

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДНІПРОПЕТРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

АНТОНОВ АНДРІЙ ВЛАДИСЛАВОВИЧ

УДК 629.423.33:621.336.2

ДИСЕРТАЦІЯ
УДОСКОНАЛЕННЯ ВЗАЄМОДІЇ ЕЛЕМЕНТІВ
СИЛЬНОСТРУМОВОГО КОНТАКТУ ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ

Спеціальність 05.22.09 – Електротранспорт

Галузь знань 027 – Транспорт

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

_____ А. В. Антонов

Науковий керівник –
Сиченко Віктор
Григорович
доктор технічних наук,
професор

Дніпро 2018

АНОТАЦІЯ

Антонов А. В. Удосконалення взаємодії елементів сильнотривового контакту електротранспорту. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.22.09 – Електротранспорт (Галузь знань 027 – Транспорт). – Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Дніпро, 2018.

Дисертація присвячена удосконаленню взаємодії елементів сильнотривового контакту електротранспорту, шляхом врахування фізико-механічних параметрів струмознімальних елементів.

Визначена сукупність основних впливаючих факторів на процес зносу елементів пари сильнотривового контакту «контактний провід – струмознімальний елемент», шляхом проведення повного факторного аналізу

На основі експериментальних досліджень зношування елементів пари третя сильнотривового контакту, отримані залежності зносу контактного проводу та струмознімальних елементів від сукупності впливаючих факторів Обґрунтований негативний вплив розкиду основних фізико-механічних параметрів вугільних струмознімальних елементів на знос елементів сильнотривового контакту електротранспорту в умовах експлуатації.

Встановлено, що основним впливаючим фактором на процес зносу контактних проводів та струмознімальних елементів є натиск струмоприймача.

Встановлено статистичний взаємозв'язок між твердістю вуглецевих струмознімальних елементів та питомим електричним опором, використання яких дозволяє в експлуатаційних умовах враховувати параметри кожного окремого струмознімального елемента і тим самим покращити показники надійності їх роботи та економічність струмознімання. Встановлено, що для обраного розкиду твердості струмознімальної частини, максимальне

значення зносу контактного проводу перевищує мінімальне в понад 2 рази.

Вперше враховано сукупність впливаючих на процес зносу факторів та параметрів струмознімальних елементів, з врахуванням впливу яких розроблено прогнозу нейромережеву модель зносу пари тертя струмознімання «контактний провід – струмознімальний елемент», яка дозволяє прогнозувати знос пари тертя в залежності від змінних впливаючих факторів та параметрів, а також враховувати невизначеності в процесі електромеханічного зносу сильнострумових контактів, які не формалізуються традиційними методами.

Удосконалено метод прогнозування зносу ковзного сильнострумового контакту, який відрізняється від існуючих можливістю врахування сукупності впливаючих на процес струмознімання статичних та змінних динамічних параметрів контактних підвісок і струмоприймачів, графіку споживаного струму, швидкості електрорухомого складу, параметрів струмознімальних елементів та на основі їх фізико-механічних параметрів дозволяє визначати раціональне розташування струмознімальних елементів на полозі струмоприймача для досягнення зменшення зносу як самих струмознімальних елементів, так і контактних проводів.

Практичне значення отриманих результатів визначається застосування розроблених методик, методу та отриманих залежностей для удосконалення взаємодії елементів сильнострумового контакту електротранспорту, використання та врахування яких дозволяє, у першому наближенні, досягти зменшення зносу контактного проводу на 9–10% та зменшити недовикористання струмознімальних елементів полозів струмоприймачів на 25%.

Розроблені експериментальні установки для дослідження процесу струмознімання дозволяють в умовах, наближених до експлуатаційних, проводити дослідження на знос різних типів струмознімальних елементів та контактних проводів.

Результати роботи у вигляді прогнозних математичних моделей, методу прогнозування зносу ковзного сильнострумового контакту, технічних

засобів визначення параметрів струмознімальних елементів та зносу пари тертя струмознімання, впроваджені в навчальний процес Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна та використовуються при підготовці бакалаврів і магістрів зі спеціальності «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», прийняті до використання службою електропостачання регіональної філії «Львівська залізниця» та підприємством ТОВ «Глорія».

Підтверджена доцільність застосування прогнозних нейромережових моделей замість проведення тривалих в часі експериментальних досліджень, економічний ефект від їх використання становить 33,4 тис. грн при виконанні проведеного в роботі об'єму досліджень.

Пристрій для визначення параметрів вуглецевих струмознімальних елементів дозволяє реалізовувати в собі алгоритм визначення раціонального розміщення струмознімальних елементів на полозі струмоприймача, економічний ефект від його використання в умовах локомотивних депо може сягнути 130 тис. грн/рік.

Результати роботи у складі проекту на обласному конкурсі проектів «Молоді вчені – Дніпропетровщині» отримали фінансування на підставі конкурсного відбору у 2016 р., чим підтверджується практична значимість роботи.

Ключові слова: струмознімання, контактний провід, струмознімальний елемент, взаємодія контактного проводу зі струмознімальними елементом, пара тертя, знос, електричний транспорт.

ABSTRACT

Antonov A.V. Improving of the high current elements interaction on electric transport. – Qualifying scientific work on the rights of manuscripts.

Dissertation for the degree of candidate of technical sciences (doctor of philosophy), specialty 05.22.09 – Electric transport. (Branch of knowledge 027 – Transport). – Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named

after Academician V. Lazaryan, Dnipro, 2018.

The dissertation is devoted to the improvement interaction of high-current contact elements of electric transport, taking into account the physical and mechanical parameters of the high-current contact elements.

The set of the main influencing factors on the process of wear of the elements of the friction pair of the current collection "contact wire – contact element" is determined, by conducting a complete factor analysis.

The negative influence of the basic physical-mechanical coal contact elements parameters on the wear intensity of friction pairs under exploitation conditions is substantiated. The main influence on the wear process of contact wires and current collector elements can be considered the pressure of current collector.

On the basis of experimental research on the friction pair wear of the high-current contact, the wear dependences of the contact wire and the current collector elements from the sum influencing factors were obtained and the optimal conditions for the friction pair interaction are determined. It is established that the wear of the sliding contact is significantly influenced by the physical-mechanical characteristics of the current collector elements.

The recommendations for increasing the efficiency of using the resource of the current collector friction pair, by rational placement of current collector elements by the value of hardness.

The statistical relationship between the hardness of carbon contact elements and the specific electrical resistance is established, the use of which allows, in the operating conditions, to take into account the parameters of each individual current collection element and thereby improve the reliability of their operation and the efficiency of the current collection.

For the first time, is taken into account the set of factors and parameters of current collection elements influencing the friction pair wear. Taking into account these parameters a forecasting neural network model of friction pair wear, is developed, which allows to determine the wear of a friction pair depending on the

variables of influencing factors and parameters and differs from existing models in that it allows to take into account uncertainties in the process of electromechanical wear of high-current contacts that are not formalized by traditional methods.

Удосконалено метод прогнозування зносу ковзного сильнострумового контакту, який відрізняється від існуючих можливістю врахування сукупності впливаючих на процес струмознімання статичних та змінних динамічних параметрів контактних підвісок і струмоприймачів, графіку споживаного струму, швидкості електрорухомого складу, параметрів струмознімальних елементів та на основі їх фізико-механічних параметрів дозволяє визначати раціональне розташування струмознімальних елементів на полозі струмоприймача для досягнення зменшення зносу як самих струмознімальних елементів, так і контактних проводів.

The practical significance of the results obtained is that the developed prototype of the device for determining the parameters of the coal contact elements allows operatively, in terms of operation, to determine the hardness and specific electrical resistance of carbon (or carbon based) current collection elements, and in combination with the method of evaluating the influence of system parameters current collection on the process of friction pair wear allows to increase the indexes of reliability of the work of the carbon contact elements and a contact wire and increase the efficiency of current collection by placing special contact elements on the current collector.

The developed experimental device for research of the current collection process allow, in conditions close to the operational ones, to conduct comparative studies on wear of various types of contact elements and contact wires.

The appropriateness of the use of predictive neural network models has been confirmed instead of the long-term experimental research, the economic effect of which is 33.4 th. UAN when performing the research volume given in the work.

Results of work in the form of predictive mathematical models and technical means for carrying out measurements of parameters of current collection elements and friction pair wear, introduced in the educational process of the Dnipropetrovsk

National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, are used in preparation of bachelors and masters in the specialty "Power engineering, electrical engineering and electromechanics".

Was provides recommendations for the locomotive depot of Odessa and Pridniprovskaya Railway for increasing the efficiency of using the resource of the friction pair of current collection, by rational placement of current collector elements by the value of hardness on the current collector.

In the locomotive depot of the Pridniprovskaya Railway, a device for determining the parameters of coal contact elements is adopted, which implements a method of estimating the influence of the parameters current collection system on the process friction pair wear, the economic effect of which can reach 130 thousand UAH / year.

The results of the project as part of the project at the regional contest of projects "Young Scientists for Dnipropetrovsk region" were funded on the basis of a competitive selection in 2016, which confirms the practical significance of the work.

