струмі (К)')
```

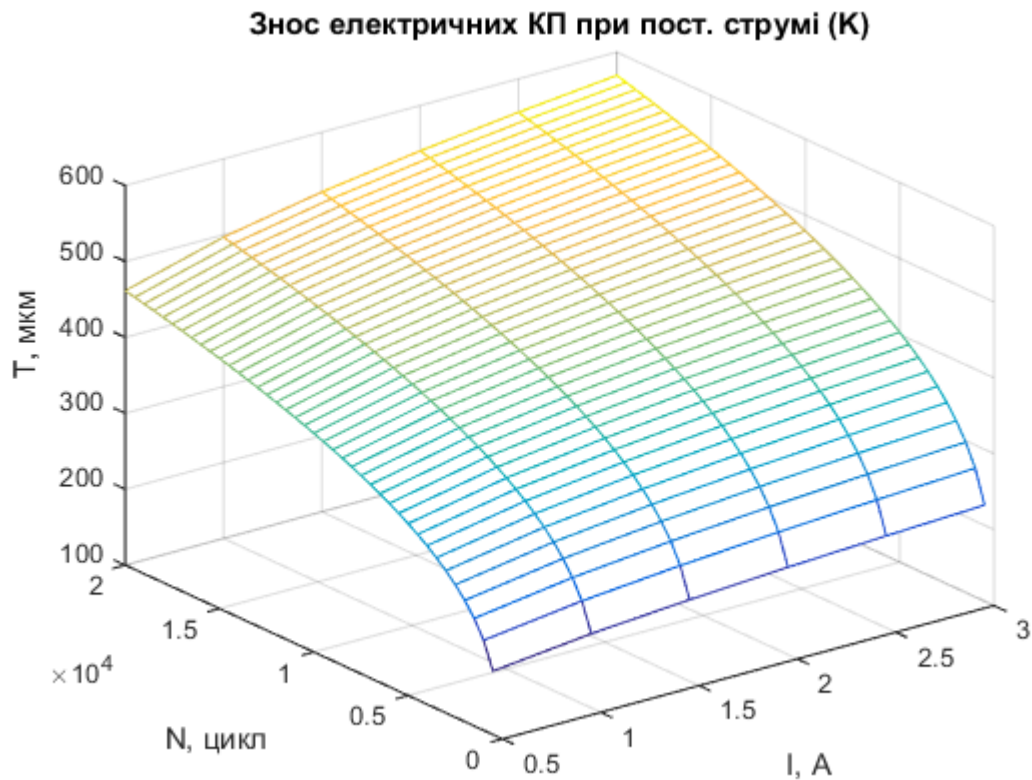


Рисунок 3.14 – Тривимірне моделювання величини хорди зносу $T(N, I)$, мкм від кількості циклів і струму для негативного полюса напруги в MATLAB з використанням регресійного аналізу

Результат моделювання величини хорди зносу T_+ , мкм для позитивного полюса напруги в MATLAB з використанням регресійного аналізу подано на рис. 3.15.

```
>> I=[0.5 1 1.5 3];
```

```
T=[500 570 590 680];
```

```
h=0.5;
```

```
i=0.4:h:3.5;
```

```
LI=log(I);
```

```
LT=log(T);
```

```
X=1;
```

```
coeff1=polyfit(LI,LT,X);
```

```
coeff1(2)=exp(coeff1(2));
```

```
coeff1=coeff1
```

```
tl= coeff1(2)*i.^coeff1(1);
```

```
tl0= coeff1(2)*I.^coeff1(1);
```

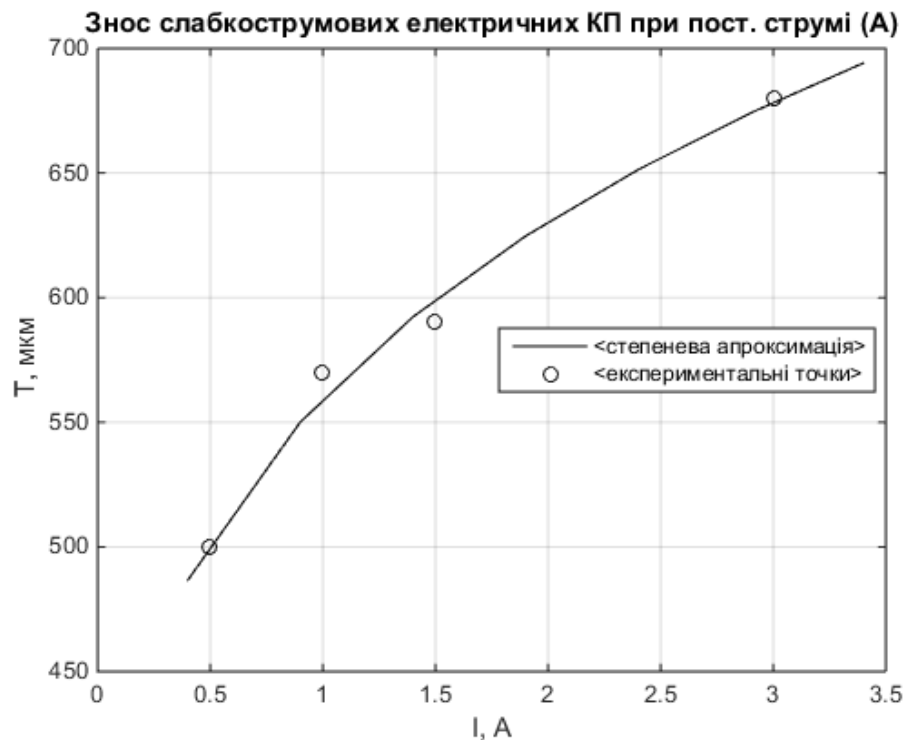


Рисунок 3.15 – Залежність величини хорди зносу T_+ , мкм для позитивного полюса напруги в MATLAB з використанням регресійного аналізу

```
plot(i,tl,'-k',I,T,'ok'); grid on;
```

```
xlabel('I, A')
```

```
ylabel('T, мкм')
```

```
title('Знос слабкострумових електричних КП при пост. струмі (А)')
```

```
legend('<степеневу апроксимацію>', '<експериментальні точки>')
```

```
coeff1 = 0.1674 562.0994
```

Результат визначення похибки моделювання величини хорди зносу T_+ , мкм для негативного полюса напруги в MATLAB з використанням регресійного аналізу подано на рис. 3.16.

```
>> m=length(T);
```

```
er=1/m*sum(abs(T-tl0)./tl0)*100
```

```
ert=abs(T-tl0);
```

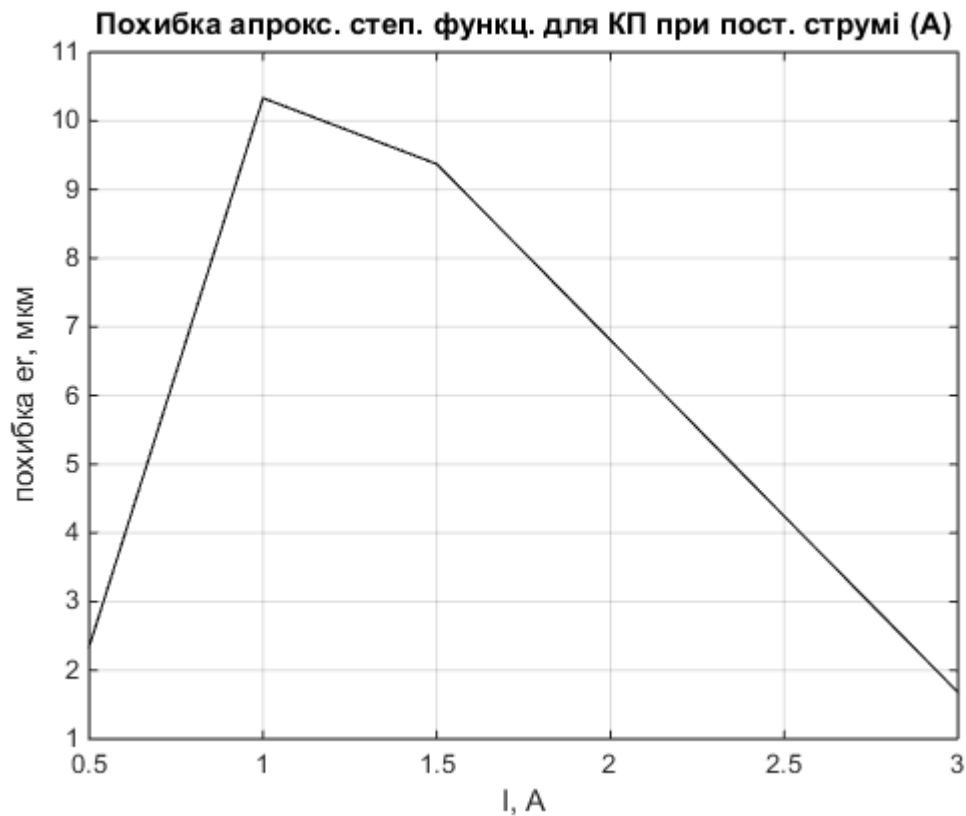


Рисунок 3.16 – Похибка моделювання величини хорди зносу $T-$, мкм для негативного полюса напруги в MATLAB з використанням регресійного аналізу

```
plot(I,ert,'-k'); grid on;
xlabel('I, A')
ylabel('похибка ег, мкм')
title('Похибка апрокс. степ. функц. для КП при пост. струмі (А)')
ег = 1.0311
```

Результат тривимірного моделювання величини хорди зносу $T+(N, I)$, мкм від кількості циклів і струму для негативного полюса напруги в MATLAB з використанням регресійного аналізу подано на рис. 3.17.