Keywords: current collection, contact wire, current collection element, interaction of the contact wire with the current collection element, friction pair, wear, electric transport.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Основні положення і результати дисертації опубліковано:

- в закордонних виданнях, які індексовані в Scopus:

1. A. V. Antonov, and V. G. Sychenko, «Resource Evaluation of Friction Pair «Contact Wire – Contact Strip», *Archives of Transport*, vol. 44, issue 4. pp. 7-14, 2017.

- в закордонних виданнях, які індексовані в Index Copernicus:

2. A. V. Antonov, B Yu. L. Bolshakov, and V. G. Sychenko, «Development a Forecasting Method of Friction Pairs Wear of The Current Collection», *Problemy kolejnictwa*, vol. 61, No 177, pp. 13-19, 2017.

- в закордонних фахових виданнях:

3. А. В. Антонов, «Определение направлений повышения эффективности работы системы «контактный провод – токоприемник» при внедрении скоростного движения», *Наука и транспорт. Вестник Белорусского Государственного университета транспорта*, №1 (34), с. 14 – 17, 2017.

- у фахових виданнях, затверджених МОН України:

4. А. В. Антонов, В. Г. Сиченко, и В. Н. Яндович «Сравнительный анализ контактных подвесок в странах Евросоюза и Украины: организация надежного токосъема», *Електрифікація транспорту*, № 7, с. 67-77, 2014.

5. А. В. Антонов, та Ю. Л. Большаков, «Підвищення ресурсу вугільних струмознімальних вставок струмоприймачів швидкісного електрорухомого складу в умовах експлуатації», *Наука та прогрес транспорту Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту*, № 5, с. 57-70, 2015.

6. А. В. Антонов, «Діагностування вугільних струмознімальних вставок в умовах експлуатації», *Електрифікація транспорту*, №9, с. 15-22, 2015.

7. А. В. Антонов, та Ю. Л. Большаков, «Дослідження властивостей струмознімальних елементів та їх впливу на ефективність роботи трибосистеми «контактний провід – вугільна вставка», *Наука та прогрес транспорту Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту*, № 6, с. 35–44, 2015.

8. В. О. Дьяков, А. В. Антонов, та С. Ю. Малинка, «Захист нейтральних вставок контактної мережі від перепалів», *Електрифікація транспорту*, №12, с. 64 – 70, 2016.

9. А. В. Антонов, «Підвищення технічного ресурсу пар тертя струмознімання», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, №1, с. 39 – 44, 2018.

- додаткові праці, що є навчальними посібниками:

10. В. О. Дьяков, Д. О. Босий, та А. В. Антонов, *Контактна мережа електрифікованих залізниць. Улаштування контактної мережі*, Дніпро, Україна: Вид-во ПФ «Стандарт-Сервіс», 2017.

- тези доповідей та матеріали міжнародних науково-практичних конференцій:

11. А. В. Антонов, «Підвищення ресурсу вугільних струмознімальних вставок струмоприймачів електрорухомого складу», в матеріалах *VII Міжнародної науково-практичної конференції «Електрифікація транспорту» «Транселектро»*, Одеса, 2014, с. 62.

12. А. В. Антонов, «Надійність системи «контактний провід – струмознімальний елемент», в матеріалах *74-тої Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту»*, Дніпропетровськ, 2014, с. 147.

13. А. В. Антонов, «Підвищення надійності вставок струмоприймачів електрорухомого складу», в матеріалах *V Міжнародної науково-практичної конференції «Енергозбереження на залізничному транспорті та в промисловості»*, Воловець, 2014, с. 4-5.

14. А. В. Антонов, та В. О. Манко, «Діагностування вугільних вставок як засіб ресурсозбереження», в матеріалах *VI Міжнародної науково-практичної конференції «Енергозбереження на залізничному транспорті та в промисловості»*, Воловець, 2015, с. 6.

15. А. В. Антонов, «Підвищення ефективності роботи вугільних струмознімальних вставок струмоприймачів електрорухомого складу», в матеріалах *VIII Міжнародної науково-практичної конференції «Електрифікація залізничного транспорту» «Транселектро-2015»*, Одеса, 2015. с. 91.

16. А. В. Антонов, «Аналіз пошкоджуваності струмоприймачів швидкісних електропоїздів», тези доповідей *VII Міжнародної науково-практичної конференції «Безпека та електромагнітна сумісність на залізничному транспорті» (S&EMC)*, Розлуч, 2016, с. 5-6.

17. А. В. Антонов, «Дослідження взаємодії пари тертя «контактний провід – струмознімальний елемент», в лабораторних умовах» тези доповідей *I-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Енергооптимальні*

технології перевізного процесу», Моршин, 2016, с. 16-17.

18. А. В. Антонов, «Дослідження процесу зношування елементів пари тертя «контактний провід – струмознімальний елемент», тези доповідей *VIII Міжнародної науково-практичної конференції «Безпека та електромагнітна сумісність на залізничному транспорті»*, Чернівці, 2017, с. 12-13.

19. А. В. Антонов, «Оцінка ресурсу елементів пари тертя «контактний провід – струмознімальний елемент», тези доповідей *II-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Енергооптимальні технології перевізного процесу»*, Львів, 2017, с. 26-27.

20. А. В. Антонов, «Увеличение ресурса пар трения токосъема», в материалах *VIII международной научно-практической конференции, посвященной году науки «Проблемы безопасности на транспорте»*, Гомель, 2017, с. 75.

21. А. В. Антонов, «Нейромережеві моделі, як засіб прогнозування зношування сильнострумового контакту». в матеріалах *X Міжнародної науково-практичної конференції «Електрифікація транспорту» «Транселектро-2017»*, Дніпро, 2017, с. 62 – 63.

- які додатково відображають наукові результати дисертації:

22. А. В. Антонов, Ю. Л. Большаков, та В. Г. Сиченко, «Пристрій для визначення параметрів вугільних струмознімальних елементів», *Пат. UA 114369*, МПК: B60L 5/00, № u201608594, опубл. 10.03.2017.

23. Антонов А. В., «Пристрій для визначення коефіцієнта тертя та інтенсивності зношування трибопар», *Пат. UA 116437*, МПК: B60L 5/00, G01N 3/56, G01N 19/02, № u201610905; 25.05.2017.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	14
РОЗДІЛ 1 Аналіз процесу струмознімання.....	23
1.1 Вплив параметрів контактних підвісок та струмоприймачів на процес струмознімання.....	25
1.2 Аналіз статистичних даних пошкоджень елементів контактних підвісок та струмоприймачів.....	32
1.3 Аналітичний огляд робіт, направлених на підвищення якості та економічності струмознімання.....	43
1.4 Постановка мети та задачі досліджень.....	53
Висновки до розділу 1.....	55
РОЗДІЛ 2 Експериментальні дослідження параметрів та процесу зношування ковзного сильнострумового контакту.....	56
2.1 Визначення твердості контактної поверхні та питомого електричного опору струмознімальних елементів.....	57
2.1.1 Визначення твердості струмознімальних елементів.....	59
2.1.2 Визначення питомого електричного опору та функціональної залежності фізико-механічних параметрів струмознімальних елементів....	67
2.2 Дослідження впливу контактного опору пар тертя та перехідного опору «струмознімальний елемент – полоз» на процес струмознімання.....	75
2.3 Експериментальні дослідження зносу пари тертя струмознімання.....	80
2.3.1 Оптимальна організація експериментальних досліджень.....	80
2.3.2 Методика проведення експериментальних досліджень на зношування сильнострумового контакту.....	87
2.3.3 Дослідження зношування елементів пари тертя при змінній силі натиску.....	90
2.3.4 Дослідження зношування пар тертя при протіканні струму.....	94
2.3.5 Дослідження інтенсивності зношування пар тертя при зміні вологості в зоні тертя.....	101
Висновки до розділу 2.....	106

РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОГО АПАРАТУ ПРОГНОЗУВАННЯ ЗНОШУВАННЯ ПАР ТЕРТЯ ПРИ СТРУМОЗНІМАННІ.....	109
3.1 Аспекти створення прогнозних нейромережових моделей.....	110
3.2 Алгоритм вибору якісних нейронних мереж.....	119
3.3 Створення та перевірка адекватності нейронних мереж.....	122
3.4 Розробка методу прогнозування зносу ковзного сильнострумове- контакту.....	133
Висновки до розділу 3.....	141
РОЗДІЛ 4 ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ КОВЗНОГО СИЛЬНОСТРУМОВОГО КОНТАКТУ.....	144
4.1 Оцінка ефективності методу прогнозування зношування ковзного сильнострумове-контакту.....	144
4.2 Розрахунок економічної ефективності.....	158
4.2.1 Визначення вартості проведення експериментальних досліджень та створення технічних засобів.....	159
4.2.2 Визначення вартісної оцінки результату від впровадження запропонованих заходів.....	163
4.2.3 Розрахунок зменшення витрат від використання запропонованого методу.....	167
Висновки до розділу 4.....	171
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	173
БІБЛІОГРАФІЯ.....	176
ДОДАТОК А. Будова та принцип дії пристрою для визначення коефіцієнту тертя та інтенсивності зношування трибопари.....	192
ДОДАТОК Б. Результати експериментальних досліджень зношування струмознімальних елементів типу «А» та мідного контактного проводу МФ- 100.....	199
ДОДАТОК В. Результати експериментальних досліджень зношування струмознімальних елементів типу «Б» та контактного проводу МФ-100.....	201

ДОДАТОК Г. Результати експериментальних досліджень зношування мідних накладок та контактного проводу МФ-100.....	203
ДОДАТОК Д. Будова та принцип дії пристрою для визначення параметрів вугільних струмознімальних елементів.....	205
ДОДАТОК Е. Акти впровадження.....	212

ВСТУП

Актуальність теми. Особливістю електрифікованого транспорту є підведення електричної енергії до електрорухомого складу через ковзний контакт між контактним проводом та полозом струмоприймача. Збільшення швидкостей руху та потужності електрорухомого складу призводить до сприймання контактною мережею надмірних струмових та механічних навантажень, що викликає необхідність використання нових конструкцій контактних підвісок та пристроїв струмознімання, їх модернізації для відповідності підвищеним вимогам надійності експлуатації швидкісних та високошвидкісних залізниць.