```
>> [I,N]=meshgrid(0.5:0.5:3.0,500:500:20000);
TIA=KPTI*(1+KiA.*I.^alfaiA).^mNT.*N.^mNT;
mesh(I,N,TIA);
xlabel('I, A'); ylabel('N, цикл'); zlabel('T, мкм'); title ('Знос електричних КП при пост. струмі (А)')
```

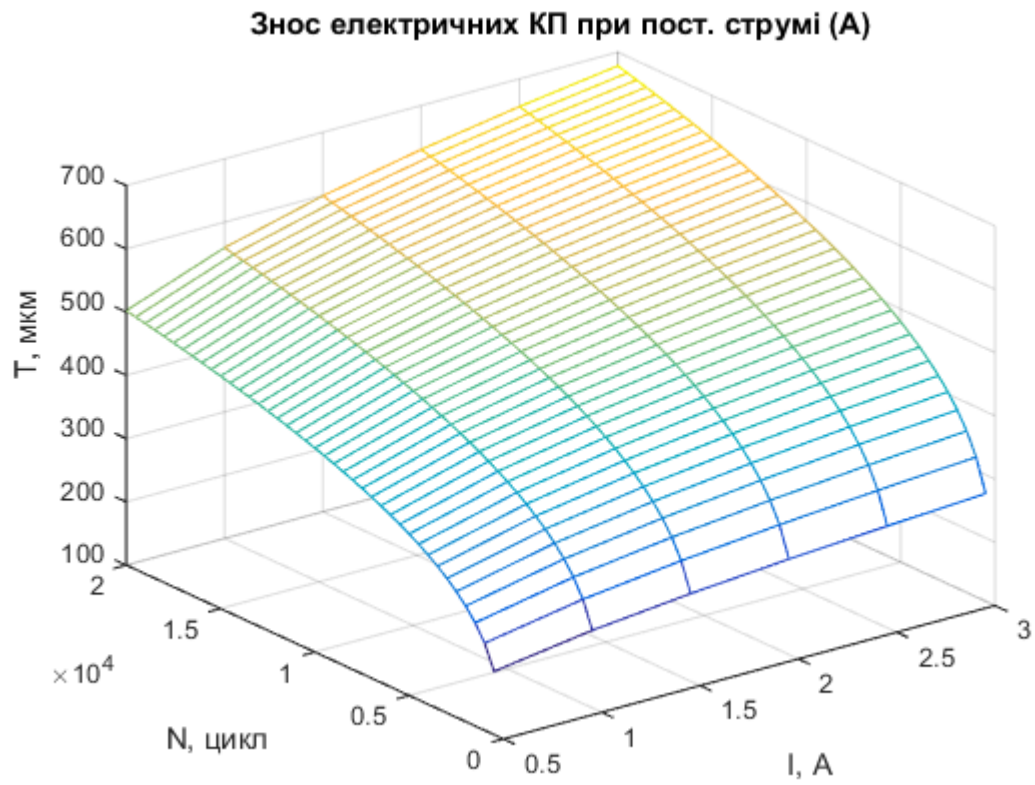



Рисунок 3.17 – Тривимірне моделювання величини хорди зносу $T(N, I)$, мкм від кількості циклів і струму для позитивного полюса напруги в MATLAB з використанням регресійного аналізу

Висновки по розділу 3

Проведений аналіз точнісних характеристик приладів роздільної здатності дозволив встановити допустимі параметри зносу проводу і контакту для слабкострумових електричних контактних пар ковзання потенціометрів та потенціометричних датчиків. Визначено, що допустимі межі зносу електричних контактних пар залежать від класу приладу, що визначає допустимі межі відхилення вихідних параметрів, і електричної схеми роботи приладу в апаратурі.

Встановлено, що в потенціометрах з природною нульовою точкою ресурс буде визначатися в основному майданчиком зносу контакту внаслідок обмеження по кутовій роздільній здатності. Тому при тих же точнісних характеристиках ресурс таких приладів буде меншим, ніж в приладів з штучною нульовою точкою, де ресурс практично обмежується допустимим зносом проводу.

Відпрацьовано методику проведення експерименту та імовірнісно-статистичний аналіз його результатів для прогнозування технічного ресурсу електричних контактних пар.

На підставі статистичної обробки параметрів зносу відповідно до критерію Колмогорова встановлено, що вони мають розподіл близький до логарифмічно-нормального закону. При цьому вибіркові середні квадратичні відхилення мають приблизно рівні значення, що відповідно до критерію Кохрана свідчить про однорідність дисперсій.

При живленні постійним струмом величина зносу збільшується, при чому анод зношується більше ніж катод внаслідок катодного перенесення, що має місце при містковій ерозії.

В результаті дослідження експериментально підтверджена адекватність математичної моделі струмового зносу.

РОЗДІЛ 4

ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЗНОСОСТІЙКОСТІ СЛАБКОСТРУМОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ КОНТАКТНИХ ПАР КОВЗАННЯ

4.1 Розробка інформаційної технології моделювання процесу зносу

Інформаційні технології (ІТ) — це технології використання комп'ютерів для зберігання, отримання, передачі та управління даними [25] або інформацією. Зазвичай ІТ використовуються в контексті ділових операцій на відміну від персональних або розважальних технологій [108]. ІТ вважається підмножиною інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ). Система інформаційних технологій (ІТ-система) є комп'ютерною системою, яка включає апаратне, програмне та периферійне обладнання і управляється обмеженою групою користувачів ІТ [109], [110].

Для автоматизації вирішення технічних завдань необхідною складовою є інформаційна технологія, яка складається з інформаційного забезпечення (створення бази даних), математичного забезпечення (створення математичних моделей), програмного забезпечення (створення комп'ютерних програм на базі математичних моделей) та технічного забезпечення (створення комп'ютерного обладнання здатного опрацьовувати комп'ютерні програми на основі математичних моделей з використанням баз даних [111], [112]. Загальний вигляд блок-схеми автоматизованого вирішення технічних завдань подано на рис. 4.1.

Основні етапи процесу побудови інформаційної технології моделювання процесів зносостійкості слабкострумових електричних контактних пар ковзання подано на рис. 4.2.

Етап 1. Аналіз моделей механічного зносу контактних пар ковзання.

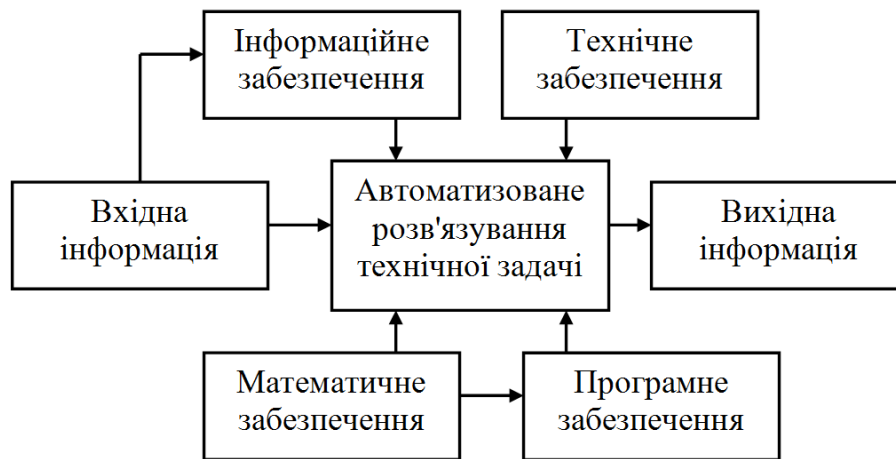


Рисунок 4.1 – Схема автоматизованого розв'язування технічної задачі

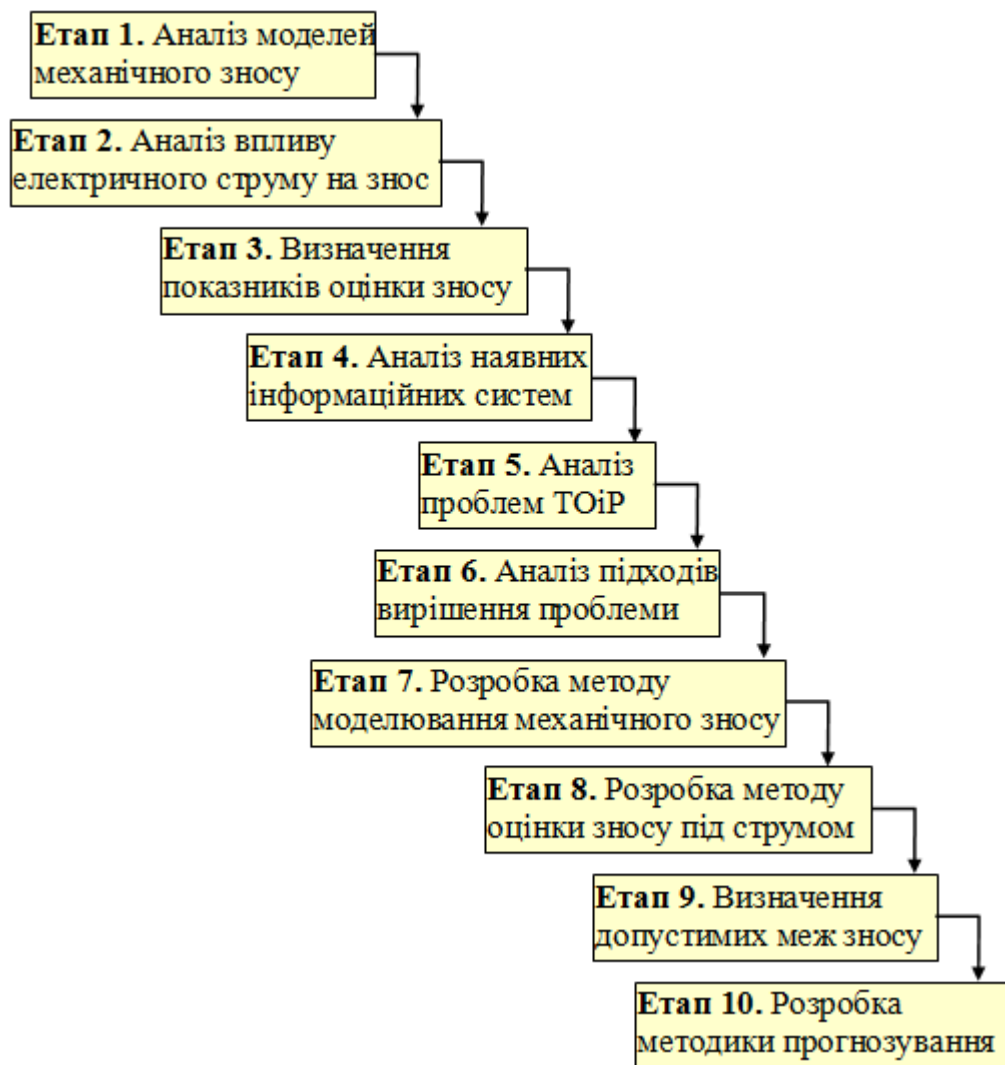


Рисунок 4.2 – Основні етапи побудови інформаційної технології моделювання процесів зносостійкості слабкострумів електричних контактних пар ковзання

В результаті дослідження п. 1.2 з'ясовано, що 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 [64]. Таким чином визначення ступеня зносу електричних контактів електро-механічного обладнання та окремих його складових можна здійснити математичним моделюванням механічних процесів зносостійкості з використанням інженерної моделі зносу на основі енергетичних параметрів.

Етап 2. Аналіз впливу електричного струму на знос контактних пар ковзання

В результаті дослідження п. 1.3 з'ясовано, що основним фактором, який впливає на знос слабкострумівих електричних контактів є місткова ерозія [12]. Таким чином визначення ступеня зносу електричних контактів електро-механічного обладнання та окремих його складових можна здійснити математичним моделюванням механічних процесів зносостійкості з урахуванням струмового зносу.

Етап 3. Визначення показників оцінки зносу слабкострумівих електричних контактних пар ковзання

В результаті дослідження п. 1.4 з'ясовано, що основними показниками для оцінки ступеня зносу є об'єм або маса матеріалу втраченого (перенесеного) в результаті контактування, глибина або ширина контактного сліду який з'явився в результаті контактування, площа поперечного перерізу зони контактування. Враховуючи, що основним фактором який впливає на якість проходження струму для електричних контактів є фактична площа контактування [3], яка залежить від геометрії контактів, найбільш прийнятним показником для визначення ступеня зносу електричних контактів електро-механічного обладнання та окремих його складових можна вважати глибину або ширину контактного сліду який з'явився в результаті контактування.

Етап 4. Аналіз наявних ІС, що вирішують завдання автоматизації процесів пов'язаних з ТОіР основного виробничого обладнання підприємств.

В першому розділі п. 1.5 було проведено аналіз інформаційно-керуючої структури виробничого підприємства та її основних ІС. В процесі аналізу з'ясовано, що автоматизацію функції ТОіР [111], [112] виконують ЕАМ-системи. При більш детальному дослідженні ЕАМ-систем виявилось, що основна їх функція полягає в автоматизації процесів документообігу та планування ТОіР на основі паспортних даних обладнання, моніторингу режимів його роботи за допомогою датчиків, та оптимізації ППР з використанням статистичної обробки даних про аварійні ситуації та виконанні ремонтні роботи [111], [112]. В результаті проведеного аналізу зроблено висновок про необхідність створення нової інформаційної технології для прогнозування технічного стану обладнання з використанням математичного моделювання процесів зносостійкості для розширення можливостей наявних інформаційних систем, підвищення ефективності ППР і зниження витрат на обслуговування обладнання.

Етап 5. Аналіз проблем, що супроводжують ТОіР основного виробничого обладнання підприємств.

В першому розділі п. 1.5 було проведено аналіз процесу ТОіР основного виробничого обладнання підприємств в результаті якого з'ясовано, що найбільш надійним способом обслуговування обладнання є попереджувальний ремонт. Для здійснення попереджувального ремонту в сучасних умовах, необхідно визначити ступінь зносу обладнання та окремих його складових, що можливо здійснити використовуючи паспортні дані обладнання з поступовим уточненням їх в процесі експлуатації обладнання на основі статистичних методів. Основною перевагою такого підходу є підвищена надійність обладнання і зменшення кількості аварійних зупинок обладнання, що призводять до підвищення кількості виробленої продукції і, як наслідок, прибутку підприємства. Недоліком такого підходу можна вважати високу вартість обслуговування обладнання (висока ймовірність

передчасної заміни обладнання, яке ще не виробило свій ресурс), велику кількість планових зупинок обладнання, що призводить до зниження кількості виробленої продукції і фінансовим витратам. Збалансувати всі переваги і недоліки ППР в реальних умовах виробництва достатньо складно, тому більш сучасним підходом до ТОіР є ремонт обладнання за технічним станом. Такий підхід вимагає встановлення спеціальних "аварійних" датчиків для постійного контролю обладнання та прогнозування технічного стану з використанням математичного моделювання статистично-ймовірнісними методами. Початкова вартість такого підходу значно перевищує вартість ППР, тому область застосування стратегії ТОіР з контролем параметрів рекомендовано обмежувати обладнанням, відмова якого призведе до зупинки всієї технологічної системи або небезпечної аварійної ситуації. З іншого боку, оперативний контроль технічного стану може забезпечити високу безвідмовність і запобігати раптовим відмовам, тому, в результаті проведеного аналізу зроблено висновок про необхідність створення нової інформаційної технології, яка поєднає переваги обох підходів. Для розширення можливостей наявних ІС, підвищення ефективності ППР 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 датчиків для напрацювання статистичної інформації.

Етап 6. Аналіз підходів, що дозволяють вирішити проблеми створення ІС.

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 першому розділі п. 1.1 було проведено аналіз процесів які впливають на

зносостійкість електричних контактів. В результаті дослідження 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.

Етап 7. Розробка методу моделювання та оцінки механічного зносу слабкострумових електричних контактних пар ковзання

На етапі 1 побудови інформаційної технології моделювання процесів зносостійкості слабкострумових електричних контактних пар ковзання прийнято використати інженерну модель зносу на основі енергетичних параметрів для визначення ступеня зносу електричних контактів електро-механічного обладнання та окремих його складових. Для визначення прийнятих на етапі 3 показників ступеня зносу електричних контактів електро-механічного обладнання та окремих його складових (глибини та ширини контактного сліду який з'явився в результаті контактування) було розроблено метод моделювання зносостійкості на основі інженерної моделі зносу з урахуванням геометричної форми контактів.

Етап 8. Розробка методу оцінки додаткового зносу слабкострумових електричних контактних пар ковзання під струмом.

Розроблено метод визначення та оцінки зносу слабкострумових електричних контактних пар ковзання від дії електричного струму, в основу якого покладено відому модель місткової ерозії. Метод полягає в оцінці частини об'єму зносу від впливу струму у загальному об'ємі (ширині) контактного сліду, який з'явився в результаті контактування.

Етап 9. Визначення допустимих меж зносу слабкострумових електричних контактних пар ковзання.

Проведено аналіз точнісних характеристик приладів (роздільної здатності, який дозволив встановити допустимі межі зносу проводу і

контакту для слабкострумових електричних контактних пар ковзання потенціометрів та потенціометричних датчиків. Визначено, що допустимі межі зносу електричних контактних пар залежать від класу приладу, що визначає допустимі межі відхилення вихідних параметрів, і електричної схеми роботи приладу в апаратурі.

10 Етап. Розробка методики прогнозування зносостійкості слабкострумових електричних контактних пар ковзання.

Розроблено методику проведення імовірно-статистичного аналізу результатів експерименту та методику застосування отриманих математичних моделей для прогнозування технічного ресурсу електричних контактних пар.

На основі блок-схеми автоматизованого вирішення технічних завдань та визначених етапів проектування розроблено інформаційну технологію моделювання процесів зносостійкості слабкострумових електричних контактних пар ковзання. Узагальнена структура розробленої інформаційної технології представлена на рис. 4.3.

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. 4.4).

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.

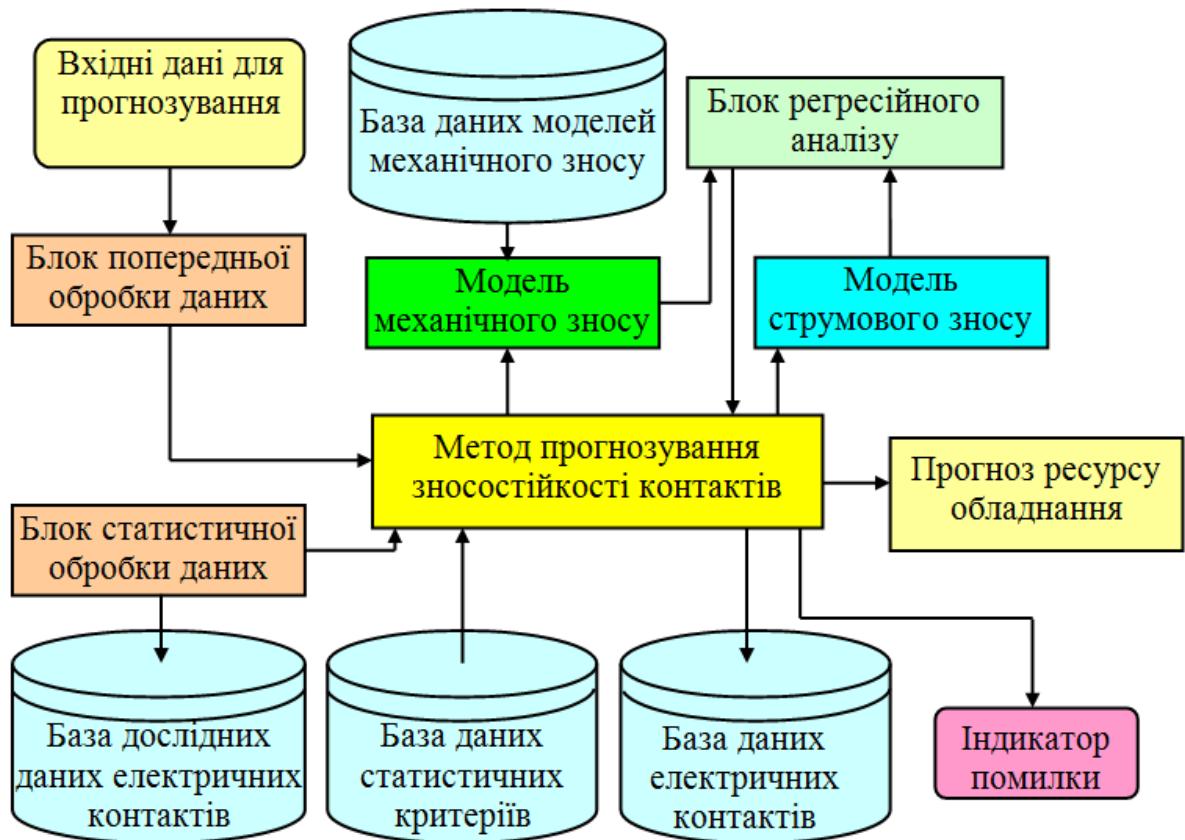


Рисунок 4.3 – Узагальнена структура розробленої інформаційної технології моделювання процесів зносостійкості слабкострумів електричних контактних пар ковзання

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.

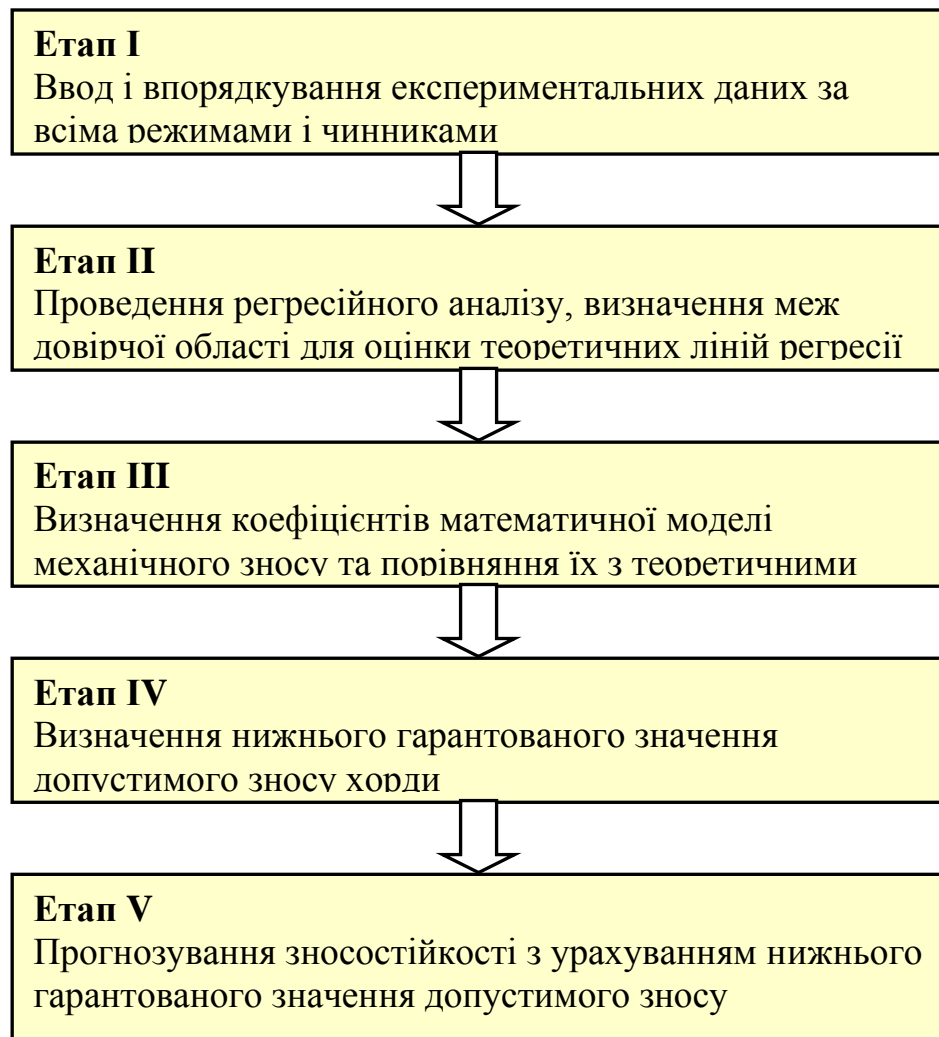


Рисунок 4.4 – Основні етапи роботи розробленої інформаційної технології моделювання процесів зносостійкості слабкострумових електричних контактних пар ковзання

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.

Етап IV передбачає визначення нижнього гарантованого значення допустимого зносу хорди.

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

4.2 Структура пакету програм

Основними вимогами до програмного забезпечення для математичного моделювання, є ефективність (процесорний час моделювання), число ітерацій і точність результатів, а також надійність (здатність успішно вирішувати необхідні завдання), достовірність отриманих результатів, здатність обробки помилкових ситуацій [113], [114].

Крім того, важливим аспектом є забезпечення зручності користувача, з точки зору трудомісткості підготовки вихідних даних і їх введення в ПК, можливості виведення проміжної інформації і кінцевих результатів, гнучкості програмного забезпечення [114].

З урахуванням викладених вимог, організуємо систему комп'ютерного моделювання у вигляді пакету програм для визначення параметрів зносу слабкострумів електричних контактних пар ковзання, використовуючи модульний принцип організації, відповідно до якої програми розбиваються на кілька підпрограм і функцій, що спрощує їх подальший розвиток і корекцію.

Пакет складається з шести основних функцій, призначених безпосередньо для розрахунків зносостійкості контактних пар ковзання, шести допоміжних функцій призначених для попередньої обробки статистичної інформації отриманої безпосередньо за результатами експериментів і п'яти баз даних.

Основні модулі.

1. Модуль "kontakt.m". Блок-схема алгоритму роботи [84] модуля "kontakt.m" реалізована в програмі MATLAB [89], подана на рис. 4.5.

Спосіб звернення до програми:

[Kp,mNT,KI,alfa,Tg,Ng,dmNT]= kontakt(Tf,Nfun,Pfun,Ifun,Td,z,y).

Вхідні дані:

Tf – ввід матриці хорди (глибини) зносу T , мкм;

Nfun – ввід матриці (вектора) кількості циклів N , цикл;

Pfun – ввід матриці контактного тиску P_k , сН;

I_{fun} – ввід матриці (вектора) струму I, A ;

T_d – ввід величини припустимого зносу контакту $T_{don}, МКМ$;

z – ввід значення змащення контактів ($z = 0$ – без змащення, інше – зі змащенням);

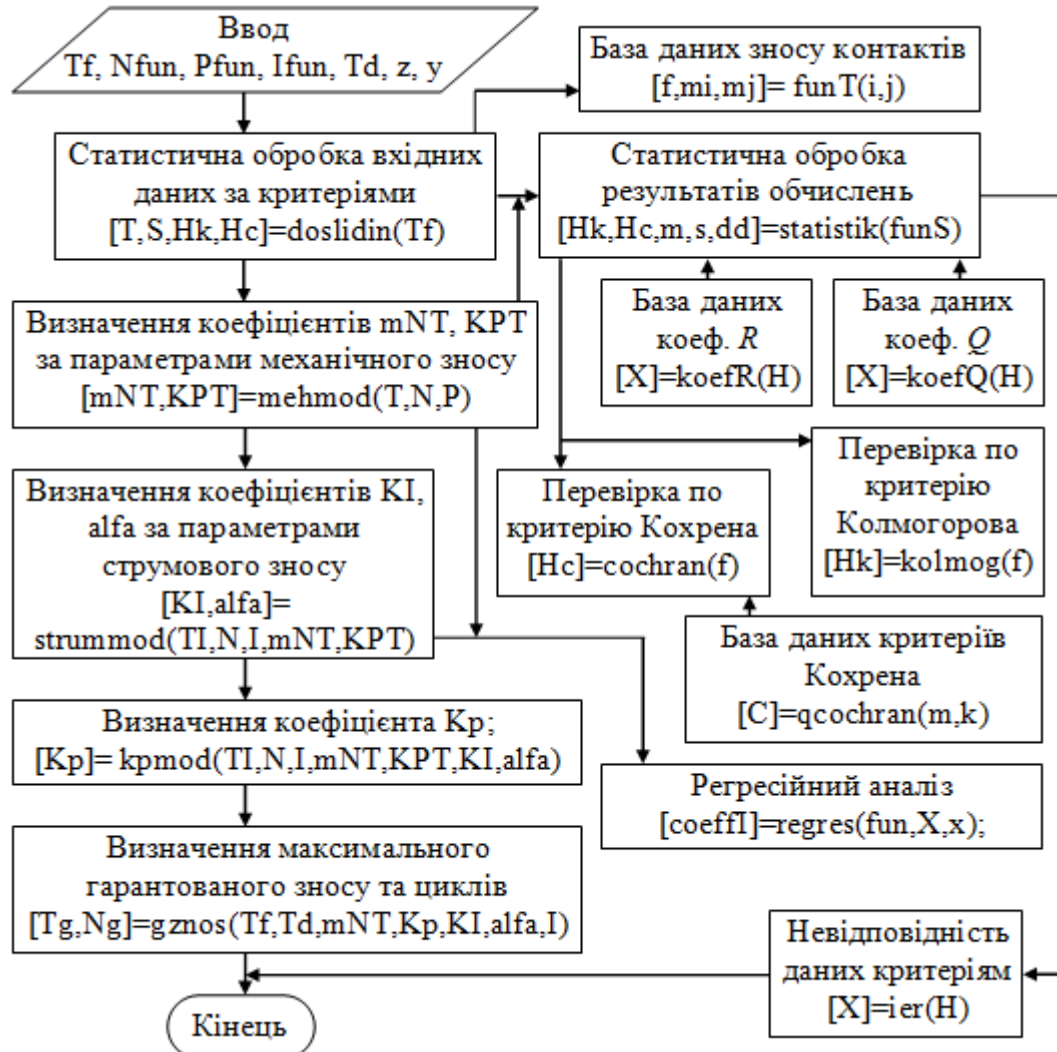


Рисунок 4.5 – Блок-схема алгоритму роботи модуля "kontakt.m"

y – ввід значення форми контактів ($y = 0$ – циліндр-сфера, інше – площина-сфера);

Вихідна інформація:

K_p, m_{NT}, K_I, α – відповідні коефіцієнти K_T, m_{NT}, K_I, α формули струмового зносу (3.22), (3.23);

T_g, N_g – відповідні гарантовані значення допустимого зносу хорди T_{gap} (3.24) і рівня зносостійкості N_{gap} : (3.25).

Також результатом роботи модуля "kontakt.m" є будова графіків залежності $T(N, I)$ та $N_{зар}(I)$.

2. Модуль "doslidin.m". Блок-схема алгоритму роботи [84] модуля "doslidin.m" реалізована в програмі MATLAB [89], подана на рис. 4.6

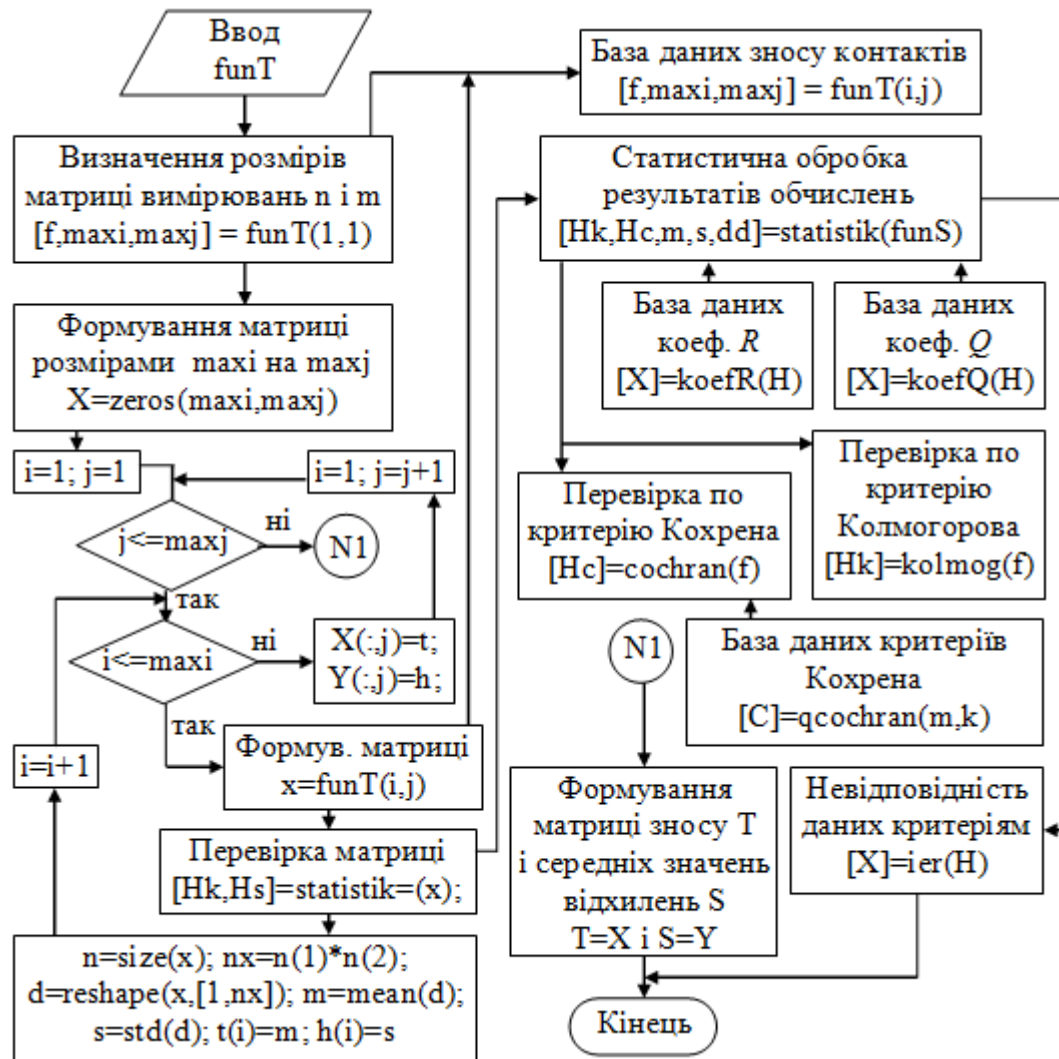


Рисунок 4.6 – Блок-схема алгоритму роботи модуля "doslidin.m"

Спосіб звернення до програми:

$[T,S,Hk,Hc]=doslidin(funT)$

Вхідні дані:

funT – формування матриці хорди (глибини) зносу T , мкм.

Вихідна інформація:

T – матриця зносу контактів, складена з середніх значень і отримана після опрацювання результатів вимірювань n зразків в m точках;

S – матриця середніх значень відхилень вимірювань n зразків в m точках для кожного члена матриці T зносу контактів;

H_k – результат статистичної перевірки результатів вимірювань n зразків в m точках на їх відповідність нормальному логарифмічному закону розподілу випадкових величин за критерієм Колмогорова ($H_k = 0$ – результати відповідають нормальному розподілу і можна продовжувати роботу, $H_k = 1$ – результати не відповідають нормальному розподілу і потрібно продовжити/повторити досліди з іншими зразками);

H_c – результат статистичної перевірки результатів вимірювань n зразків на їх відповідність одній виборці з 95% рівнем достовірності за критерієм Кохрена ($H_c = 0$ – результати відповідають критерію Кохрена і можна продовжувати роботу, $H_c = 1$ – результати не відповідають критерію Кохрена і потрібно продовжити/повторити досліди з іншими зразками).

3. Модуль "mehmod.m". Блок-схема алгоритму роботи модуля "mehmod.m" реалізована в програмі MATLAB [89], подана на рис. 4.7.

Спосіб звернення до програми:

$[mNT, KPT, TN] = mehmod(Tm, Nm, Pm)$

Вхідні дані:

Tm – ввід матриці хорди (глибини) механічного (при струмі $I = 0$) зносу T , *мкм*;

Nm – ввід матриці (вектора) кількості циклів N , *цикл*;

Pm – ввід матриці контактного тиску P_k , *cH*;

Вихідна інформація:

mNT , KPT – відповідні коефіцієнти m_{NT} і K_{PT} формули механічного зносу (3.26);

TN – вивод отриманої в результаті моделювання матриці хорди (глибини) механічного (при струмі $I = 0$) зносу T , *мкм*.

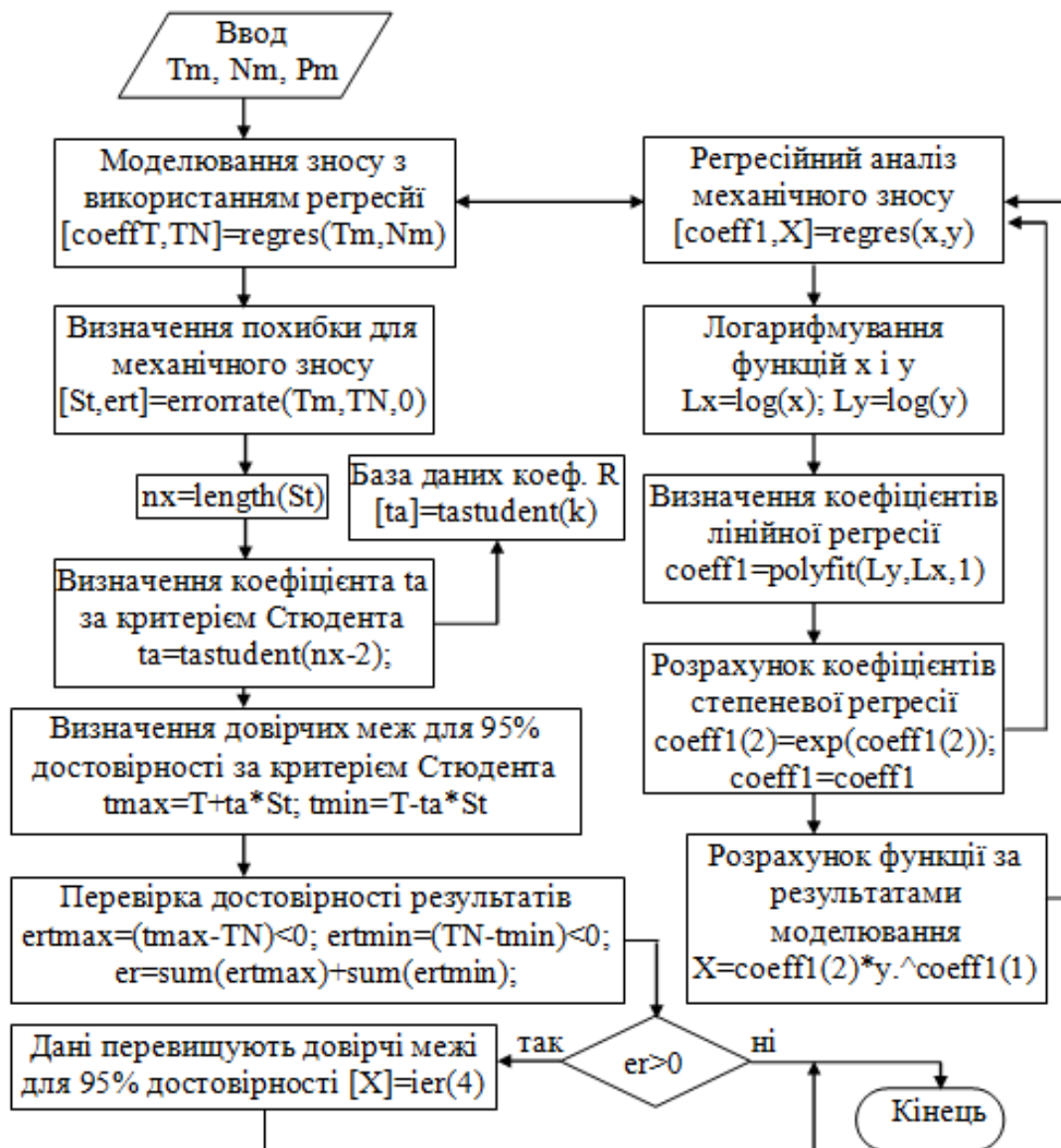


Рисунок 4.7 – Блок-схема алгоритму роботи модуля "mehtmod.m"

4. Модуль "strummod.m". Блок-схема алгоритму роботи модуля "strummod.m" реалізована в програмі MATLAB [89], подана на рис. 4.8.

Спосіб звернення до програми:

[KI, alfa]=strummod(Ti, Ni, Ii, m, K)

Вхідні дані:

Ti – ввід матриці хорди (глибини) струмового (при струмі $I = 0,5 \div 3$ А) зносу T , мкм;

Ni – ввід матриці (вектора) кількості циклів N , цикл;

Ii – ввід матриці (вектора) струму I , А;

m – ввід коефіцієнта m_{NT} формули механічного зносу (3.26);

K – ввід коефіцієнта K_{PT} формули механічного зносу (3.26). Вихідна інформація:

KI – вивод отриманого в результаті моделювання коефіцієнта K_I формули струмового зносу (3.23);

α – вивод отриманого в результаті моделювання коефіцієнта α формули струмового зносу (3.23).

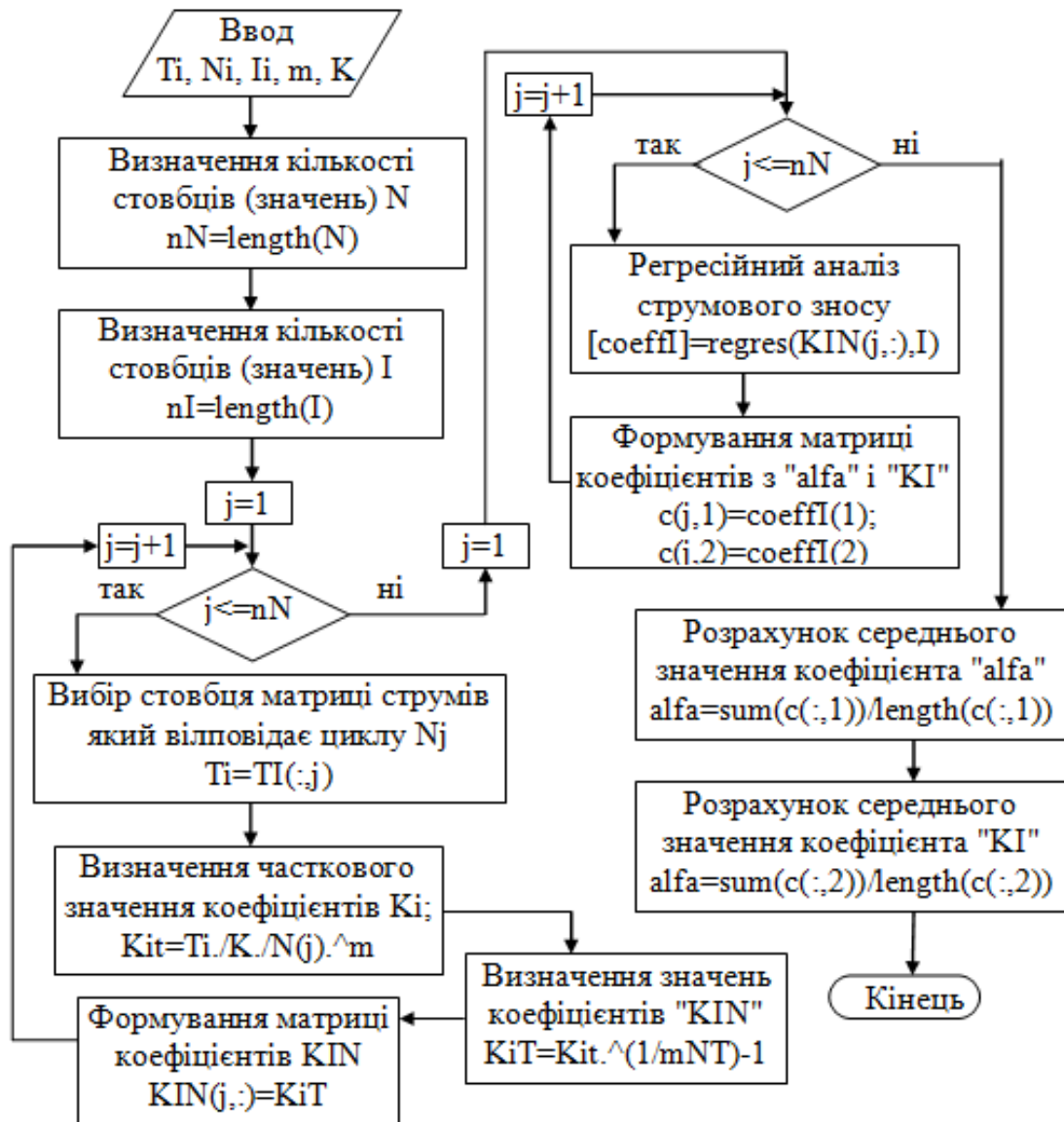


Рисунок 4.8 – Блок-схема алгоритму роботи модуля "strummod.m"

4. Модуль "gznos.m". Блок-схема алгоритму роботи модуля "gznos.m" реалізована в програмі MATLAB [89], подана на рис. 4.9.

Спосіб звернення до програми:

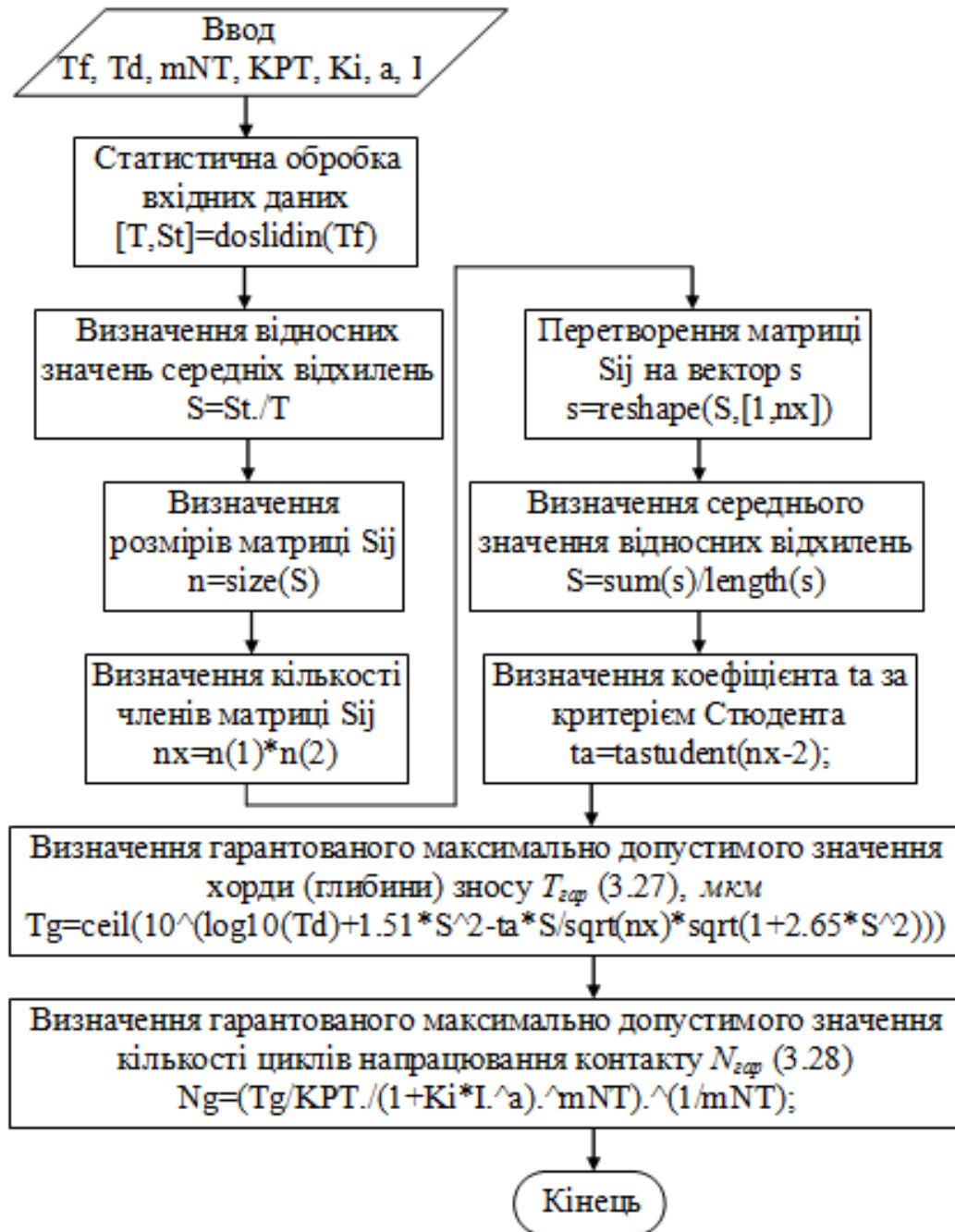
$$[T_g, N_g] = \text{gznos}(T_f, T_d, m_{NT}, K_{PT}, K_I, \alpha, I)$$


Рисунок 4.9 –Блок-схема алгоритму роботи модуля "gznos.m"

Вхідні дані:

T_f – ввід матриці хорди (глибини) зносу T , мкм;

T_d – ввід розрахованого за (3.2) і (3.3) максимально допустимого значення хорди (глибини (3.10)) зносу $T_{дон}$, мкм;

m_{NT} – ввід коефіцієнта m_{NT} формули механічного зносу (3.26);

K_{PT} – ввід коефіцієнта K_{PT} формули механічного зносу (3.26).

I – ввід матриці (вектора) струму I, A .

Вихідна інформація:

T_g – вивод отриманого в результаті моделювання гарантованого максимально допустимого значення хорди (глибини) зносу T_{gap} (3.27), *мкм*;

N_g – вивод отриманого в результаті моделювання гарантованого максимально допустимого значення кількості циклів напрацювання контакту N_{gap} (3.28) відповідно до T_{gap} .

У таблиці 4.1 подано опис модулів комплексу програм для визначення зносостійкості слабкострумових електричних контактних пар ковзання.

Таблиця 4.1 – Модулі комплексу програм для визначення зносостійкості слабкострумових електричних контактних пар ковзання

Найменування	Формат виводу функції	Призначення
1	2	3
kontakt	[Kp,mNT,KI,alfa,Tg,Ng, dmNT]= kontakt(Tf,Nfun,Pfun, Ifun,Td,z,y)	Програма розрахунку зносостійкості ковзних контактів в залежності від їх форми, контактного тиску P_k , струму I і циклів напрацювання N
doslidin	[T,S,Hk,Hs]=doslidin(funT)	Програма обробки вхідних даних зносу для формування матриці середніх значень та перевірки на відповідність основним статистичним критеріям

1	2	3
mehmod	[mNT,KPT,TN]=mehmod(Tm, Nm,Pm)	Програма розрахунку параметрів m_{NT} і K_{PT} (3.16) при механічному зносі ковзних контактів в залежності від їх форми, контактного тиску P_k і циклів напрацювання N
strummod	[KI,alfa]=strummod(Ti,Ni,Ii, m,K)	Програма розрахунку параметрів K_I і α (3.23) струмового зносу ковзних контактів в залежності від їх форми, контактного тиску P_k , струму I і циклів напрацювання N
kpmod	[Kp]=kpmod(Ti,Ni,Ii,m,K, Ki,a)	Програма розрахунку параметра K_{PTI} (3.26) при зносі ковзних контактів
gznos	[Tg,Ng]=gznos(Tf,Td,mNT, KPT,Ki,a,I)	Програма визначення гарантованих максимально допустимих значень хорди (глибини) зносу T_{gap} (3.24) і кількості циклів напрацювання контакту N_{gap} (3.25) відповідно до T_{gap}
statistik	[Hk,Hc,m,s,dd]=statistik(funS)	Програма статистичної обробки даних для визначення середнього відхилення, похибки та відповідності основним статистичним критеріям

1	2	3
kolmog	[H,D,k]=kolmog(x)	Програма статистичної перевірки даних на відповідність нормальному розподілу за критерієм Колмогорова
cochran	[H,C,C0]=cochran(x)	Програма статистичної перевірки даних на однорідність отриманих дисперсій за критерієм Кохрена (3.12)
koefmt	[mt]=koefmt(mNT,z,y)	Програма виводу теоретичних коефіцієнтів m_{NT} механічного зносу в залежності від форми контактів та наявності змащення
ier	[F]=ier(H,kod)	Програма фіксації помилок (невідповідностей) отриманих даних визначеним критерієм
errorrate	[S,Y]=errorrate(x,y,e)	Програма визначення середніх відхилень та похибок розрахунків
qcochran	[C]=qcochran(m,k)	База даних коефіцієнтів критерія Кохрена (3.12) в залежності від кількості дослідів m і степенів свободи k
koefR	[R]=koefR(s)	Програма виводу коефіцієнта R (3.13) в залежності від середнього відхилення S
koefQ	[b]=koefQ(Q)	Програма виводу теоретичного значення відносної похибки δ (3.14) в залежності від коефіцієнта Q

1	2	3
tastudent	[ta]=tastudent(k)	Програма виводу коефіцієнта Стьюдента t_a для визначення довірчих меж (3.19)-(3.21) і (3.24)
koefmt	[mt]=koefmt(mNT,z,y)	Програма виводу коефіцієнта m_{NT} теоретичної моделі механічного зносу (3.16) з табл. 2.1
gkontakt	[tg,T,Nk,t,U]=gkontakt(Umax,tmax,Imax,Tf,Nfun,Pfun,Ifun,Td,z,y)	Програма розрахунку зносостійкості потенціометрів залежності від зміни напруги на затисках в часі $U(t)$

Лістинги основних програм представлено в додатку А, лістинги допоміжних програм — в додатку Б і лістинги програм баз даних — в додатку В.

4.3 Робота пакету програм

Робота з моделювання зносостійкості слабкострумових електричних контактних пар ковзання починається з проведення експериментів для визначення реальних параметрів зносу і формування баз даних [115]. Після формування бази вводяться дані для розрахунку: матриці хорди (глибини) зносу T , *мкм*; матриці (вектора) кількості циклів N , *цикл*; матриці контактного тиску P_k , *сН*; матриці (вектора) струму I , *А*; величини припустимого зносу контакту $T_{дон}$, *мкм*; значення змащення контактів ($z = 0$ – без змащення, інше – зі змащенням); значення форми контактів ($y = 0$ – циліндр-сфера, інше – площина-сфера).

Наступним кроком роботи комплексу програм є формування матриці середніх значень вхідних даних хорди (глибини) зносу T та матриці S середніх квадратичних відхилень від середніх значень. При цьому здійснюється перевірка відповідності дослідних даних нормальному розподілу за критерієм Колмагорова (3.11). Для чого формується матриця

першим рядком якої є вхідні дані розподілені за зростанням, другим рядком є ймовірності W_i кожного члена першого рядка, в третьому рядку визначаються частоти варіаційного ряду $V_i = \frac{W_i}{\sum n}$, і останнім рядком є різниця між суміжними точками частотей $D_i = V_i - V_{i-1}$. Максимальне значення останнього рядка помножене на корінь квадратний з кількості випробувань використовується для перевірки відповідності отриманого емпіричного розподілу теоретичному — отримане значення повинно бути меншим за 1. Якщо умова не виконується — потрібно продовжити проводити досліди для отримання більшого масиву інформації.

Далі здійснюється перевірка однорідності отриманих дисперсій за критерієм Кохрена (3.12) для чого визначають відношення максимальної дисперсії до суми дисперсій всіх дослідів і порівнюють отримане значення з табличним, яке визначається з бази даних програми `qsochran.m` в залежності від кількості режимів m і степенів свободи k . Якщо розраховане значення більше за табличне — потрібно продовжити проводити досліди для отримання більшого масиву інформації.

Наступним кроком роботи програми є визначення відносної похибки результатів випробувань для рівня двосторонньої довірчої ймовірності 95%. Відносна похибка визначається як середнє відношення матриці відхилень до матриці середніх значень. Теоретичне значення відносної похибки δ визначається таблично з бази даних програми `coefQ.m` в залежності від величини Q , яка розраховується з (3.13) як відношення об'єму вибірки випробувань n до коефіцієнту R , що визначається таблично з бази даних програми `coefR.m` і залежить від середнього квадратичного відхилення. Якщо розраховане значення відносної похибки більше за табличне — потрібно або продовжити проводити досліди для отримання більшого масиву інформації, або знизити рівень двосторонньої довірчої ймовірності.

Якщо статистична обробка даних успішно пройдена — можна переходити до наступного етапу, яким є визначення коефіцієнтів m_{NT} і K_{PT}

формули механічного зносу (3.26). Для цього потрібно визначити натуральні логарифми величини хорди механічного зносу, яка є першою строкою матриці середніх значень зносу T , і кількості відповідних циклів напрацювання N . Після логарифмування залежність $T(N)$ може бути апроксимована прямою лінією і визначення відповідних коефіцієнтів лінійної регресії здійснюється штатними операторами програми MATLAB [89]. Перший отриманий коефіцієнт буде відповідати K_{PT} , а для визначення m_{NT} необхідно основу натурального логарифма підвести до степеня другого коефіцієнта. Далі потрібно визначити межі довірчої області для оцінки теоретичної лінії регресії і порівняти отриману модель з теоретичною (табл. 2.1), для чого достатньо порівняти отримані коефіцієнти m_{NT} з теоретичними, враховуючи, що контактний тиск є незмінним, і визначити похибку теоретичної моделі. Межі довірчої області визначаються відповідно до середньоквадратичних відхилень помножених на коефіцієнт Стюдента, який визначається таблично відповідно до рівня двосторонньої довірчої ймовірності 95% з бази даних програми `tastudent.m` і залежить від середнього квадратичного відхилення і кількості степенів свободи даних. 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.

Після успішного проходження перевірки наступним кроком є визначення коефіцієнтів впливу струмового навантаження K_I і α . Для цього спочатку визначаємо часткові коефіцієнти K_{IT} за (3.35) і формуємо з них матрицю, а потім потрібно визначити натуральні логарифми величини K_{IT} , і струму I . Після логарифмування залежність $K_{IT}(I)$ може бути апроксимована прямою лінією і визначення відповідних коефіцієнтів лінійної регресії здійснюється штатними операторами програми MATLAB [89]. Перший отриманий коефіцієнт буде відповідати K_I , а для визначення α необхідно основу натурального логарифма підвести до степеня другого коефіцієнта.

Далі формується матриця з отриманих значень і розраховуються підсумкові коефіцієнти K_I і α , як середні значення відповідних строк матриці коефіцієнтів.

Наступним кроком буде визначення коефіцієнта K_p . Для цього потрібно розрахувати матрицю з коефіцієнтів (3.33) і визначити середнє значення.

Далі потрібно визначити допустимі межі зносу і гарантовану зносостійкість (3.24) і (3.25), для чого спочатку визначаємо допустимий знос T_{don} за (3.3), а потім коефіцієнти Стюдента t_a за відносним середнім квадратичним відхиленням та степенів свободи матриці зносу T . Після чого розраховуємо гарантований допустимий знос T_{gap} за (3.24) і гарантоване максимально допустиме значення кількості циклів напрацювання контакту N_{gap} (3.25) відповідно до T_{gap} .

Далі програма виводить всі розраховані коефіцієнти, будує графіки функцій зносостійкості у вигляді залежностей $N_{gap}(I)$ і $T(N, I)$.

Розглянемо приклад роботи програми за даними табл. 4.2 для кількості циклів напрацювання $N = 500, 5000, 10000, 20000$. Результатом роботи програми буде сформована матриця зносу T , величини коефіцієнтів для (3.34) і гарантований допустимий знос за (3.24), і гарантоване максимально допустиме значення кількості циклів напрацювання контакту N_{gap} (3.25) відповідно до T_{gap} . для негативного (рис. 4.10) або позитивного (рис. 4.11) полюса напруги на зношеному контакті.

Таблиця 4.2 – Залежність величини хорди зносу T^- або T^+ , мкм для негативного або позитивного полюса напруги на зношеному контакті від струму I, A при кількості циклів напрацювання N , і тиску $P_k = 10 \text{ cH}$.

I, A	0	0,5	1,0	1,5	3,0
1	2	3	4	5	6
	$N = 500$				
$T^-, \text{ мкм}$	150	180	200	210	230
$T^+, \text{ мкм}$	150	200	220	240	270

Продовження табл. 4.2

1	2	3	4	5	6
	$N = 5000$				
$T-, мкм$	230	330	360	370	400
$T+, мкм$	230	360	400	420	480
	$N = 10000$				
$T-, мкм$	300	390	420	440	480
$T+, мкм$	300	420	470	500	570
	$N = 20000$				
$T-, мкм$	390	460	490	540	560
$T+, мкм$	390	500	570	590	680

>> [KK,mNT,Ki,alfai,Tg,Ng,dm]=kontakt('dataTK',Nfun,Pfun,Ifun,600,0,0)

$T_x =$

150 230 300 390

180 330 390 460

200 360 420 490

210 370 440 540

230 400 480 560

KK = 32.3555

mNT = 0.2497

Ki = 2.6327

alfai = 0.6409

Tg = 577

Ng = 1.0e+04 *

3.8084 2.8183 2.3195 1.6190

dm = 0.1061

Результат роботи пакету програм у вигляді залежності гарантованої зносостійкості $N_{gap}(I)$ та величини хорди зносу $T-(I, N)$, мкм для негативного полюса напруги на зношеному контакті від струму I , A і кількості циклів напрацювання N подано на рис. 4.10.

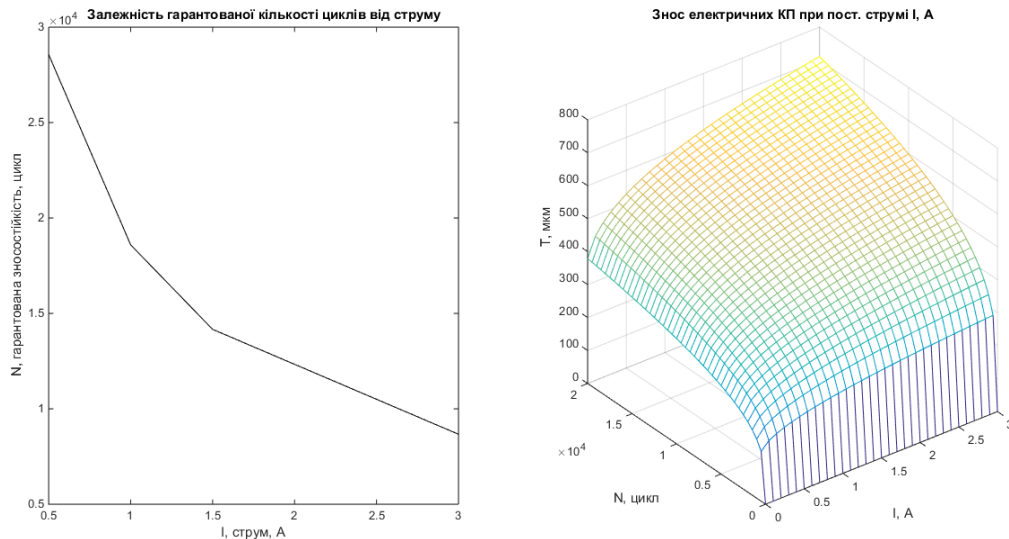


Рисунок 4.10 – Залежність гарантованої зносостійкості $N_{gap}(I)$ та величини хорди зносу $T-(I, N)$, мкм для негативного полюса напруги на зношеному контакті від струму I , А і кількості циклів напруцювання N