Динаміка старіння контактної мережі за останні роки показує, що частка розгорнутої довжини контактної мережі, яка перебуває в експлуатації понад 40 років, в 2020 році становитиме понад 80% від усієї її довжини. Аналіз відмов елементів контактної мережі свідчить про те, що близько 50% усіх відмов припадає на контактні проводи. Разом з недовикористанням ресурсу полізів струмоприймачів (тільки 18% полізів замінюються за нормальним зносом), це свідчить про необхідність врахування, при модернізації існуючих та введенні в експлуатацію нових ділянок, параметрів матеріалів, з яких виготовлені елементи пари сильнострумового контакту електротранспорту.

З підвищенням швидкості руху електрорухомого складу, основними напрямками досліджень, пов'язаних з процесом струмознімання є визначення конструктивних особливостей контактних підвісок та струмоприймачів, способів виготовлення та матеріалів сильнострумових контактів, але задача удосконалення взаємодії елементів сильнострумового контакту електротранспорту шляхом врахування фізико-механічних параметрів струмознімальних елементів залишається невирішеною.

Вказане вище співзвучне з задачами, що ставляться в Транспортній стратегії України на період до 2020 року, ухваленої розпорядженням

Кабінету Міністрів України від 20 жовтня 2010 року та проєкті Національної Транспортної стратегії України до 2030 року, для впровадження швидкісного та високошвидкісного залізничного транспорту.

Таким чином, удосконалення взаємодії елементів сильнострумowego контакту електротранспорту є актуальною задачею і потребує наукового вирішення.

Зв'язок роботи дисертанта з науковими програмами, планами, темами

Роботу виконано відповідно до Державної цільової програми реформування залізничного транспорту на 2010-2019 роки, ухваленої Постановою Кабінету Міністрів України № 1390 від 16.12.2009 р.; Транспортної стратегії України на період до 2020 року, схваленої розпорядженням Кабінету Міністрів України від 20 жовтня 2010 р. № 2174р.; Стратегічного плану розвитку залізничного транспорту на період до 2020 року, затвердженого наказом Міністерства інфраструктури України від 21 грудня 2015 № 547; Стратегії сталого розвитку «Україна – 2020», схваленої указом президента України від 12 січня 2015 року № 5/2015; Регіональної цільової соціальної програми «Молодь Дніпропетровщини» на 2012-2021 роки, затвердженої рішенням обласної ради від 03.02.2012 р. № 239-11/IV.

Обраний напрямок досліджень пов'язаний також з виконанням науково-дослідних робіт у Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна за наступними темами:

- «Заміри товщини контактного проводу та визначення його фактичного зносу на експериментальних ділянках змінного струму Львівської залізниці», № держреєстрації 0117U001863;
- «Розробка інтелектуальних технологій ефективного енергозабезпечення транспортних систем», № держреєстрації 0116U006982;
- «Експериментальні дослідження зношування пари тертя сильнострумowego контакту», № держреєстрації 0118U003619.

Результати дисертаційної роботи частково отримано в результаті виконання вказаних досліджень, у яких дисертант виступав керівником, виконавцем та співавтором звітів з науково-дослідних робіт.

Мета та задачі дослідження

Метою роботи є удосконалення взаємодії елементів сильнострумowego контакту електротранспорту шляхом врахування фізико-механічних параметрів струмознімальних елементів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

1. Провести аналіз стану якості струмознімання на електрифікованому залізничному транспорті: технічного стану, особливостей роботи і видів пошкоджень контактної мережі та полозів струмоприймачів електрорухомого складу, впливу їх параметрів на процес струмознімання.
2. Розробити методики та технічні засоби визначення параметрів струмознімальних елементів та проведення експериментальних досліджень процесу зносу пари тертя сильнострумowego контакту електротранспорту.
3. Провести експериментальні дослідження фізико-механічних параметрів вуглецевих струмознімальних елементів з визначенням їх взаємозв'язку та впливу на процес струмознімання.
4. Провести експериментальні дослідження процесу зносу пари тертя сильнострумowego контакту електротранспорту, отримати залежності між впливаючими факторами та параметрами струмознімальних елементів на процес зносу елементів пари тертя і величиною їх зносу.
5. Розробити прогнозну математичну модель зносу пари тертя струмознімання «контактний провід – струмознімальний елемент».
6. Розробити метод прогнозування зносу пари тертя сильнострумowego контакту та верифікувати з експериментальними даними, отримані за допомогою нього результати прогнозування.
7. Провести техніко-економічне обґрунтування ефективності застосування запропонованих заходів.

Об’єкт дослідження – процес взаємодії елементів сильнострумового контакту електротранспорту.

Предмет дослідження – ковзний сильнострумовий контакт «контактний провід – струмознімальний елемент».

Методи дослідження. Для вирішення поставлених задач у роботі використовувались теоретичні та емпіричні методи досліджень.

Обробку, аналіз та верифікацію даних, отриманих в ході досліджень особливостей роботи і видів пошкоджень контактної мережі та струмоприймачів електрорухомого складу, експериментальних досліджень, а також моделювання виконували за допомогою методів математичної статистики.

Під час експериментальних досліджень визначали питомий електричний опір, твердість струмознімальних елементів та спад напруги на їх контактній поверхні, силу струму в контакті, температуру в зоні ковзного контакту, величину зносу контактного проводу та струмознімальних елементів застосовуючи інструментальні методи.

В ході проведення досліджень використовувались основні положення теорії надійності технічних систем, фізики твердого тіла, теорії тертя та зношування, а також теорію планування експерименту.

Теоретичні розрахунки, статистична обробка даних та математичне моделювання процесу зносу пари тертя струмознімання «контактний провід – струмознімальний елемент» виконані з використанням прикладного програмного забезпечення MathCad, MS Excel, Matlab, Statistica.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій

Основні наукові положення, висновки й рекомендації, які отримані в дисертації, обґрунтовані та достовірні, оскільки експериментальні дослідження коректно поставлені та кваліфіковано виконані, дослідні результати одержано на основі великого обсягу реального фактичного матеріалу з подальшою обробкою методами математичної статистики, а розбіжність теоретичних розрахунків і

дослідних даних не перевищує загальноприйнятих значень.

Наукова новизна отриманих результатів

До основних наукових результатів, отриманих автором особисто, і які виносяться на захист, відносяться наступні положення:

1. Вперше встановлений статистичний взаємозв'язок, описаний аналітичним виразом лінійної регресії, між твердістю та питомим електричним опором вуглецевих струмознімальних елементів з врахуванням їх конструктивних особливостей, при більш точному співвідношенні вимірюваних величин та з врахуванням вимог щодо приймання їх в експлуатацію.

2. Вперше враховано сукупність впливаючих на процес зносу факторів та параметрів струмознімальних елементів, з врахуванням впливу яких розроблено прогнозу нейромережеву модель зносу пари тертя струмознімання «контактний провід – струмознімальний елемент», яка дозволяє прогнозувати знос пари тертя в залежності від змінних впливаючих факторів та параметрів, а також враховувати невизначеності в процесі електромеханічного зносу сильнострумових контактів, які не формалізуються традиційними методами.

3. Удосконалено метод прогнозування зносу ковзного сильнострумового контакту, який відрізняється від існуючих можливістю врахування сукупності впливаючих на процес струмознімання статичних та змінних динамічних параметрів контактних підвісок і струмоприймачів, графіку споживаного струму, швидкості електрорухомого складу, параметрів струмознімальних елементів та на основі їх фізико-механічних параметрів дозволяє визначати раціональне розташування струмознімальних елементів на полозі струмоприймача для досягнення зменшення зносу як самих струмознімальних елементів, так і контактних проводів.

Практичне значення отриманих результатів

Практичне значення отриманих результатів визначається застосування розроблених методик, методу та отриманих залежностей для удосконалення взаємодії елементів сильнострумового контакту електротранспорту,

використання та врахування яких дозволяє, у першому наближенні, досягти зменшення зносу контактного проводу на 9–10% та зменшити недовикористання струмознімальних елементів полозів струмоприймачів на 25%.

Розроблені експериментальні установки для дослідження процесу струмознімання дозволяють в умовах, наближених до експлуатаційних, проводити дослідження на знос різних типів струмознімальних елементів та контактних проводів.

Результати роботи у вигляді прогнозних математичних моделей, методу прогнозування зносу ковзного сильнострумового контакту, технічних засобів визначення параметрів струмознімальних елементів та зносу пари тертя струмознімання, впроваджені в навчальний процес Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна та використовуються при підготовці бакалаврів і магістрів зі спеціальності «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», прийняті до використання службою електропостачання регіональної філії «Львівська залізниця» та підприємством ТОВ «Глорія».

Підтверджена доцільність застосування прогнозних нейромережевих моделей замість проведення тривалих в часі експериментальних досліджень, економічний ефект від їх використання становить 33,4 тис. грн при виконанні проведеного в роботі об'єму досліджень.

Пристрій для визначення параметрів вуглецевих струмознімальних елементів дозволяє реалізовувати в собі алгоритм визначення раціонального розміщення струмознімальних елементів на полозі струмоприймача, економічний ефект від його використання в умовах локомотивних депо може сягнути 130 тис. грн/рік.

Результати роботи у складі проекту на обласному конкурсі проектів «Молоді вчені – Дніпропетровщині» отримали фінансування на підставі конкурсного відбору у 2016 р., чим також підтверджується практична значимість роботи.

Особистий внесок здобувача

Постановка мети та розробка задач дослідження виконані спільно з науковим керівником. Усі наукові положення й результати теоретичних та експериментальних досліджень, що виносяться на захист, отримані автором особисто. У наукових працях, що опубліковані в співавторстві, особистий внесок автора такий: [19] – порівняльний аналіз параметрів контактних підвісок і струмоприймачів, існуючої нормативної бази країн ЄС та України, оцінка можливих напрямків подальшого розвитку конструкцій контактних підвісок і струмоприймачів при підвищенні швидкостей руху електрорухомого складу; [29] – проведені експериментальні дослідження діелектричних властивостей повітряних проміжків, запропонований альтернативний тип струморозділення; [35] – розробка схем проведення вимірювань, дослідження параметрів струмознімальних елементів, обробка результатів вимірювання, визначення різкої структурної неоднорідності матеріалу вставок та коливання щільності по їх довжині, встановлена залежність між твердістю вставок та питомим електричним опором, розроблена методика сортування вставок; [51] – проведений аналіз напрямків підвищення ресурсу вугільних струмознімальних елементів, проведені експлуатаційні дослідження, проведений аналіз отриманих даних та встановлені основні види пошкоджень струмознімальних вставок, запропоновано впровадити систему оперативного діагностування стану вугільних вставок у процесі експлуатації та обґрунтовані напрямки підвищення ефективності використання ресурсу струмознімальних елементів ; [86] – обґрунтована поява різних типів пошкоджень струмознімальних елементів; [97] – проведені експлуатаційні та стендові дослідження, встановлені причини появи пошкоджень струмознімальних вставок в залежності від їх місця встановлення на полозі, встановлені залежності між структурними та діагностичними параметрами, обґрунтовано можливість зменшення зношування струмознімальних елементів; [119] – проведені експериментальні дослідження, проведений аналіз отриманих результатів, встановлені залежності впливу конструктивних параметрів пари тертя,

параметрів системи струмознімання та зовнішніх факторів на інтенсивність зношування пари тертя, сформовані передумови до створення прогнозної нейронної мережі; [153] – розробка прогнозної нейромережевої математичної моделі зношування пар тертя струмознімання, обґрунтування основних положень створення методу прогнозування зношування ковзного сильнострумового контакту; [154] – проведено патентний пошук, сформована основна ідея, здійснена фізична реалізація пристрою. Роботи [20, 30, 68, 79, 80, 99, 108, 114, 120–122, 156, 157] написані автором особисто.

Апробація результатів дисертації

Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідались і одержали схвалення на наступних вітчизняних та міжнародних конференціях: VII Міжнародна науково-практична конференція «Електрифікація транспорту» «Транселектро-2014» (Одеса), 74-та Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (Дніпропетровськ), V Міжнародна науково-практична конференція «Енергозбереження на залізничному транспорті та в промисловості» (Воловець), VI Міжнародна науково-практична конференція «Енергозбереження на залізничному транспорті та в промисловості» (Воловець), VIII Міжнародна науково-практична конференція «Електрифікація залізничного транспорту» «Транселектро-2015» (Одеса), VII Міжнародна науково-практична конференція «Безпека та електромагнітна сумісність на залізничному транспорті» (Розлуч), I-ша Міжнародна науково-практична конференція «Енергооптимальні технології перевізного процесу» (Моршин), VIII Міжнародна науково-практична конференція «Безпека та електромагнітна сумісність на залізничному транспорті» (Чернівці), II Міжнародна науково-практична конференція «Енергооптимальні технології перевізного процесу» (Львів), VIII Международная научно-практическая конференция, посвященная году науки «Проблемы безопасности на транспорте» (Гомель, республика Беларусь), X Міжнародна науково-практична конференція «Електрифікація транспорту» «Транселектро-2017» (Дніпро).

В повному обсязі дисертація доповідалась на міжкафедральному науковому семінарі у Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

Публікації

Основні положення дисертації опубліковано у 9 основних працях, з них: 1 – стаття в закордонному виданні, що індексуються у Scopus [1]; 1 – стаття в закордонному виданні, що індексуються в Index Copernicus [2]; 1 - стаття в інших фахових закордонних виданнях [3]; 6 – статті у фахових виданнях і 14 додаткових, з них 2 – патенти на корисну модель, 1 – навчальний посібник, 11 – тези доповідей та матеріали міжнародних науково-практичних конференцій.

Структура й обсяг роботи

Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та 6 додатків. Повний обсяг дисертації становить 215 сторінок, серед них 99 рисунків за текстом, з них 6 рисунків розташовано на 3 окремих сторінках, 19 таблиць за текстом, з них 1 таблиця розташована на 1 окремій сторінці, список використаних джерел з 160 найменувань – на 16 сторінках, додатки – на 24 сторінках. Основний текст роботи викладено на 171 сторінці.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ СТРУМОЗНІМАННЯ

Пристроями, які забезпечують передачу електричної енергії від тягових підстанцій до електрорухомого складу є контактна мережа та струмоприймач . Електрична енергія підводиться до електрорухомого складу безпосередньо через контактну підвіску і передається шляхом утворення сильнострумовевого ковзного контакту між контактним проводом та струмознімальними елементами струмоприймача.

Процес струмознімання є складним електромеханічним процесом, який супроводжується зносом контактних проводів та струмознімальних елементів і залежить від цілого ряду параметрів як самих елементів пари тертя так і зовнішніх впливаючих чинників.

Контактний провід та струмознімальні елементи струмоприймачів являються найвідповідальнішими елементами, що беруть участь в передачі електричної енергії до електрорухомого складу і від їх працездатності залежить надійність роботи електрифікованих залізниць.

Важливим питанням розвитку швидкісного залізничного транспорту України є забезпечення надійної передачі електричної енергії від тягової підстанції до електрорухомого складу через ковзний контакт.

Збільшення швидкостей руху електрорухомого складу передбачає підвищення вимог до показників надійності елементів контактних підвісок та струмоприймачів.

Надійність струмознімання полягає в забезпеченні безперебійного контакту при русі поїздів зі встановленими швидкостями, ваговими нормами, розмірами руху та при розрахункових кліматичних умовах району, в якому розташована електрифікована ділянка, з оптимальним терміном служби контактних проводів та струмознімальних елементів і тісно пов'язана з економічною ефективністю струмознімання, яка залежить від витрат на заміну зношених контактних проводів і струмознімальних елементів [1, 2].

Процес зносу контактного проводу та струмознімальних елементів під час струмознімання характеризується наявністю механічної (фрикційної) та електричної (електроерозійної) складової зносу [1]. Остання появляється тільки тоді, коли з'являється електрична ерозія матеріалу контактів, результатом якої є поява кратерів та напливів міді на поверхні контактного проводу, появи кратерів значного розміру та пропилів струмознімальних елементів, а також перенесення міді з контактного проводу на бокові частини вставок [3]. Електрична ерозія значним чином залежить від густини струму, що протікає через точку контакту та від твердості матеріалу, яка визначає площу контактування елементів пари тертя «контактний провід – струмознімальний елемент» [4]. Механічна складова зносу є визначальною в тих місцях, де не проявляється електрична ерозія і вона може бути або значною (при використанні мідних пластин), або мати порівняно невелике значення (при використанні вугільних струмознімальних вставок).