```
>> [KK,mNT,Ki,alfai,Tg,Ng,dm]=kontakt('dataTA',Nfun,Pfun,Ifun,600,0,0)
```

$T_x =$

150	230	300	390
200	360	420	500
220	400	470	570
240	420	500	590
270	480	570	680

KK = 31.9890

mNT = 0.2497

Ki = 4.7631

alfai = 0.7915

Tg = 577

Ng = 1.0e+04 *

2.8562	1.8594	1.4165	0.8667
--------	--------	--------	--------

dm = 0.1061

Результат роботи пакету програм у вигляді залежності гарантованої зносостійкості $N_{gap}(I)$ та величини хорди зносу $T+(I, N)$, мкм для позитивного полюса напруги на зношеному контакті від струму I , А і кількості циклів напруцювання N подано на рис. 4.11.

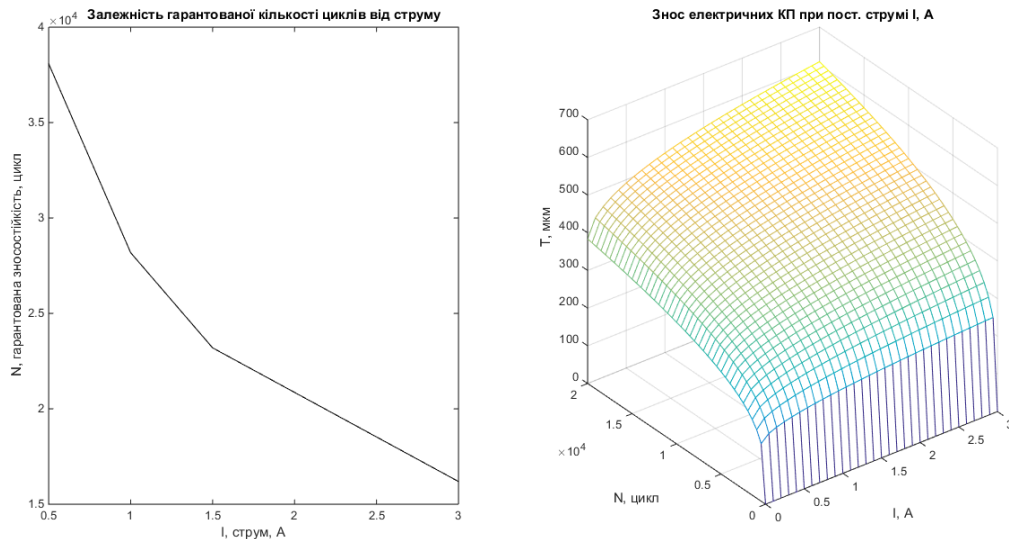


Рисунок 4.11 – Залежність гарантованої зносостійкості $N_{гар}(I)$ та величини хорди зносу $T+(I, N)$, $\mu\text{м}$ для позитивного полюса напруги на зношеному контакті від струму I , A і кількості циклів напруцювання N

Модель зносостійкості (3.32) з отриманими коефіцієнтами може використовуватись для визначення ресурсу слабкострумових контактних пар ковзання, які працюють в реальних умовах експлуатації.

Для моделювання процесів визначення ресурсу на прикладі потенціометричного датчика рівня рідини [116], [117] розроблено програмний модуль "gkontakt.m" та програму моделювання сигналу датчика з випадковою зміною амплітуди та тривалості — "signal.m". Лістинги програми "gkontakt.m" та програми "signal.m" представлено в додатках А та В відповідно.

Робота модуля "gkontakt.m" базується результатах модуля "gkontakt.m", тому спосіб звернення до програми аналогічний з тією відмінністю, що для роботи "gkontakt.m" потрібні додаткові данні по зміні амплітуди і тривалості вхідного сигналу, отримувані з модуля "signal.m", а вихідними даними є прогнозований час досягнення граничного зносу t_g (год), матриця (вектор) зміни зносу в часі T ($\mu\text{м}$), матриця (вектор) зміни циклів напруцювання у часі N_k (цикл), час зміни вхідного сигналу t (год), амплітуда зміни вхідного

сигналу $U(B)$. Блок-схема алгоритму роботи модуля "gkontakt.m" реалізована в програмі MATLAB [89], подана на рис. 4.12.

Спосіб звернення до програми:

$[tg, T, Nk, t, U] = \text{gkontakt}(U_{\max}, t_{\max}, I_{\max}, T_f, N_{\text{fun}}, P_{\text{fun}}, I_{\text{fun}}, T_d, z, y)$

Вхідні дані:

U_{\max} – ввід значення максимальної амплітуди вхідного сигналу, В;

t_{\max} – ввід значення тривалості вхідної дії, год;

I_{\max} – ввід значення максимального вхідного струму, А;

T_f – ввід матриці хорди (глибини) зносу T , мкм;

N_{fun} – ввід матриці (вектора) кількості циклів N , цикл;

P_{fun} – ввід матриці контактного тиску P_k , сН;

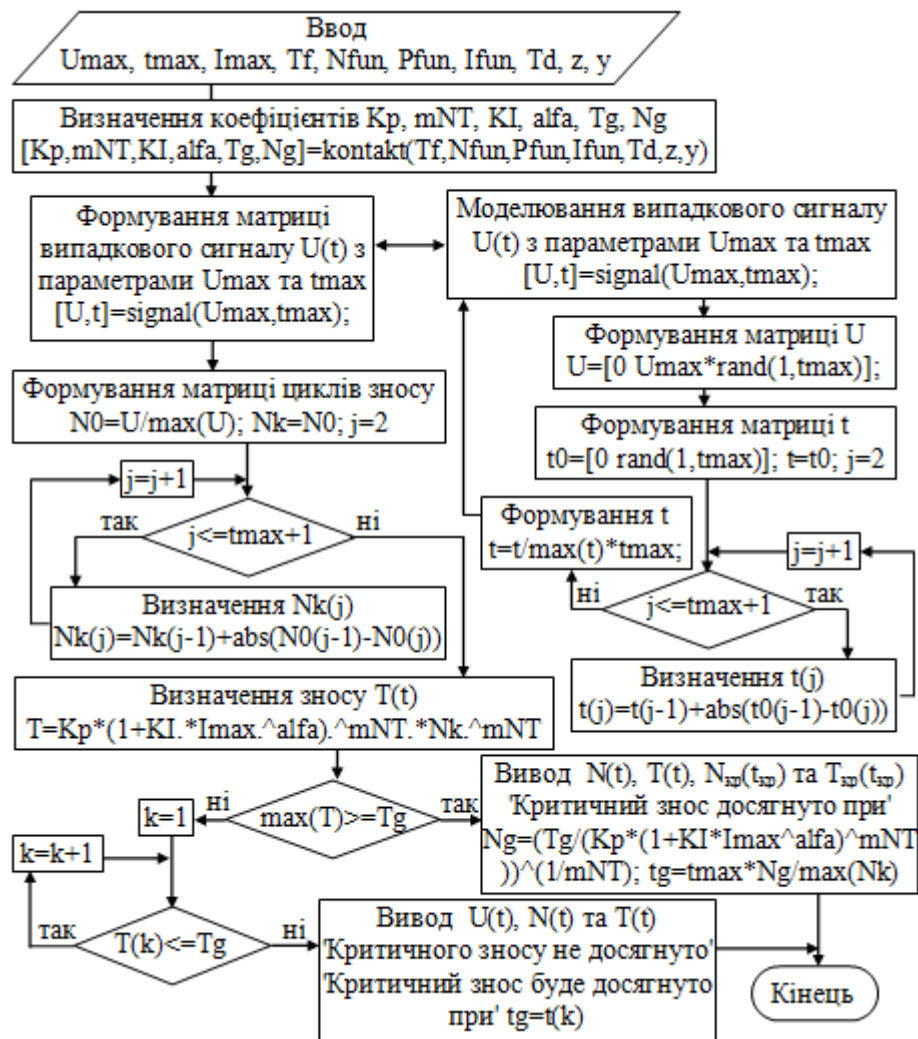


Рисунок 4.12 – Блок-схема алгоритму роботи модуля "gkontakt.m"

Ifun – ввід матриці (вектора) струму I, A ;

Td – ввід величини припустимого зносу контакта $T_{don}, мкм$;

z – ввід значення змащення контактів ($z = 0$ – без змащення, інше – зі змащенням);

y – ввід значення форми контактів ($y = 0$ – циліндр-сфера, інше – площина-сфера);

Вихідна інформація:

tg – прогнозований час досягнення граничного зносу, год;

T – матриця (вектор) зміни зносу в часі, мкм;

Nk – матриця (вектор) зміни циклів напрацювання у часі, цикл;

t – час зміни вхідного сигналу, год;

U – амплітуда зміни вхідного сигналу, В.

Також результатом роботи модуля "gkontakt.m" є виведення на екран повідомлення про досягнення або не досягнення критичного зносу та прогнозованого часу досягнення критичного зносу, а також будова графіків залежності: $N(t)$ та $T(t)$ та точок $N_{кр}(t_{кр})$ та $T_{кр}(t_{кр})$ — в разі досягнення прогнозованого критичного зносу; $U(t)$, $N(t)$ та $T(t)$ — в разі не досягнення прогнозованого критичного зносу.

Для перевірки роботи програми було здійснено моделювання процесів зносостійкості при роботі потенціометра в якості датчика рівня рідини за даними прикладу табл. 4.2. та зносу $T+(I, N)$, мкм для позитивного полюса напруги на зношеному контакті (рис. 4.11.) при вхідних даних: максимальна амплітуда вихідної напруги $U_{max} = 12 В$; максимальний вхідний струм $I_{max} = 0,5 А$. Для моделювання використовувались сигнали довільної форми з максимальною амплітудою сформовані програмним модулем "signal.m" з максимальним часом роботи потенціометричного датчика t_{max} : 48 год; 96 год; 960 год; 9600 год; 96000 год. Графічний інтерфейс та результати роботи програми при $t_{max} = 96000 год$. представлено нижче та на рис. 4.13.

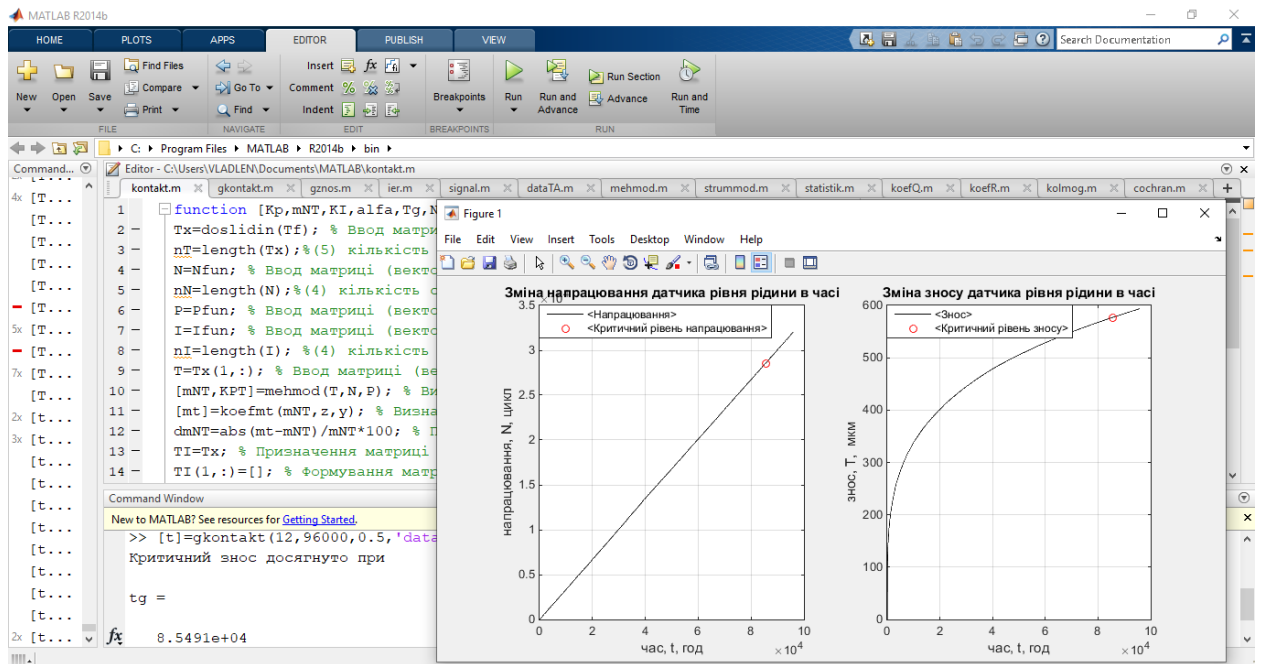


Рисунок 4.13 – Графічний інтерфейс та результат роботи програми "gkontakt.m" для $t = 96000$ год при досягненні прогнозованого критичного зносу

Результати роботи програми при максимальному часі роботи потенціометричного датчика $t_{max} = 48$ год, максимальній амплітуді вихідної напруги $U_{max} = 12$ В; максимальному вхідному струмі $I_{max} = 0,5$ А представлено нижче та на рис. 4.14.

```
>> [t]=gkontakt(12,48,0.5,'dataTA',Nfun,Pfun,Ifun,600,0,0);
```

Критичного зносу не досягнуто.

Критичний знос буде досягнуто при

```
tg = 7.9344e+04
```

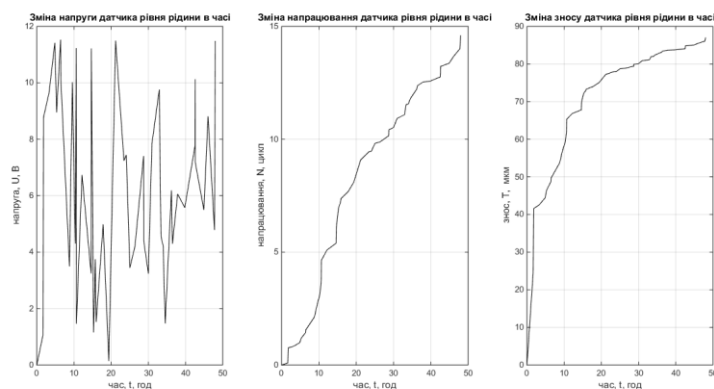


Рисунок 4.14 – Результат роботи програми "gkontakt.m" для $t = 48$ год при досягненні прогнозованого критичного зносу

Результати роботи програми при максимальному часі роботи потенціометричного датчика $t_{max} = 96 \text{ год}$, максимальній амплітуді вихідної напруги $U_{max} = 12 \text{ В}$; максимальному вхідному струмі $I_{max} = 0,5 \text{ А}$ представлено нижче та на рис. 4.15.