Досвід експлуатації швидкісних магістралей [2–12] показує, що забезпечення необхідного рівня надійності та економічності струмознімання являється однією з важливіших задач в системі тягового електропостачання і може бути реалізована шляхом модернізації існуючих електрифікованих ділянок та спорудження нових, при відповідному їм електрорухомому складі.

Значний внесок в розв'язання теоретичних та прикладних проблем з підвищення якості струмознімання, вибору параметрів контактних підвісок та струмоприймачів внесли такі вчені як Беляев І. Ю., Большаков Ю. Л., Вологін В. А., Власов І. І., Галкін О. Г., Голубков А. С., Горошков Ю. І., Дербилов Є. М., Єфімов О. В., Кудряшов Є. В., Миронос М. В., Міхеєв В. П., Плакс О. В., Поліщук В. С., Фрайфельд А. В., Kiessling F., Puschmann R., Schmieder A., Schneider E.

Більш детально процеси зносу пар тертя, взаємодії сильнострумових ковзних контактів, напрямки виготовлення матеріалу струмознімальних елементів розглядалися в роботах таких вчених як Берент В. Я., Браун Е. Д., Буше М. О., Гершман Й. С., Євдокимов Ю. А., Колесов С. М., Крагельський І. В.

., Купцов Ю. Ю., Раєвський М. В., Сидоров О. О., Філіпов В. М.

Основна увага в роботах вчених приділяється конструктивним особливостям контактних підвісок та струмоприймачів, способам виготовлення та матеріалам сильнострумівих контактів, але задача удосконалення взаємодії елементів сильнострумівого контакту електротранспорту шляхом врахування фізико-механічних параметрів струмознімальних елементів залишається невирішеною.

Таким чином, удосконалення взаємодії елементів сильнострумівого контакту електротранспорту є актуальною задачею і потребує наукового вирішення.

1.1 Вплив параметрів контактних підвісок та струмоприймачів на процес струмознімання

На коливальний процес, в якому беруть участь різнорідні коливальні системи, чинять вплив коливання кузова локомотиву, рами струмоприймача, полозу струмоприймача та коливання контактної підвіски, які мають різні амплітуди, спектри частот та напрямки розповсюдження хвиль. Через складність, коливальний процес в контактних підвісках [REF Беляєв_Взаимодейств_ток_и_КС_книга \r \h * MERGEFORMAT 13, REF Бидерман_прикл_теория_мех_колеб_книга \r \h * MERGEFORMAT 14] не може бути описаний звичайними диференціальними рівняннями, через що виникає необхідність вносити спрощення при побудові вихідних динамічних моделей.

Для покращення якості струмознімання необхідно досягти зменшення відтискання контактного проводу підвіски струмоприймачем, який рухається. При невисоких швидкостях руху відтискання проводу пропорційне еластичності контактної підвіски та контактному натиску струмоприймача P , а при високих швидкостях руху при визначенні контактного натиску необхідно враховувати ще й динамічні та аеродинамічні процеси, інтенсивність дії яких зростає зі збільшенням швидкості руху.

Збільшення швидкостей руху викликає необхідність забезпечення раціональних статичних та динамічних параметрів і показників контактних підвісок при умові надійного, економічного та екологічного струмознімання.

До найбільш важливих параметрів та характеристик контактних підвісок можна віднести наступні [2, 13, 15, 16]:

- довжина прогону контактної підвіски;
- еластичність контактної підвіски та її розподіл вздовж прогону;
- натяг проводів та тросів;
- динамічні параметри підвіски.

Еластичність контактної підвіски представляє собою величину вертикального відхилення проводів під дією одиничної сили, направленої з низу в гору. Жорсткість контактної підвіски являється величиною оберненою до еластичності, вона залежить в першу чергу від натягу проводів та тросів контактної підвіски, а протягом життєвого циклу – від регулювання проводів контактної підвіски та наявності зосереджених мас. Місця з зосередженими масами викликають підвищений механічний знос контактного проводу та струмознімальних елементів, появу ударів, відривів і пошкодження елементів пари тертя.

Еластичність контактної підвіски в середній частині прогону для швидкісних та високошвидкісних магістралей можна визначити за формулою [2]:

- де δ – відтискання контактного проводу, мм;
 H – натиск струмоприймача, Н.

Коефіцієнт нерівномірності еластичності ресорних контактних підвісок для швидкісного та високошвидкісного руху можна визначити із співвідношення [8, 17]:

де σ_{max} та σ_{min} – відповідно максимальна та мінімальна еластичність в прогоні.

Натяг контактних проводів та несучих тросів є одним з найважливіших параметрів контактної мережі, вони повинні відповідати нормативним показникам для конкретної ділянки при відомих розрахункових експлуатаційних умовах.

Декремент коливання підвіски характеризує демпферні властивості контактної підвіски, які в значній мірі впливають на якість струмознімання та коливання підвіски під дією вітрового навантаження.

Швидкість розповсюдження поперечної хвилі по контактній підвісці – один з важливіших показників контактної підвіски. Загальноприйнято, що вона повинна бути більше швидкості електрорухомого складу на 30 – 50 % та може бути розрахована за формулою:

де T – натяг проводу, даН;

ρ – погонна маса, кг/м.

Коефіцієнт відображення, визначається за формулою:

де – натяг, маса контактних проводів, несучого тросу, відповідно.

Коефіцієнт Доплера визначається як:

де – швидкість руху електрорухомого складу, км/год.

Ряд параметрів контактної мережі повинні задовольняти проектним значенням: висота підвішування контактного проводу та несучого тросу, натяг проводів і тросів. Інші показники повинні періодично перевірятися в ході планових оглядів.

Досвід експлуатації електрифікованих залізниць країн Європейської співдружності [4, REF Шмидер_книга \r \h * MERGEFORMAT 8, REF Шмидер_книга_раннее_издание_2001 \r \h * MERGEFORMAT 18] показав можливість застосування контактних підвісок, які відповідають вищезазначеним вимогам і розраховані на сумісну роботу різних систем тягового електропостачання та різні умови навколишнього середовища. Зі зрівняльного аналізу контактних підвісок [19, 20] видно, що при підвищенні проектної швидкості руху на електрифікованих залізницях необхідно:

- збільшити натяг контактного проводу, для зменшення стріли прогину до значення 15 кН та 21 кН, для швидкості руху до 250 та 350 км/год відповідно, а також збільшити його переріз до 150 мм;
- зменшити довжину прогону до 65 м;
- збільшити натяг несучого тросу до 15 кН та 21 кН, для швидкості руху до 250 та 350 км відповідно, а також збільшити його переріз;
- збільшити довжину та натяг ресорного тросу з 12 м та 2 кН до 18 м та 3,5 кН, або застосовувати прості опорні струни.

Вказане відповідає TSI Energy [21] (Технічні специфікації інтероперабельності для високошвидкісної залізничної системи) та діючому міждержавному нормативному документу [REF ОСЖД_P_610_7 \r \h *

MERGEFORMAT 22].

Ковзний контакт між контактним проводом та струмоприймачем є найважливішим елементом на який працює вся система електропостачання і від якого залежить якість та надійність струмознімання. Взаємодія між струмоприймачем та контактним проводом повинна бути надійною та безперебійною.

Важливим фактором забезпечення необхідного рівня якості струмознімання є підтримання постійного контакту струмоприймача з контактним проводом по всій довжині контактної підвіски. Відрив струмоприймача від контактного проводу навіть на незначний час приводить до появи іскріння, а при порушенні на більш тривалий час – до появи електричної дуги і, як результат, до місцевого перегріву контактного проводу, що в свою чергу викликає відпалювання матеріалу контактного проводу, призводить до зміни структури його матеріалу, електричних та механічних властивостей і, відповідно, скорочує його строк служби.

Відносно тривалий вплив електричної дуги може призвести до перепалювання контактних проводів.

Електроерозійний знос контактних проводів та струмознімальних елементів приводить до збільшення експлуатаційних витрат на ремонт та заміну контактних проводів і струмознімальних елементів струмоприймачів.

Через це, чим менший коефіцієнт відриву струмоприймача від контактного проводу, тим вища якість струмознімання та менше електричне зношування контактуючих поверхонь. Коефіцієнт відриву визначається з рівняння:

де – сумарний час відриву полозу струмоприймача від контактного проводу;

– час проходження струмоприймача по заданій ділянці.

Для високих швидкостей руху цей показник не повинен перевищувати 0,14% та 0,2% відповідно для ділянок електрифікованих на змінному та постійному струмі [23].

Якість струмознімання залежить від постійності натиску струмоприймача на контактний провід і чим менше він змінюється по довжині прогону, тим вища якість струмознімання. Силу натиску струмоприймача на контактний провід, можна визначити як суму активних та інерційних сил, що діють на полоз струмоприймача. Контактний натиск струмоприймача можна розрахувати за наступною формулою [REF Фрайфельд_Проектирование_КС_1991 \r \h * MERGEFORMAT 2, 4, 13, 15]:

де – статичний натиск, він може бути як пасивним (при стоянці) так і активним під час руху), різниця між ними характеризує сталість характеристик струмоприймача;

– аеродинамічна підйомна сила, виникає в результаті впливу на струмоприймач зустрічного повітряного потоку та вітру і залежить від швидкості руху, швидкості та напрямку вітру, конструкції струмоприймача, форми лобової частини рухомої одиниці, місця розташування струмоприймача на даху та пропорційна квадрату швидкості зустрічного повітряного потоку;

– динамічні сили, які виникають в місці ковзного контакту залежать від приведених мас та прискорення частин струмоприймача, які рухаються вгору та вниз;

– сили опору тертю в шарнірах струмоприймача.