```
>> [t]=gkontakt(12,96,0.5,'dataTA',Nfun,Pfun,Ifun,600,0,0);
```

Критичного зносу не досягнуто.

Критичний знос буде досягнуто при

$tg = 8.8749e+04$

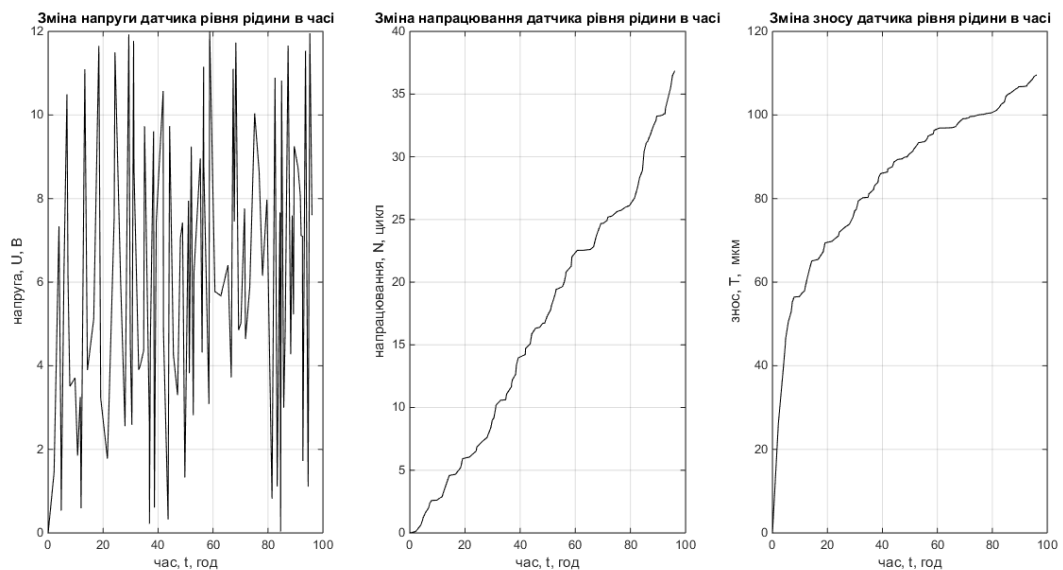


Рисунок 4.15 – Результат роботи програми "gkontakt.m" для $t = 96 \text{ год}$ при не досягненні прогнозованого критичного зносу

Результати роботи програми при максимальному часі роботи потенціометричного датчика $t_{max} = 960 \text{ год}$ та $t_{max} = 9600 \text{ год}$, максимальній амплітуді вихідної напруги $U_{max} = 12 \text{ В}$; максимальному вхідному струмі $I_{max} = 0,5 \text{ А}$ представлено нижче.

```
>> [t]=gkontakt(12,960,0.5,'dataTA',Nfun,Pfun,Ifun,600,0,0);
```

Критичного зносу не досягнуто.

Критичний знос буде досягнуто при

$tg = 8.5767e+04$

```
>> [t]=gkontakt(12,9600,0.5,'dataTA',Nfun,Pfun,Ifun,600,0,0);
```


Критичного зносу не досягнуто.

Критичний знос буде досягнуто при

$$tg = 8.5370e+04$$

Результати роботи програми при максимальному часі роботи потенціометричного датчика $t_{max} = 96000 \text{ год}$, максимальній амплітуді вихідної напруги $U_{max} = 12 \text{ В}$; максимальному вхідному струмі $I_{max} = 0,5 \text{ А}$ представлено нижче та на рис. 4.16.

```
>> [t]=gkontakt(12,96000,0.5,'dataTA',Nfun,Pfun,Ifun,600,0,0);
```

Критичний знос досягнуто при

$$tg = 8.5656e+04$$

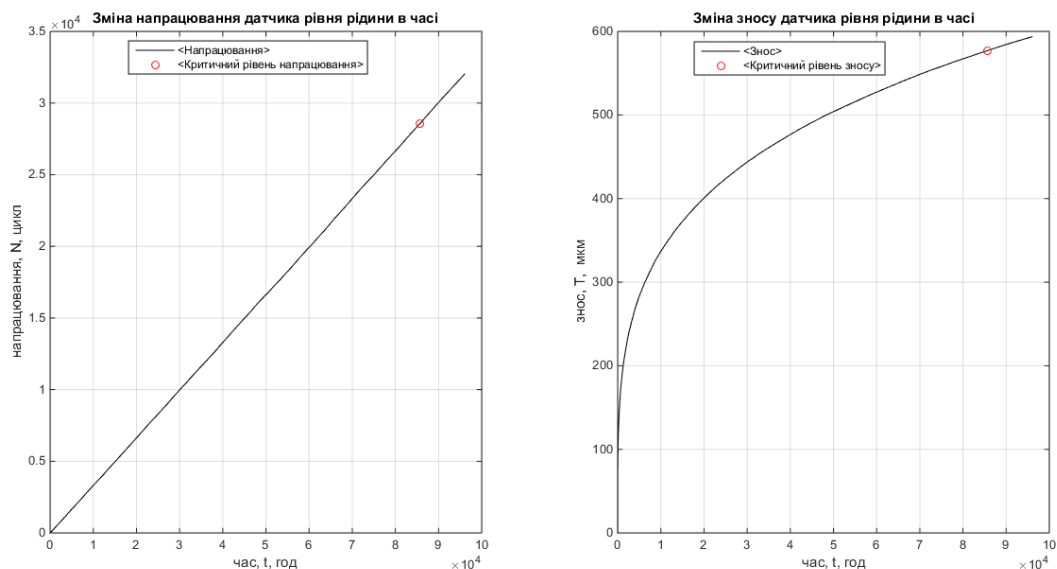


Рисунок 4.16 – Результат роботи програми "gkontakt.m" для $t = 96000 \text{ год}$ при досягненні прогнозованого критичного зносу

Результати моделювання процесів зносостійкості при роботі потенціометра в якості датчика рівня рідини за даними прикладу табл. 4.2. та зносу $T+(I, N)$, мкм для позитивного полюса напруги на зношеному контакті (рис. 4.11.) при вхідних даних: максимальна амплітуда вихідної напруги $U_{max} = 12 \text{ В}$; максимальний вхідний струм $I_{max} = 0,5 \text{ А}$.; сигналів довільної форми з максимальним часом роботи потенціометричного датчика t_{max} : 48 год; 96 год; 960 год; 9600 год; 96000 год, представлено в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Результати моделювання зносостійкості потенціометричного датчика

Час роботи $t_{max}, год$	48	96	960	9600	96000
Прогнозована зносостійкість $t_{cap}, год$	79344	88749	85767	85370	85656

Аналізуючи дані з табл. 4.3 можна зробити висновок, що прогнозовані значення зносостійкості мають однаковий порядок і відрізняються від середнього значення менше ніж на 10%. Ця різниця пов'язана з кількістю обробленої інформації наступним чином: чим більша кількість отриманої експериментальної інформації — тим менша відмінність від середнього прогнозованого значення.

Представлена інформаційна технологія моделювання процесів зносостійкості слабкострумових електричних контактних пар ковзання на основі розробленого методу оцінки та урахування додаткового зносу контактних пар ковзання при дії струмової комутації та створений програмний комплекс для моделювання зносу слабкострумових електричних контактних пар ковзання засобами MATLAB, дозволяє розширити можливості ІС 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.

Висновки по розділу 4

Проведена розробка інформаційної технології моделювання процесів зносостійкості слабкострумів 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.

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

Проведено 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.

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

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

Висновки

З метою розвитку та вдосконалення інформаційних систем технічного обслуговування та ремонту обладнання промислових підприємств вперше проведена розробка інформаційної технології моделювання процесів зносостійкості слабкострумівих 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.

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

Вдосконалено математичну модель місткової ерозії слабкострумівих 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;

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 слабкострумівих електричних контактних пар ковзання з середнім рівнем достовірності отриманих результатів більшим за 94%, що свідчить про добре підібрані моделі (похибка до 7%).

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%).

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

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.

Поведено 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 слабкострумових електричних контактних пар ковзання засобами MATLAB.

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

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

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. А. А. Комаров, и В. Н. Яковлев, *Электрические контакты*. Учебно-метод. пособие по дисциплине "Тяговые и трансформаторные подстанции" для студентов специализаций: 101801 - "Электроснабжение железных дорог" и 101802 - "Компьютерные технологии в электроснабжении". Самара, Россия: СамГАПС, 2001.
2. M. Braunovic, V. V. Konchits, and N. K. Myshkin, *Electrical contacts: fundamentals, applications and technology*. New York: CRC Press, 2007.
3. Н. К. Мышкин, и В. В. Кончиц, *Электрические контакты*. Долгопрудный: Интеллект, 2008.
4. Ю. І. Пиндус, та Р. Р. Заверуха, *Електронне та мікропроцесорне обладнання автомобілів: навч. посіб.* Тернопіль, Україна: ТНТУ, 2016.
5. А. К. Белоусов, и В. С. Савченко, *"Электрические разъемные контакты в радиоэлектронной аппаратуре"*. Москва, Россия: Энергия, 1967.
6. А. М. Муха, Д. В. Устименко, О. Ю. Балійчук, та О. Я. Куриленко, "Результати замірів зносу контактного проводу на експериментальних ділянках змінного струму Львівської залізниці", *Електрифікація транспорту*, № 13, с. 15–20. 2017.
7. Б. Мерл, *Электрический контакт*. Пер. с англ. Москва, Россия: Госэноргоиздат, 1962.
8. ДСТУ 2823-94 Зносостійкість виробів. Тертя. зношування та мащення. Терміни та визначення.
9. А. В. Цибух, та Л. С. Скрипка, "Модель визначення переміщень від втомнісного зносу в кінематичних парах механічної частини електроприводу", *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка*, Вип. 186, с. 93-94, 2017.

10. И. Г. Кесаев, *Катодные процессы электрической дуги*. Москва, Россия: Наука, 1968.
11. В. А. Коваль, "Результати стендових досліджень ковзних контактів міського електротранспорту", *Електрифікація транспорту*, № 5, с. 41-46, 2013.
12. R. Holm, "*Electric contacts: theory and application*. by Ragnar Holm with Else Holm; preface by J.B.P. Williamson", 4th ed. Berlin/London: Springer, 2011. 484 p.
13. А. А. Григорьев, и М. А. Ваткина, "Анализ физических процессов износа электрических контактов коммутационных низковольтных аппаратов", *Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И. Я. Яковлева*. № 2 (82), с. 3–13, 2014.
14. И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, и В. С. Комбалов, *Основы расчетов на трение и износ*. Москва, Россия: Машиностроение, 1977.
15. И. В. Крагельский, и Н. М. Михин, *Узлы трения машин: справочник*. Москва, Россия: Машиностроение, 1984.
16. A. A. Elmustafa, and D. S. Stone, "Nanoindentation and the indentation size effect: Kinetics of deformation and strain gradient plasticity". *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, vol. 51, no. 2, pp. 357-381, 2003.
17. А. М. Степанчук, О. С. Богатов, та М. В. Шимків, "Триботехнічні властивості матеріалів на основі дисперсно зміцненої міді", *науково-технічний журнал Проблеми тертя та зношування*, Київ: НАУ-друк, Вип. 58, с. 65–74, 2012.
18. S. Montgomery, D. Kennedy, and N. O'Dowd, "Analysis of Wear Models for Advanced Coated Materials. Matrib" in *Proc International Conference on Materials, Tribology, Recycling, Lipanj*, Croatia, June 24-26, 2009.
19. А. Г. Кузьменко, *Развитие методов контактной трибомеханики*. Хмельницкий, Украина: ХНУ, 2010.
20. A. Lee Mao, and A., Mamrick M.S., "Fretting corrosion of tin at elevated

- temperatures", in *Proc. 34th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*. San Francisco, USA, Sept. 26–29, 1988, pp. 87-91.
21. J. F. Bruel, P. Smirou, and A. Caraballeira, "Gas environment effect on the fretting corrosion behavior of contact materials", in *Proc. 14th International Conference on Electrical Contacts*. Paris, France. 1988, pp. 219—223.
 22. И. Г. Горячева, и М. Н. Добычин, *Контактные задачи в трибологии*. Москва, Россия: Машиностроение, 1988.
 23. N. Fillot, I. Jordanoff, and Y. Berthier, "Wear modeling and the third body concept". *Wear*, vol. 262, no. 7-8, pp. 949–957, 2007.
 24. Д. М. Самервилл, *Электрическая дуга*. Москва, Россия: Госэнергоиздат, 1962.
 25. H. C. Meng, and K. C. Ludema. "Wear models and predictive equations: their form and content". *Mechanical Engineering Department, University of Michigan*, Am Arbor, MI 48109-2125, USA, Received 7 October 1994.
 26. N. K. Mukhopadhyay, and P. Paufler, "Micro- and nanoindentation techniques for mechanical characterisation of materials". *International Materials Reviews*, vol.51, pp. 209-245, 2006.
 27. da Silva Jr, C.R.Á., and G. Pintaude, "Uncertainty analysis on the wear coefficient of Archard model". *Tribology International*, vol. 41, no. 6, pp. 473-481, 2008.
 28. Ю. М. Лужнов, и В. Д. Александров, *Основы триботехники*. Учебн. пособие под ред. Ю. М. Лужнова. Москва, Россия: МАДИ, 2013.
 29. J. F. Archard, "Contact and Rubbing of Flat Surfaces". *Journal of Applied Physics*, vol. 24, no. 8, 1953.
 30. J. F. Archard, "The temperature of rubbing surfaces". *Wear*, vol. 2, no. 6, 1959.
 31. J. F. Archard, and W. Hirst, "The Wear of Metals under Unlubricated Conditions". *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 236 (1206), 1956.

32. В. П. Тихомиров, О. А. Горленко, и Б. В. Порошин, *Методы моделирования процессов в триботехнических системах*. Москва, Россия: Изд-во МГИУ, 2004.
33. John Choma, and Jr., *Circuit Elements, Devices, and Their Models*. USA: University of Southern California, 2003.
34. S. Fouvry, and P. Kapsa, "An energy description of hard coating wear mechanisms". *Surface and Coatings Technology*, vol.138, no. 2-3, pp. 141–148, 2001.
35. G. Savio, R. Meneghello, and G. Concheri, "A surface roughness predictive model in deterministic polishing of ground glass moulds". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 49, no.1, pp. 1-7, 2009.
36. В. И. Раховский, *Физические основы коммутации электрического тока в вакууме*, Москва, Россия: Наука, 1970.
37. И. С. Таев, *Электрические контакты и дугогасительные устройства аппаратов низкого напряжения*. Москва, Россия: Энергия, 1973.
38. И. Е. Декабрун, "Состояние инженерно-технических исследований в области слаботочных релейных контактов". *Электрические контакты*. Москва, Россия: Наука, с. 15–19, 1973.
39. D. Kuhlmann-Wilsdorf, "Uses of theory in the design of sliding electrical contacts", in *Proc. of the Thirty-Seventh IEEE Holm Conf. on Electrical Contacts*, 1991, pp. 1-24.
40. А. В. Лыкин, *Математическое моделирование электрических систем и их элементов: учебное пособие*. Новосибирск, Россия. Изд-во НГТУ, 2009.
41. Б. Н. Золотых, *Физические основы электрофизических и электрохимических методов обработки*. Учебное пособие. Ч.1. Москва, Россия: МГУ, 1975.
42. M. Antler, "Tribology of electronic connectors: contact sliding wear, fretting, and lubrication", Slade P.G., ed. *Electrical contacts. Principles and*

- Applications*. New York: Marcel Dekker, Inc. 1999, pp. 309-402.
43. В. Т. Омельченко, *Теория процессов на контактах*. Харьков, Украина: Вища школа, Харьк. ун-т, 1979.
 44. Г. В. Буткевич, Г. С. Белкин, и Н. А. Веденщиков, *Электрическая эрозия сильноточных контактов и электродов*. Москва, Россия: Энергия, 1978.
 45. О. Б. Брон, "Проблемы электрических контактов в сильноточных аппаратах". *Электрические контакты*. Москва, Россия: Наука, 1973. С. 7–15.
 46. M. Braunovic, V. V. Izmailov, and M. V. Novoselova, "A model for lifetime evaluation of closed electrical contacts", in *Proc. 51th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*. Chicago, USA. 2005, pp. 217-223.
 47. В. О. Кохановський, "Підвищення електроерозійної стійкості контактів низьковольтних комутаційних апаратів", *Енергетика: економіка, технології, екологія : науковий журнал*, № 1 (39), с. 81–86, 2015.
 48. А. М. Залесский, *Электрическая дуга отключения*. Москва, Россия: Госэнергоиздат, 1963.
 49. В. С. Попов, *Зносостійкість сплавів, відновлення та зміцнення деталей машин*. Навчальний посібник. За ред. Попова В. С. Запоріжжя, Україна: Мотор Січ, 2006.
 50. В. В. Шаповалов, В. А. Кохановский, и А. Ч. Эркенов, *Триботехника*. Учебн. под ред. В. В. Шаповалова, Ростов н/Д: Феникс, 2017.
 51. Д. Н. Гаркунов, *Триботехника (износ и безызносность)*. Учебник. 4-е изд., перераб. и доп. Москва, Россия: МСХА, 2001.
 52. В. А. Коваль, "Зміна форми ковзних контактів у процесі експлуатації міського електротранспорту", *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазярана*, № 42, с. 94–97, 2012.
 53. Ahmed Khairy Helmy Kobbacy, and D. N. Prabhakar Murthy, *Complex*

- System Maintenance Handbook*, ed. by. Published London: Springer-Verlag, 2008.
54. Terry Wireman, *Computerized Maintenance Management Systems*. 2nd ed. New York, USA: Industrial Press Inc, 1994.
 55. Ю. А. Петров , Э. Л. Шлимович, и Ю. В. Ирюпин, *Комплексная автоматизация управления предприятием*. Москва, Россия: Финансы и статистика, 2001.
 56. В. Ю. Соколов, *Інформаційні системи і технології*. Навч. посіб. Київ, Україна: ДУІКТ, 2010.
 57. В. М. Гужва, *Інформаційні системи і технології на підприємствах*. Навчальний посібник. Київ, Україна: КНЕУ, 2001.
 58. MESA International, Manufacturing Enterprise Solutions Association – режим доступу www.mesa.org.
 59. ГКД 34.20.661-2003, *Система технического обслуживания и ремонта общепромышленного оборудования*. Москва, Россия: Энас, 2008.
 60. ГКД 34.20.661-2003 *"Правила організації технічного обслуговування та ремонту обладнання будівель і споруд електростанцій і мереж"*. Київ, Україна: ДП «Науково-технічний учбово-консультаційний центр», 2003.
 61. S. N. Kharin, and A. P. Ershov, "Mathematical models of phenomena in electrical contacts". Monograph, *Institute of Informatics system*, Siberian Branch of RAS, 2017.
 62. А. В. Аристов, *Математическое моделирование в электромеханике*. Томск, Россия: ТПУ, 2005.
 63. R. G. Bayer, *"Engineering desing for wear. R. G. Bayer"*, second edition New York: Marcel Dekker, Inc, 2004.
 64. R. G. Bayer, Т. С. Ku, *"Handbook of analytical design for wear*. Editor: C. W. MacGregor Authors: R. G. Bayer, Т. С. Ku", 1st edition New York: Springer, 1964.

65. О. О. Ситник, В. Б. Кисельов, та Г. О. Кисельова, "Про один з методів побудови математичної моделі зносостійкості плівкових потенціометрів", *Молодий вчений*, №2 (78), с. 189 – 192, 2020.
66. A.W. Batchelor, *Engineering Tribology*. Butterworth-Heinemann, 2005. 832 p.
67. Shizhu Wen, *Principles of tribology*. Hoboken, N.J, USA: John Wiley&Sons, 2012.
68. И. И. Ворович, и В. М. Александров, *Механика контактных взаимодействий*. Москва, Россия: Физматлит, 2001.
69. А. С. Ишков, А. В. Светлов, Г. А. Солодимова, и С. И. Торгашин, "Контроль технического состояния резистивных потенциометров с применением растровой электронной микроскопии", *Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль*, № 4 (22), с. 77-83, 2017.
70. А Л. Клыпин, "Ползучесть металлов под влиянием электрического тока", *Проблемы прочности*, № 9, с. 35–39, 1972.
71. О. О. Ситник, Г. О. Кисельова, та В. Б. Кисельов, "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.
72. М. А. Разумихин, *Эрозионная устойчивость маломощных контактов*. Москва, Россия: Энергия, 1964.
73. А. А. Киселева, В. Б. Киселев, А. М. Корнеев, и С. Ю. Протасов, "Численно-аналитический способ вычисления интегралов с особенностями", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, №3, с. 64 – 69, 2008.
74. А. А. Киселева, и В. Б. Киселев, "Численно-аналитический способ вычисления интегралов с особенностями", на *конф. Интегральные уравнения — 2009 =Integral equations — 2009*, Киев, 2009, с. 89 – 91.
75. V. B. Kyselov, "Method Of Constructing A Mathematical Model Of Wear-Resistance In Potentiometer Sensors". *Visnyk Cherkaskogo Derzhavnogo*

- Tekhnologìchnogo Unìversytetu*, №3, с. 5–12, 2020.
76. M. Braunovic, and N. Aleksandrov, "Intermetallic compounds at aluminium to copper and copper to tin electrical interface", in *Proc. 38th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, Philadelphia, USA, Oct. 18-21. 1992, pp. 25-34.
 77. А. М. Мрачковський, "Дослідження електричної ерозії поверхонь різних контактних пар низьковольтних комутаційних апаратів", *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК*, вип. 242, 2016, с. 155-158.
 78. В. Г. Недорезов, и А. И. Цыганков, "Влияние продуктов износа контактной пары потенциометра на надежность его работы", на *Международном симпозиуме. Надежность и качество*, Пенза: ПГУ, 2015, т. 2, с. 153–154.
 79. А. В. Антонов, "Определение возможных путей повышения эффективности работы угольных токосъемных вставок токоприемников электроподвижного состава", на *тр. Всерос. науч.-практ. конф. Наука, творчество и образование в области электроэнергетики и электротехники – достижения и перспективы*, Хабаровск. Дальневосточный гос. ун-т путей сообщения, 2015. С. 70-75.
 80. О. О. Ситник, К. М. Ключка, В. Б. Кисельов, та Г. О. Кисельова, "Моделювання місткової ерозії слабкострумових електричних контактів засобами MatLab", *Математичне та кмп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки*, Кам'янець-Подільський, Вип. 21, с. 40 – 52, 2020.
 81. О. О. Ситник, К. М. Ключка, Г. О. Кисельова, та В. Б. Кисельов, "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.
82. Г. О. Кисельова, та В. Б. Кисельов, "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.
83. 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.
84. 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.
85. А. А. Сытник, Н. В. Раевский, А. А. Киселева, и В. Б. Киселев, "Кубатурный фильтр Калмана в задачах статистического оценивания параметров радиолокационных систем", на *I Міжнар. наук.-техн. конф. Обчислювальний інтелект*, Черкаси, 2011, с. 484 – 486.
86. 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.
87. Г. О. Кисельова, та В. Б. Кисельов, "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.
88. Д. Л. Петрянин, Н. К. Юрков, Ю. А. Романенко, "Повышение точности расчетов методов аппроксимации". *Труды международного симпозиума Надежность и качество*. № 1. с. 123-127, 2015.

89. Ю. Ф. Лазарев, *Довідник з MATLAB / Електронний навчальний посібник з курсового і дипломного проектування*. Київ, Україна: НТУУ "КПІ", 2013.
90. Г. О. Кисельова, та В. Б. Кисельов, "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.
91. С. Г. Радченко, "Статус математических моделей, получаемых с использованием регрессионного анализа". *Математичні машини і системи*. № 2, с. 138-147, 2016.
92. А. С. Ишков, и А. И. Цыганков, "Повышение качества и надежности прецизионных потенциометров". *Труды Международного симпозиума Надежность и качество*, т. 2, с. 136–138, 2016.
93. В. В. Дубровский, Д. М. Иванов, и Н.Я. Пратусевич, и др. *Резисторы: Справочник*. Под общ. ред. И. И. Четверткова, и В. М. Терехова. 2-е изд., пераб. и доп. Москва, Россия: Радио и связь, 1991. 528 с.
94. И. И. Четвертков, и Н. М. Коросько, *Потенциометры*. Москва, Россия: Сов. радио, 1978.
95. О. Б. Брон, В. Е. Фридман, и М. Е. Евсеев, "Прогнозирование поведения замкнутых контактов при длительной эксплуатации в различных средах", *Электротехника*, № 2, с. 5–7, 1978.
96. О. О. Ситник, Г. О. Кисельова, та В. Б. Кисельов, "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.
97. Alexander Sytnik, Sergey Protasov, Vladlen Kyselov, and Hanna Kyselova, "Investigation of common criteria for assessing the wear resistance of low-current contact pairs". *Danish scientific journal. Denmark*. vol. 2, no. 45, pp. 43–49, 2021.

98. Ю. І. Охай, С. К. Фомічов, "Методика дослідження матеріалів контактних наконечників на тертя та знос", *Вісник НТУУ «КПІ», серія Машинобудування*, т. 2, № 61, с. 57–60, 2011.
99. Д. В. Гаскаров, Г. А. Голинкевич и А. В. Мозгалевский, *Прогнозирование технического состояния и надежности радиоэлектронной аппаратуры*. Москва, Россия: "Советское радио", 1974.
100. А. А. Сытник, 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.
101. Л. Льюнг, *Идентификация систем. Теория для пользователя: Пер. с англ.* Под ред. Я. З. Цыпкина. Москва, Россия: Наука., 1991.
102. Я. З. Цыпкин, *Информационная теория идентификации*. Москва, Россия: Наука. Физматлит, 1995.
103. Н. М. Адоньев, В. В. Афанасьев, В. В. Борисов, и др., *Справочник по расчету и конструированию контактных частей высоковольтных электрических аппаратов*. Ленинград, Россия: Энергоатомиздат, 1988.
104. Б. С. Сотсков, *Основы теории и расчета надежности элементов и устройств автоматики и вычислительной техники*. Москва, Россия: Высшая школа, 1970.
105. М. Н. Степнов, "Статистические методы обработки результатов механических испытаний: Справочник". Москва. Россия: Машиностроение, 1985.
106. Я. Б. Шор и Ф. И. Кузьмин, *Таблицы для анализа и контроля надежности*. Москва, Россия: "Советское радио", 1968.
107. Р. Хевиленд, *Инженерная надежность и расчет на долговечность*. Пер. с англ. Москва, Россия: Энергия, 1966.
108. Г. О. Кисельова, та В. Б. Кисельов, "Застосування процесу Ейткена при розрахунках інтегралів з особливостями чисельними методами", *Вісник*

- Черкаського державного технологічного університету, №1, с. 34 – 41, 2010.*
109. В. Ю. Соколов, *Інформаційні системи і технології: Навч. посіб.* Київ, Україна: ДУІКТ, 2010.
 110. Б. Т. Ситнік, *Основи інформаційних систем і технологій: Навч. посібник.* Харків, Україна: УкрДУЗТ, 2019.
 111. Б. В. Шандров, и А. Д. Чудаков, *Технические средства автоматизации: учебник для студ. высш. учеб. заведений.* Москва, Россия: Изд. центр "Академия", 2007.
 112. С. А. Шахворостов, *Технические средства автоматизации: учеб. пособие.* Москва, Россия: МАДИ, 2011.
 113. А. М. Вендров, *Практикум по проектированию программного обеспечения экономических информационных систем: Учеб. пособие.* Москва, Россия: Финансы и статистика, 2006.
 114. Э. Брауде, *Технология разработки программного обеспечения.* Санкт-Петербург, Россия: Питер, 2004.
 115. М. Фаулер, *Архитектура корпоративных программных приложений.: Пер. с англ.* Москва, Россия: Издательский дом "Вильямс", 2006.
 116. Ю. К. Розонов. *Электрические и электронные аппараты.* Учебник для вузов. Под ред. Ю. К. Розонова. Москва, Россия: Энергоатомиздат, 1998.
 117. І. О. Ушакова, *Інформаційні системи та технології на підприємстві: конспект лекцій.* Харків, Україна: Вид. ХНЕУ, 2009.

Додатки

Додаток А

Лістинг основних модулів програм