Досягти оптимальної ефективності струмознімання можливо лише при збалансуванні параметрів контактних підвісок та струмоприймачів. Так

допустимі статичні межі натиску струмоприймачів на контактний провід в Україні (70 – 140 Н) повністю відповідають прийнятим для відповідних швидкостей руху в [REF _Ref504258053 \r \h * MERGEFORMAT 21], але для адекватного функціонування швидкісного електрорухомого складу необхідно розширити існуючі нормативні документи.

В технічній документації специфікацій TSI Energy [21] також приводяться динамічні значення натиску струмоприймачів, для заданої швидкості руху, вони визначені у відповідності з теоретичними кривими для середньої сили натиску струмоприймача та її стандартного відхилення при максимальній швидкості руху.

В залежності від типу системи електропостачання в TSI Energy регламентуються різні натиски струмоприймача, умова визначення якого приведена в табл. 1.1

Таблиця 1.1 – Сила натиску струмоприймача для різних систем електропостачання

Система електропостачання	F_m для швидкості більше 200 км/год
AC	$60 \text{ Н} < F_m < 0,00047 \cdot v^2 + 90 \text{ Н}$
DC 3 kV	$90 \text{ Н} < F_m < 0,00097 \cdot v^2 + 110 \text{ Н}$

Якість струмознімання може бути оцінена за показниками [2]:

- критерій оптимальної якості струмознімання для ділянки, що проектується – мінімальні сумарні приведені витрати на контактну мережу та струмоприймачі, які дозволяють забезпечити при їх взаємодії задані режими роботи усіх пристроїв електричної тяги;

- критерій відносної зміни контактного натиску n , чим більша швидкість руху електрорухомого складу, тим меншим необхідно приймати граничне значення n ;

- середнє квадратичне відхилення контактного натиску σ , Н.

Чим менша величина середнього квадратичного значення відхилення

контактного натиску, тим краща якість струмознімання;

- максимальний розмах (подвійна амплітуда) вертикальних переміщень точки контакту $2A$, мм. Чим менше його значення, тим ближче до прямолінійної траєкторія струмоприймача в прогоні і тим краще якість струмознімання;

- відтискання контактного проводу в заданій точці, цей показник використовується для зрівняльної перевірки якості струмознімання в жорстких точках;

- коефіцієнт відриву струмоприймача від контактного проводу.

1.2 Аналіз статистичних даних пошкоджень елементів контактних підвісок та струмоприймачів

Величина зносу контактного проводу та струмознімальних елементів є одним з основних критеріїв оцінки якості струмознімання. Її визначають за зменшенням його перерізу чи за зменшенням його висоти після 10 тис. проходів по ньому струмоприймача. Величину зносу вугільних вставок визначають за їх висотою в міліметрах при пробігу струмоприймача в 1 тис. км і більше, а також за середнім пробігом між датою монтажу нових вставок та датою граничного зносу хоча б однієї вставки, у відповідності до [24]. В [1, 3] вказується, що найбільш інформативним показником якості струмознімання є питома витрата струмознімальних елементів в кілограмах, тонах чи штуках на 1 млн. км пробігу електрорухомого складу.

Процес зносу матеріалів сильнострумового ковзного електричного контакту представляє собою складний електромеханічний процес, який поділяють на електричну та механічну складову зносу [25–27].

Фактори, які впливають на працездатність сильнострумових ковзних контактів, розділяють на три групи [5]: конструктивні (профіль перерізу проводу, тип арматури та контактної підвіски), матеріалознавчі (матеріал пари тертя) та експлуатаційні (швидкість ковзання, сили, що діють на елементи пари тертя, сила струму, вплив зовнішнього середовища).

Аналізуючи дані, що опубліковує щорічно господарство електрифікації та електропостачання [REF Аналіз_роботи_господарства \r \h * MERGEFORMAT 28], можна сказати, що на сьогодні стан контактної мережі електрифікованих залізниць України не задовольняє вимогам, які пред'являються для забезпечення надійної роботи швидкісних та високошвидкісних поїздів.

Питома пошкоджуваність на 100 км розгорнутої довжини контактної мережі в цілому по господарству, в порівнянні з 2004 роком, збільшилась на 20,5 % і становить 1,13 проти 0,91. Розподіл пошкоджуваності на 100 км розгорнутої довжини контактної мережі приведено на рис. 1.1.

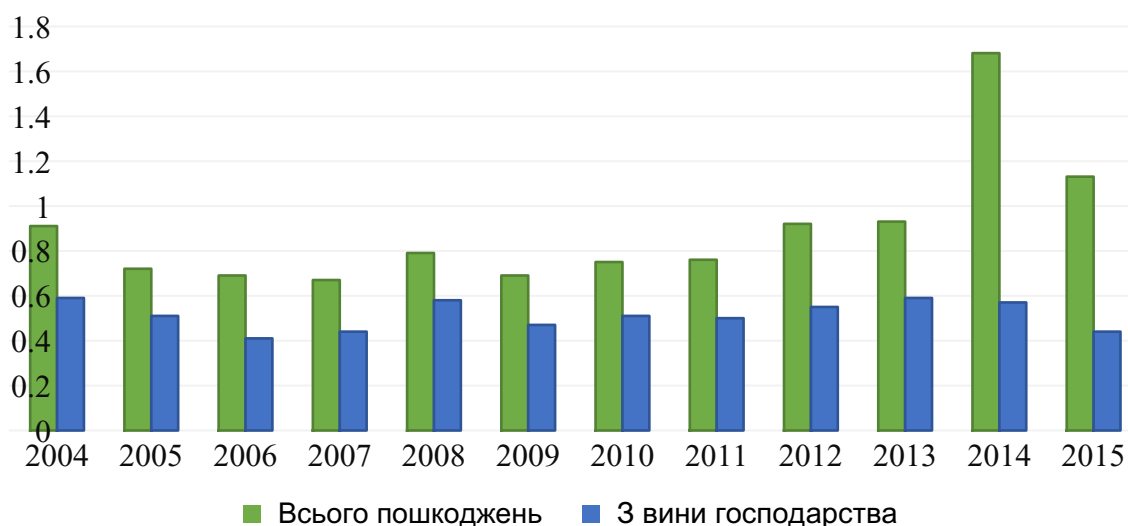


Рисунок 1.1 – Питома пошкоджуваність на 100 км розгорнутої довжини контактної мережі

До головних причин відмов пристроїв контактної мережі під час експлуатації відносяться: низька якість обслуговування; механічні руйнування, обриви; розрегулювання; перепали проводів і тросів, особливо під живлячими і з'єднувальними затискачами; перекриття та руйнування ізоляції; бракована арматура контактної мережі; зношеність та старіння і тому подібне.

Як видно з рис. 1.2, найбільша частка пошкоджень контактної мережі за період з 2004 по 2015 рік припадає на проводи та троси, прослідковується стабільно-зростаюча тенденція.

Головна причина пошкоджень контактних проводів – перепали [29]. В порівнянні з 2004 роком їх кількість зростає в 2 рази в 2014 році, це було пов'язано як з появою на залізницях України швидкісних електропоїздів Hyundai Rotem HRC2 [30], так і з неможливістю забезпечення необхідної якості регулювання контактних підвісок при русі поїздів зі швидкістю понад 120 км/год на той момент.



Рисунок 1.2 – Розподіл пошкоджень елементів контактної мережі

Розподіл виходів з ладу проводів та тросів контактної мережі приведений в табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Виходи з ладу проводів і тросів контактної мережі

Проводи і троси	2004 рік	2005 рік	2006 рік	2007 рік	2008 рік	2009 рік	2010 рік	2011 рік	2012 рік	2013 рік	2014 рік	2015 рік	Всього
Контактні	23	24	32	23	26	29	38	40	39	36	74	75	459
Несучі	22	12	10	11	16	12	19	15	32	19	28	15	211
Фіксуєчі	8	0	2	6	4	1	0	3	3	2	1	3	33

Живильні	3	1	4	2	2		6	7	2	2	0	9	38
Підсилюючі	5	3	9	4	4	2	1	2	1	4	9	7	51
Екрануючі	0	0	1	0	1		0	0	0	0	0	0	2
Зворотного струму	5	4	1	3	1	2	1	2	0	0	1	0	20
Електричні з'єднувачі	2	3	1	5	0	3	0	2	3	2	2	7	30
Шлейфи	6	2	1	2	3	6	5	8	7	14	8	3	65
Хвильовідводні	4	0	1	0	2	1	2		0	0	2	0	12

Відсотковий розподіл пошкоджень проводів та тросів приведений на рис. 1.3. Як можна побачити, майже половина усіх пошкоджень припадає на контактні проводи.

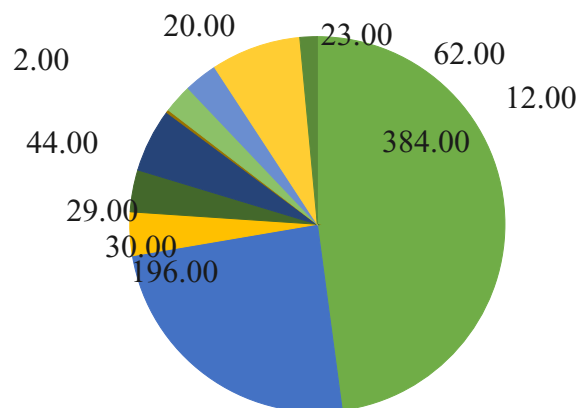


Рисунок 1.3 – Кількісний розподіл пошкоджень проводів та тросів контактної мережі

Бальна оцінка стану контактної мережі залізниць України становить 38, 9 бали, що відповідає оцінці «відмінно», при цьому, за останні 15 років цей показник погіршився понад в 2 рази.

Прослідковується стабільна тенденція погіршення бальної оцінки в усіх господарствах електропостачання. Динаміку зміни бальної оцінки по роках

можна прослідкувати з рис. 1.4.

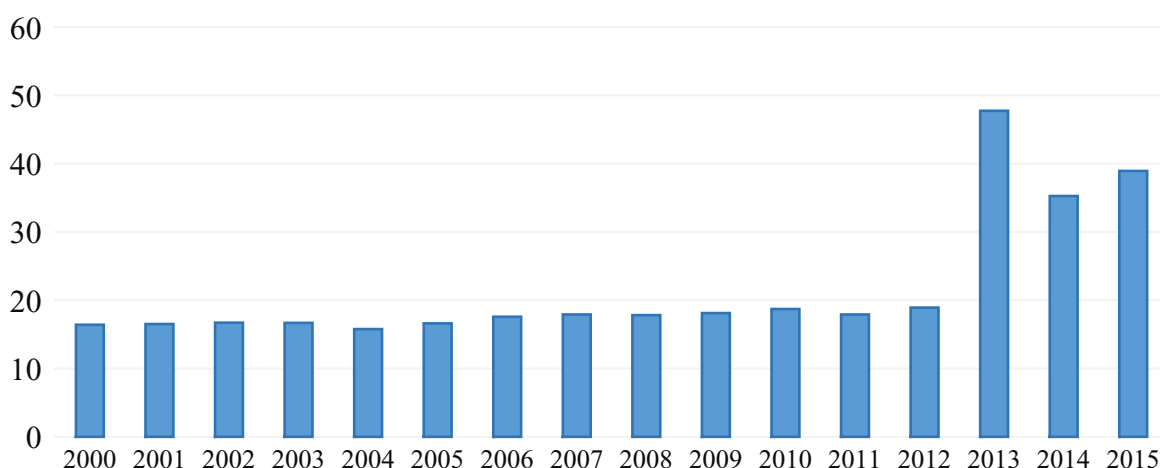


Рисунок 1.4 – Динаміка зміни бальної оцінки контактної мережі по рокам

Велике занепокоєння викликає «обвальне» старіння контактної мережі. В період з 1998 по 2015 рік експлуатаційна довжина електрифікованих колій, які знаходяться в експлуатації понад 40 років, збільшилась в 73 рази і складає 64,9% від їх загальної довжини, очікується, що до 2020 року довжина ділянок які знаходять в експлуатації понад 40 років буде становити близько 80 %.

Враховуючи, що в першу чергу проводилась електрифікація залізниць на головних напрямках руху поїздів, питання капітального ремонту контактної мережі цих дільниць стає дуже актуальним.

Динаміка старіння дільниць контактної мережі з терміном експлуатації більше 40 років за 1998 – 2015 рік (експлуатаційна довжина) наведена на рис. 1.5.

Інтенсивне старіння контактної мережі викликає необхідність щорічної заміни щонайменше 400 км контактної мережі для нівелювання щорічного збільшення розгорнутої довжини ділянок зі строком служби контактної мережі більше 40 років.

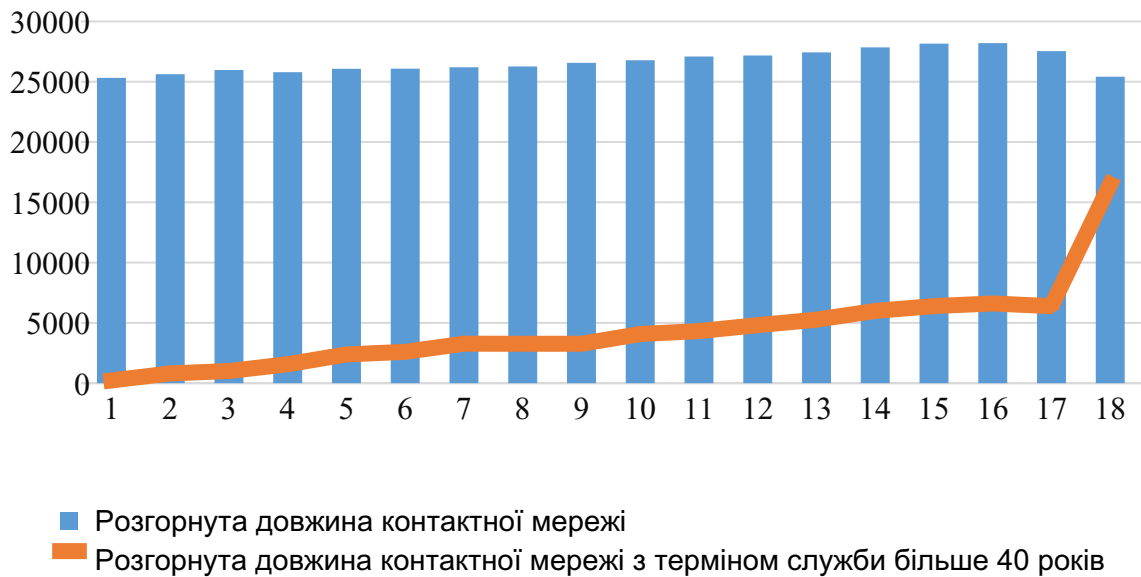


Рисунок 1.5 – Динаміка старіння розгорнутої довжини контактної мережі

Динаміку заміни контактних проводів та тросів можна прослідкувати з рис. 1.6. З 2003 року прослідковується тенденція зменшення щорічної заміни контактних проводів та тросів, що різко суперечить введенню швидкісного руху на залізницях України, відомо [19], що для забезпечення якісного та надійного струмознімання необхідно збільшувати натяг контактних проводів та несучих тросів. З [31] відомо, що при зменшенні перерізу контактного проводу, його міцність на розтяг зменшується і, відповідно, необхідно зменшувати їх натяг, подібні заходи негативно впливають на можливість реалізації швидкісного руху на ділянці.