```

kontakt.m
function [Kp,mNT,KI,alfa,Tg,Ng,dmNT]=
kontakt(Tf,Nfun,Pfun,Ifun,Td,z,y)
Tx=doslidin(Tf); % Ввод матриці (вектора) хорди
(глибини) зносу, мкм;
nT=length(Tx);%(5) кількість стовбців Tx;
N=Nfun; % Ввод матриці (вектора) кількості циклів N;
nN=length(N);%(4) кількість стовбців (значень) N;
P=Pfun; % Ввод матриці контактного тиску Pk, сН;
I=Ifun; % Ввод матриці (вектора) струму I, А;
nI=length(I); %(4) кількість стовбців (значень) I;
T=Tx(1,:); % Ввод матриці хорди механічного зносу, мкм;
[mNT,KPT]=mehmod(T,N,P); % Визначення коеф. mNT та KPT;
[mt]=kofemt(mNT,z,y); % Визначення коефіцієнта mNT;
dmNT=abs(mt-mNT)/mNT*100; % Похибка коеф. теор. моделі;
TI=Tx; % Призначення матриці струмового зносу TI;
TI(1,:)=[]; % Формування матриці струмового зносу
(видалення першого рядку - механічного зносу);
[KI,alfa]=strummod(TI,N,I,mNT,KPT); % Визначення
струмових коефіцієнтів KI та alfa;
[Kp]=kprmod(TI,N,I,mNT,KPT,KI,alfa); % Визначення
коефіцієнта Kp;
[Tg,Ng]=gznos(Tf,Td,mNT,Kp,KI,alfa,I); % Визначення
максимального гарантованого зносу та циклів;
[Ii,Nn]=meshgrid(0:0.1:max(I),0:500:max(N));
TIA=Kp*(1+KI.*Ii.^alfa).^mNT.*Nn.^mNT;
subplot(122);mesh(Ii,Nn,TIA);
xlabel('I, А'); ylabel('N, цикл'); zlabel('T, мкм');
title('Знос електричних КП при пост. струмі I, А');
subplot(121); plot(I,Ng,'k');
xlabel('I, струм, А')
ylabel('N, гарантована зносостійкість, цикл')
title('Залежність гарантованої кількості циклів
від струму')
end
-----
doslidin.m
function [T,S,Hk,Hs]=doslidin(funT)
%Величина зносу контакту.
%Механічний знос (мкм).
f=fcnchk(funT); [x,mi,mj]=f(1,1); maxi=mi; maxj=mj;
i=1; j=1; X=zeros(maxi,maxj);

```

```

while j<=maxj
    while i<=maxi
        x=f(i,j); [Hk,Hs]=statistik(x); n=size(x);
        nx=n(1)*n(2); d=reshape(x,[1,nx]);
        m=mean(d); s=std(d); t(i)=m; h(i)=s; i=i+1;
    end
    X(:,j)=t; Y(:,j)=h; i=1; j=j+1;
end
T=X; S=Y;
end

```

```

-----
function [mNT,KPT,TN]=mehmod(Tm,Nm,Pm)
T=Tm; N=Nm; P=Pm;
[coeffT,t1]=regres(T,N); % Визначення коеф. mNT і KPTI;
TN=t1; % Функція Tx для N;
[St,ert]=errorrate(T,TN,0); % Визначення похибки
розрахунку для
%механічного зносу;
nx=length(St);
ta=tastudent(nx-2);
tmax=T+ta*St;
tmin=T-ta*St;
ertmax=(tmax-TN)<0;
ertmin=(TN-tmin)<0;
er=sum(ertmax)+sum(ertmin);
if er>0
    [er]=ier(er,4);
end
mNT=coeffT(1); % Значення коефіцієнта mNT;
KPT=coeffT(2); % Значення коефіцієнта KPTI;
end

```

```

-----
strummod.m
function [KI,alfa]=strummod(Ti,Ni,Ii,m,K)
TI=Ti; N=Ni; I=Ii; mNT=m; KPT=K; j=1;
nN=length(N);%(4) кількість стовбців (значень) N;
nI=length(I); %(4) кількість стовбців (значень) I;
i=0.5:0.5:3.0; % Ввод матриці (вектора)струму i;
while j<=nN % поки j не перевищить кількість значень N;
    Ti=TI(:,j); % Вибір стовбцявідповідно циклу Nj;
    Kit=Ti./KPT./N(j).^mNT; % Визначення коеф. Ki;
    KiT=Kit.^(1/mNT)-1; % Визначення коеф. "KIN";
    KIN(j,:)=KiT; % Формування матриці коеф. KIN;
    j=j+1; % Перехід до наступного значення циклу Nj;
end

```

```

j=1; % Ввод початку відліку для функції while;
while j<=nN % поки j не перевищить кількість значень N;
    [coeffI]=regres(KIN(j,:),I,i);
    c(j,1)=coeffI(1);
    c(j,2)=coeffI(2);
    j=j+1;% Перехід до наступного значення циклу Nj;
end
alfa=sum(c(:,1))/length(c(:,1));% Розрахунок середнього
значення коефіцієнта "alfa";
KI=sum(c(:,2))/length(c(:,2));
end

```

kpmod.m

```

function [Kp]=kpmod(Ti,Ni,Ii,m,K,Ki,a)
TI=Ti; N=Ni; I=Ii; mNT=m; KPT=K; KI=Ki; alfa=a; j=1;
nN=length(N);% Кількість стовбців (значень) N;
while j<=nN % поки j не перевищить кількість значень N;
    kТПК=TI(j,:)/(1+KI.*I.^alfa).^mNT./N(j).^mNT;
    KP(j)=sum(kТПК)/length(kТПК);
    j=j+1;% Перехід до наступного значення циклу Nj;
end
Kp=(sum(KP)+KPT)/j;
end

```

gznos.m

```

function [Tg,Ng]=gznos(Tf,Td,mNT,KPT,Ki,a,I)
[T,St]=doslidin(Tf);
S=St./T;
n=size(S);
nx=n(1)*n(2);
s=reshape(S,[1,nx]);
S=sum(s)/length(s);
ta=tastudent(nx-2);
Tg=ceil(10^(log10(Td)+1.51*S^2-
ta*S/sqrt(nx)*sqrt(1+2.65*S^2)));
Ng=(Tg/KPT./(1+Ki*I.^a).^mNT)^(1/mNT);
end

```

gkontakt.m

```

function [tg,T,Nk,t,U]=gkontakt(Umax,tmax,Imax,Tf,Nfun,Pfun,Ifun,
,Td,z,y)
[Kp,mNT,KI,alfa,Tg,Ng]=kontakt(Tf,Nfun,Pfun,Ifun,Td,z,y);
[U,t]=signal(Umax,tmax);

```

```

N0=U/max(U);
Nk=N0;
j=2;
while j<=tmax+1
    Nk(j)=Nk(j-1)+abs(N0(j-1)-N0(j));
    j=j+1;
end
T=Kp*(1+KI.*Imax.^alfa).^mNT.*Nk.^mNT;
subplot(131); plot(t,U,'k'); grid on
xlabel('час, t, год')
ylabel('напруга, U, В')
title('Зміна напруги датчика рівня рідини в часі')
subplot(132); plot(t,Nk,'k'); grid on
xlabel('час, t, год')
ylabel('напрацювання, N, цикл')
title('Зміна напрацювання датчика рівня рідини в часі')
subplot(133); plot(t,T,'k'); grid on
xlabel('час, t, год')
ylabel('знос, T, мкм')
title('Зміна зносу датчика рівня рідини в часі')
if max(T)>=Tg
    k=1;
    while T(k)<=Tg
        k=k+1;
    end
    disp('Критичний знос досягнуто при')
    tg=t(k)
    Ng=Nk(k);
    subplot(121); plot(t,Nk,'k',tg,Ng,'or'); grid on;
    legend('<Напрацювання>', '<Критичний рівень
напрацювання>')
    xlabel('час, t, год')
    ylabel('напрацювання, N, цикл')
    title('Зміна напрацювання датчика рівня рідини в
часі')
    Tg=T(k);
    subplot(122); plot(t,T,'k',tg,Tg,'or'); grid on;
    legend('<Знос>', '<Критичний рівень зносу>')
    xlabel('час, t, год')
    ylabel('знос, T, мкм')
    title('Зміна зносу датчика рівня рідини в часі')
else
    disp('Критичного зносу не досягнуто.')
    disp('Критичний знос буде досягнуто при')
    Ng=(Tg/(Kp*(1+KI*Imax^alfa)^mNT))^(1/mNT);

```

```
    tg=tmax*Ng/max(Nk)
end
end
```

Додаток Б

Лістинг допоміжних модулів програм

```

statistik.m
function [Hk,Hc,m,s,dd]=statistik(funS)
f=funS; [Hk]=kolmog(f); [Hc]=cochran(f);
if Hk==1
    [F]=ier(f,1);
elseif Hc==1
    [F]=ier(f,2);
end
n=size(f); nx=n(1)*n(2); d=reshape(f,[1,nx]);
m=mean(d); s=std(d); dd=max(s)/max(m); [R]=koefR(dd);
Q=n(1)/R; [b]=koefQ(Q);
if dd>b
    [F]=ier(f,3);
end
end
-----
kolmog.m
function [H,D,k]=kolmog(x)
n=size(x); nx=n(1)*n(2); d=reshape(x,[1,nx]);
ds=sort(d); j=1; i=1;g=1;
while j<nx % поки j не перевищить кількість значень N;
    k(g,1)=ds(j); t=1;
    while ds(i)==ds(j)
        k(g,2)=t; i=i+1; t=t+1;
    end
    g=g+1; j=i;
end
dsx=ds(nx-1);
if ds(nx)==dsx
    g=g-1; k(g,2)=t;
else
    k(g,1)=ds(nx); k(g,2)=1;
end
nk=length(k);
j=2; kn=k(:,2); kg(1)=kn(1);
while j<=nk
    kg(j)=kg(j-1)+kn(j); j=j+1;
end
k(:,3)=kg; k(:,4)=kg/max(kg); j=2; Dn=k(:,4); Dk(1)=0;
while j<=nk
    Dk(j)=abs(Dn(j-1)-Dn(j)); j=j+1;

```



```

end
k(:,5)=Dk; D=max(Dk)*sqrt(nx); H=D>=1;
end

```

```

-----
cochran.m
function [H,C,C0]=cochran(x)
n=size(x); m=n(2); k=n(1)-1; s=(std(x)).^2;
C=max(s)/sum(s); [C0]=qcochran(m,k); H=C>=C0;
end

```

```

-----
koefmt.m
function [mt]=koefmt(mNT,z,y)
m0=[1/12 1/14 1/13 1/13; 1/9 1/11 1/10 1/12];
j=1; i=1; Q=mNT;
if z==0 & y==0
    mt=1/4; i=0;
elseif z==0 & y==1
    mt=1/3; i=0;
elseif z>0 & y==0
    Q0=m0(1,:);
else
    Q0=m0(2,:);
end
b=1;
while j<=i
    q=Q0(j);
    if q<=Q
        if i==1
            b=i;
        else
            q1=Q-q; q2=Q0(j-1)-Q;
            if q1<=q2
                b=j;
            else
                b=j-1;
            end
            i=i-1;
        end
        j=j+1; i=i+1;
    end
    mt=Q0(b);
end
end

```

```

-----
ier.m

```

```

function [F]=ier(H,kod)
f=H;
if kod==1
    disp('Матриця:')
    x=f
    disp('не відповідає нормальному розподілу за
критерієм Колмагорова: Dn<1')
    [Hk,K]=kolmog(f);
    Dn=K
elseif kod==2
    disp('Матриця:')
    x=f
    disp('не відповідає нормальному розподілу за
критерієм Кохрена: Kn<Ch')
    [Hk,K,Y]=cochran(f)
    Kn=K
    Ch=Y
elseif kod==3
    disp('Похибка матриці:')
    x=f
    disp('для рівня 95% довірчої області: dd<b')
    n=size(f); nx=n(1)*n(2); d=reshape(f,[1,nx]);
    m=mean(f); s=std(f); dd=sum(s)/sum(m)
    [R]=koefR(dd); Q=nx/R; [b]=koefQ(Q)
elseif kod==4
    disp('Результат перевищує довірчі межі')
    disp('для 95% достовірності в')
    f
    disp('точках.')
end
F=f;
return

```

```

function [S,Y]=errorrate(x,y,e)
m=length(x);
S=abs(x-y);
Y=1/m*sum(abs(x-y)./y)*100;
if (e==1)
    disp('Похибка апроксимації, %:')
    Y
end

```

```

function [U,t]=signal(Umax,tmax)
U=[0 Umax*rand(1,tmax)];
t0=[0 rand(1,tmax)];

```

```
t=t0;  
j=2;  
while j<=tmax+1  
    t(j)=t(j-1)+abs(t0(j-1)-t0(j));  
    j=j+1;  
end  
t=t/max(t)*tmax;  
end
```

Додаток В

Лістинг баз даних програм

```

qcochran.m
function [C]=qcochran(m,k)
Co=[0.9985 0.9750 0.9392 0.9057 0.8772 0.8534 0.8332
0.8159 0.8010 0.7880; 0.9669 0.8709 0.7977 0.7457
0.7071 0.6771 0.6530 0.6333 0.6167 0.6025; 0.9065
0.7679 0.6841 0.6287 0.5895 0.5598 0.5365 0.5175 0.5017
0.4884; 0.8412 0.6838 0.5981 0.5441 0.5065 0.4783
0.4564 0.4387 0.4241 0.4118; 0.7808 0.6161 0.5321
0.4803 0.4447 0.4184 0.3980 0.3817 0.3682 0.3568;
0.7271 0.5612 0.4800 0.4307 0.3974 0.3726 0.3535 0.3384
0.3259 0.3154; 0.6798 0.5157 0.4377 0.3910 0.3595
0.3362 0.3185 0.3043 0.2926 0.2829; 0.6385 0.4775
0.4027 0.3584 0.3286 0.3067 0.2901 0.2768 0.2659
0.2568; 0.6020 0.4450 0.3733 0.3311 0.3029 0.2823
0.2666 0.2541 0.2439 0.2353];
C=Co(m-1,k);
end

```

```

-----
koefR.m
function [R]=koefR(s)
S=ceil(s*100); Rs=[0.001 0.002 0.005 0.009 0.013 0.019
0.026 0.035 0.044 0.054 0.066 0.079 0.094 0.109 0.126
0.145 0.165 0.186 0.210 0.235 0.261 0.290 0.320 0.352
0.386 0.423 0.461 0.502 0.545 0.591 0.639 0.690 0.744
0.801 0.860 0.923 0.989 1.06 1.13 1.21 1.29 1.37 1.46
1.55 1.65 1.75 1.86 1.97 2.08 2.20 2.33 2.46 2.60 2.74
2.89 3.04 3.21 3.37 3.56 3.73 3.97 4.12 4.32 4.53 4.75
4.98 5.21 5.46 5.71 5.97 6.24 6.53 6.82 7.12 7.43 7.75
8.08 8.43 8.78 9.15 9.53 9.92 10.3 10.7 11.2 11.6 12.1
12.5 13.0 13.5 14.0 14.6 15.1 15.7 16.2 16.8 17.4 18.1
18.7]; R=Rs(S);
end

```

```

-----
koefQ.m
function [b]=koefQ(Q)
Q0=[27060 6760 3010 1690 1080 752 552 464 334 271 224
188 160 138 120 106 93.6 83.5 74.9 67.6 61.3 55.9 51.1
47.0 43.3 40.0 37.1 34.5 32.2 30.1 28.2 26.4 24.8];
j=1; i=1;
while j<=i
    q=Q0(j);
    if q<=Q

```

```

        q1=Q-q; q2=Q0(j-1)-Q;
        if q1<q2
            b=j/100;
        else
            b=(j-1)/100;
        end
        i=i-1;
    end
    j=j+1; i=i+1;
end
end

```

tastudent.m

```

function [ta]=tastudent(k)
S0=[12.706 4.303 3.182 2.776 2.571 2.447 2.365 2.306
2.262 2.228 2.201 2.179 2.160 2.145 2.131 2.120 2.110
2.101 2.093 2.086 2.080 2.074 2.069 2.064 2.060 2.056
2.052 2.048 2.045 2.042];
if k<=30
    ta=S0(k);
else
    ta=2;
end
end

```

koefmt.m

```

[mt]=koefmt(mNT,z,y)
function [mt]=koefmt(mNT,z,y)
m0=[1/12 1/14 1/13 1/13; 1/9 1/11 1/10 1/12];
j=1; i=1; Q=mNT;
if z==0 & y==0
    mt=1/4; i=0;
elseif z==0 & y==1
    mt=1/3; i=0;
elseif z>0 & y==0
    Q0=m0(1,:);
else
    Q0=m0(2,:);
end
b=1;
while j<=i
    q=Q0(j);
    if q<=Q
        if i==1
            b=i;

```

```
else
    q1=Q-q;
    q2=Q0(j-1)-Q;
    if q1<=q2
        b=j;
    else
        b=j-1;
    end
    i=i-1;
end
j=j+1;
i=i+1;
end
mt=Q0(b);
end
end
```

Додаток Г

Інформація про впровадження результатів дисертаційного дослідження



ЧеркасиЕлеваторМаш ТОВ
проспект Хіміків, 7А,
м. Черкаси, 18018, Україна

тел/факс +38 0472 64 24 18
e-mail: bronto@bronto.ua
<http://www.bronto.ua>

ЧеркасиЕлеваторМаш

BRONTO TM

CherkasyElevatorMash Ltd.
7A Khimikiv
18018 Cherkasy Ukraine

tel/fax +38 0472 64 24 18
e-mail: bronto@bronto.ua
<http://www.bronto.ua>

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ТОВ ЧеркасиЕлеваторМаш

Черненко О.М.



АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи Кисельова В.Б.
«Інформаційна технологія моделювання процесів зносостійкості слабкострумових
електричних контактних пар ковзання»

Науково-практична розробка «Інформаційна технологія моделювання процесів зносостійкості слабкострумових електричних контактних пар ковзання», що базується на результатах, отриманих в дисертаційній роботі Кисельова В.Б. «Інформаційна технологія моделювання процесів зносостійкості слабкострумових електричних контактних пар ковзання», була застосована для автоматизації процесів визначення зносу обладнання з метою попередження його відмови.

Впровадження результатів, отриманих Кисельовим В.Б, в систему автоматизації процесів дозволило зменшити енерговитрати на ремонт та планове обслуговування електромеханічного обладнання.

Головний технолог

Я.А. Бондар

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор технічний
АТ «Черкаський автобус»Чанцов В.С.
2010 р.**ДОВІДКА**

про використання науково-практичної розробки

“Інформаційна технологія і комплекс програм для моделювання та визначення
ресурсу електричних контактних пар ковзання”

Кисельова Владлена Борисовича

Науково-практична розробка “Інформаційна технологія і комплекс програм для моделювання та визначення ресурсу електричних контактних пар ковзання”, яка базується на результатах, отриманих в дисертаційній роботі Кисельова В.Б. “Інформаційна технологія моделювання процесів зносостійкості слабкострумів електричних контактних пар ковзання”, використовується для автоматизації процесів опрацювання експериментальних даних при математичному та комп’ютерному моделюванні для визначення ресурсу потенціометричних датчиків положення механізмів, датчиків палива та релейних систем, як засіб спрощення та побудови апроксимаційних моделей зносостійкості для обчислювальних комплексів, контрольно-перевірочних комплексів та їхніх складових частин у складі виробу.

Розроблені автором методика, комплекс програм та визначення ресурсу електричних контактних пар ковзання застосовуються при розробці програмно-алгоритмічних засобів моделювання та визначення ресурсу для контрольно-перевірочних комплексів та їхніх складових частин у складі виробу.

Провідний інженер з якості
відділу гарантійного обслуговування
АТ “Черкаський автобус”,
канд. техн. наук, доцент

Д.П. Рубан

ЗАТВЕРДЖУЮ

Ректор Черкаського державного
технологічного університету
доктор політичних наук, доцент

О. О. Григор

20 р.

**ДОВІДКА**

про використання науково-практичної розробки

«Інформаційна технологія і комплекс програм для моделювання та визначення ресурсу електричних контактних пар ковзання»

Кисельова Владлена Борисовича

Результати дисертаційної роботи Кисельова В. Б. «Інформаційна технологія моделювання процесів зносостійкості слабкострумових електричних контактних пар ковзання», що висвітлені в науково-практичній розробці «Інформаційна технологія і комплекс програм для моделювання та визначення ресурсу електричних контактних пар ковзання» успішно були використані при виконанні науково-дослідної роботи «Моделювання процесу технічної експлуатації силових трансформаторів з урахуванням закону дифузійно-немонотонного розподілу їх відмов».

Також результати дисертаційного дослідження Кисельова В. Б. ефективно впроваджуються в навчальний процес співробітниками кафедри електротехнічних систем Черкаського державного технологічного університету при підготовці здобувачів вищої освіти освітнього ступеня «бакалавр» та «магістр» за спеціальністю «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» («Електротехнічні системи електроспоживання»), а саме при викладанні курсів «Електричні апарати» та «Математичне моделювання систем і процесів», при курсовому проектуванні та виконанні магістерських робіт.

Перший проректор,
канд. техн. наук, доцент

А.В. Гончаров

Начальник навчально-методичного відділу,
канд. екон. наук, доцент

С.М. Мильніченко

Декан
факультету електронних технологій
і робототехніки,
канд. техн. наук, доцент

А.М. Чорній

Додаток Д

Список публікацій здобувача 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. *Запропоновано метод побудови математичної моделі зносостійкості потенціометричних датчиків з урахуванням струмового навантаження.*
- [2] О. О. Ситник, К. М. Ключка, В. Б. Кисельов, та Г. О. Кисельова, "Моделювання місткової ерозії слабкострумових електричних контактів засобами MatLab", *Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки*, Кам'янець-Подільський, Вип. 21, с. 40 – 52, 2020. *Запропоновано моделі механічної ерозії слабкострумових електричних контактних пар отриманих методом ідентифікації.*
- [3] О. О. Ситник, В. Б. Кисельов, та Г. О. Кисельова, "Про один з методів побудови математичної моделі зносостійкості плівкових потенціометрів", *Молодий вчений*, №2 (78), с. 189 – 192, 2020. *Створено математичну модель механічного зносу контактних пар ковзання для плівкових потенціометрів при постійному значенні енергії в зоні тертя.*
- [4] Г. О. Кисельова, та В. Б. Кисельов, "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. *Запропоновано рекурентні алгоритми реалізації методу простих ітерацій.*
- [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. *Запропонував спосіб розв'язання рівнянь в програмі MatLab.*

- [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. *Запропонував алгоритм для визначення похибок у складі емпіричних даних.*
- [7] Г. О. Кисельова, та В. Б. Кисельов, "Застосування процесу Ейткена при розрахунках інтегралів з особливостями чисельними методами", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, №1, с. 34 – 41, 2010. *Запропонував метод конструювання адаптивних алгоритмів.*
- [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. *Запропонував модульну структуру універсального алгоритму чисельного розв'язку.*
- [9] А. А. Сытник, 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. *Запропонував спосіб визначення характеристик вимірювальних перетворювачів.*
- [10] А. А. Киселева, В. Б. Киселев, А. М. Корнеев и С. Ю. Протасов, "Численно-аналитический способ вычисления интегралов с особенностями", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, №3, с. 64 – 69, 2008. *Запропонував спосіб виділення особливості при наближеному обчисленні.*
- [11] Alexander Sytnik, Sergey Protasov, Vladlen Kyselov, and Hanna Kyselova, "Investigation of common criteria for assessing the wear resistance of low-current contact pairs". *Danish scientific journal. Denmark*. vol. 2, no. 45, pp. 43–49, 2021. *Запропонував метод прогнозування зносостійкості*

контактних пар ковзання дротяних потенціометрів, що працюють під струмовим навантаженням.

- [12] О. О. Ситник, К. М. Ключка, Г. О. Кисельова, та В. Б. Кисельов, "Комп'ютерна модель місткової ерозії електричних контактів" на *Міжнар. наук.-практ. конф. Проблеми енергоефективності та автоматизації в промисловості та сільському господарстві*, Кропивницький, 2020, с. 49 – 51. *Здобувачем проведено математичне моделювання місткової ерозії електричних контактних пар засобами математичної системи MATLAB.*
- [13] О. О. Ситник, Г. О. Кисельова, та В. Б. Кисельов, "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. *Запропонував використання показників для моделювання зносостійкості електричних контактних пар ковзання.*
- [14] О. О. Ситник, Г. О. Кисельова, та В. Б. Кисельов, "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. *Провів аналіз залежності зміни вихідної напруги потенціометра зі штучною та природною нульовою точкою при закорочуванні витків обмотки.*
- [15] Г. О. Кисельова, та В. Б. Кисельов, "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. *Розробив алгоритм чисельного розв'язання рівняння.*
- [16] Г. О. Кисельова, та В. Б. Кисельов, "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. Запропоновано ефективний метод чисельного розв'язку рівнянь в MatLab.

- [17] А. А. Сытник, Н. В. Раевский, А. А. Киселева, и В. Б. Киселев, "Кубатурный фильтр Калмана в задачах статистического оценивания параметров радиолокационных систем", на *I Міжнар. наук.-техн. конф. Обчислювальний інтелект*, Черкаси, 2011, с. 484 – 486. *Запропонував алгоритм зниження похибок статистичної оцінки параметрів.*
- [18] А. А. Киселева, и В. Б. Киселев, "Численно-аналитический способ вычисления интегралов с особенностями", на *конф. Интегральные уравнения — 2009 =Integral equations — 2009*, Киев, 2009, с. 89 – 91. *Запропонував спосіб наближеного обчислення з виділенням особливості.*