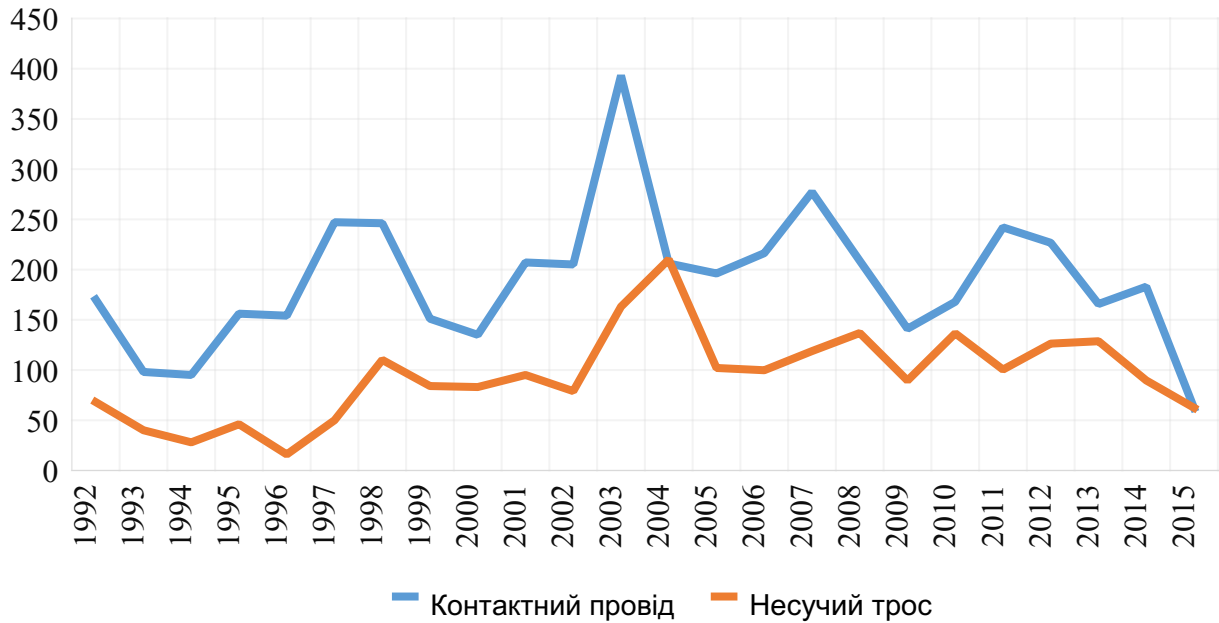


Рисунок 1.6 – Динаміка заміни контактного проводу та несучого тросу по рокам

В роботі проведений аналіз роботи струмоприймачів електрорухомого складу. Відповідно до вимог [32], при появі слідів ударів, сколів, тріщин вугільних вставок, пошкодженнях полозів струмоприймачів, працівникам локомотивних депо необхідно проводити запис в журналі з вказівкою дати та характеру пошкодження. При цьому, персонал деяких локомотивних депо недбало відноситься до контролю за появою перерахованих несправностей та часто їх просто не фіксує, через це, інформація отримана в деяких локомотивних депо не приводиться. В табл. 1.3 приведено загальний пробіг локомотивів для деяких локомотивних депо по рокам в млн. км та кількість встановлених полозів струмоприймачів в шт.

Таблиця 1.3 – Загальний пробіг локомотивів, млн. км/кількість встановлених полозів, шт.

Локомотивне депо	2003 рік	2004 рік	2005 рік	2006 рік	2012 рік	2013 рік	2014 рік	2015 рік	2016 рік	2017 рік

Київ- Пас.	26, 412 / 660	25 , 48 0/ 53 1	25 , 61 7/ 51 2	18, 08 7/ 36 8	-	25 , 94 1/ 11 79	24 , 31 6/ 12 61	23 , 25 2/ 10 24	24 , 04 5/ 11 72	24 , 36 7/ 12 32
Козятин	-	23 , 89 7/ 68 0	23 , 10 0/ 58 0	25, 53 1/ 60 0	-	-	-	-	-	-
Знам'янка	-	-	-	-	27 , 26 3/ 13 63	26 , 31 5 /1 23 5	27 , 56 1/ 14 07	25 , 70 1 /1 16 6	26 , 22 5/ 12 42	26 , 52 1/ 11 85

Для визначення характеру розподілу пошкоджень полозів струмоприймачів, на основі даних про пошкодження полозів струмоприймачів електровозів локомотивного депо Знам'янка та Київ-Пас. за три останні роки побудований тривимірний графік, приведений на рис. 1.7.

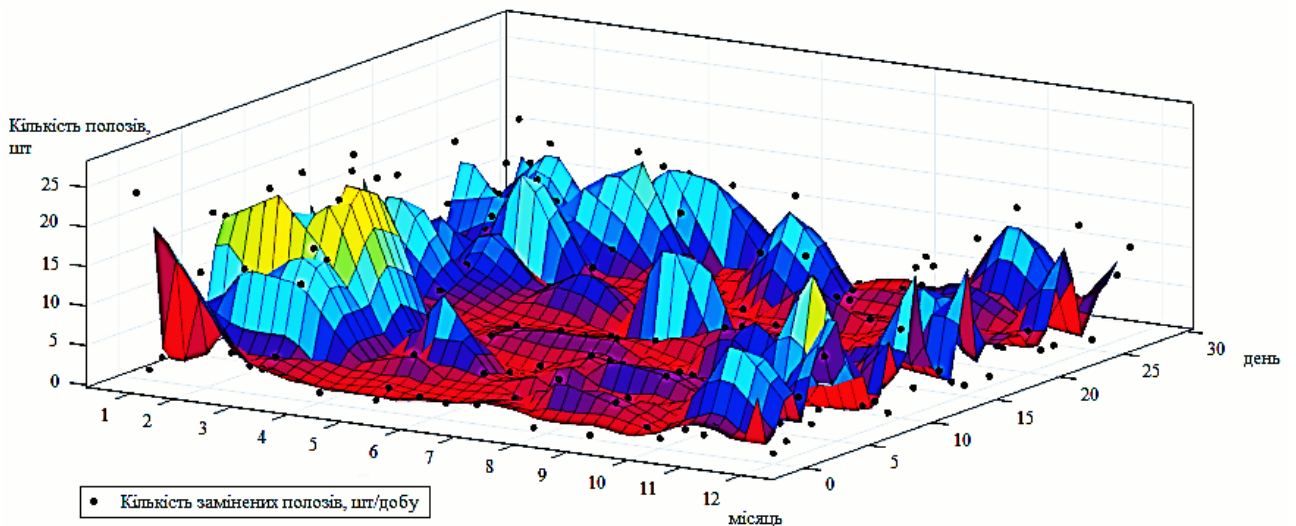


Рисунок 1.7 – Кількісний розподіл заміни полозів струмоприймачів

Як видно з рис. 1.7, характер розподілу пошкоджень полозів струмоприймачів має різко виражені сезонні коливання (спостерігається збільшення кількості замінених полозів в осінньо-зимовий період до п'яти разів), які викликані впливом різноманітних факторів. Для виділення основних

причин, виходу з ладу полозів струмоприймачів, необхідно провести детальні дослідження опрацьованих статистичних даних, отриманих в експлуатації та виділити найбільш значущі в кількісному співвідношенні пошкодження рис. 1.8

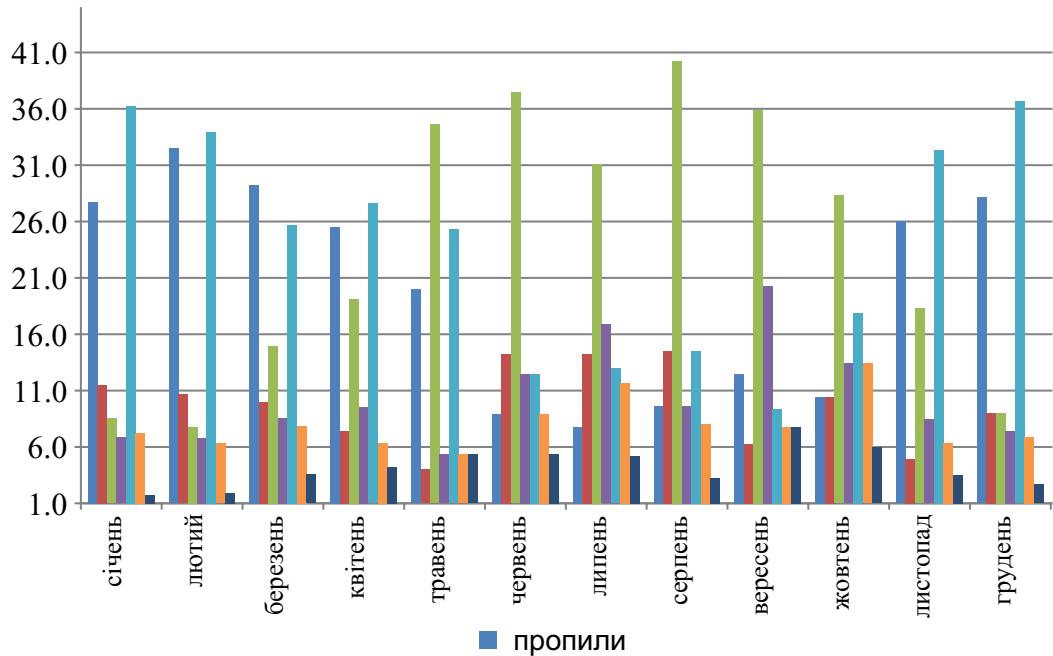


Рисунок 1.8 – Розподіл виходів з ладу полозів струмоприймачів

Як видно з приведенного на рис. 1.8, появи пропили та нерівномірного зносу більш характерні для вологого періоду.

На рис. 1.9 приведено найбільш вагомі у відсотковому співвідношенні пошкодження полозів струмоприймачів.

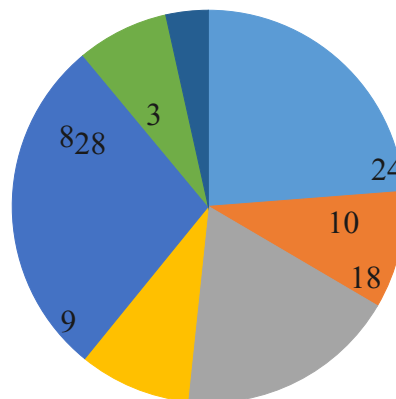


Рисунок 1.9 – Розподіл пошкоджень полозів струмоприймачів

В якості загального принципу для визначення та відображення основних пошкоджень полозів та розподілення зусиль для їх вирішення можна застосувати закон Парето та метод ABC-аналізу [REF Ногин_принятие_решений_книга \r \h * MERGEFORMAT 33, REF Подиновский_Парето_оптимальное_книга \r \h * MERGEFORMAT 34] рис. 1.10.

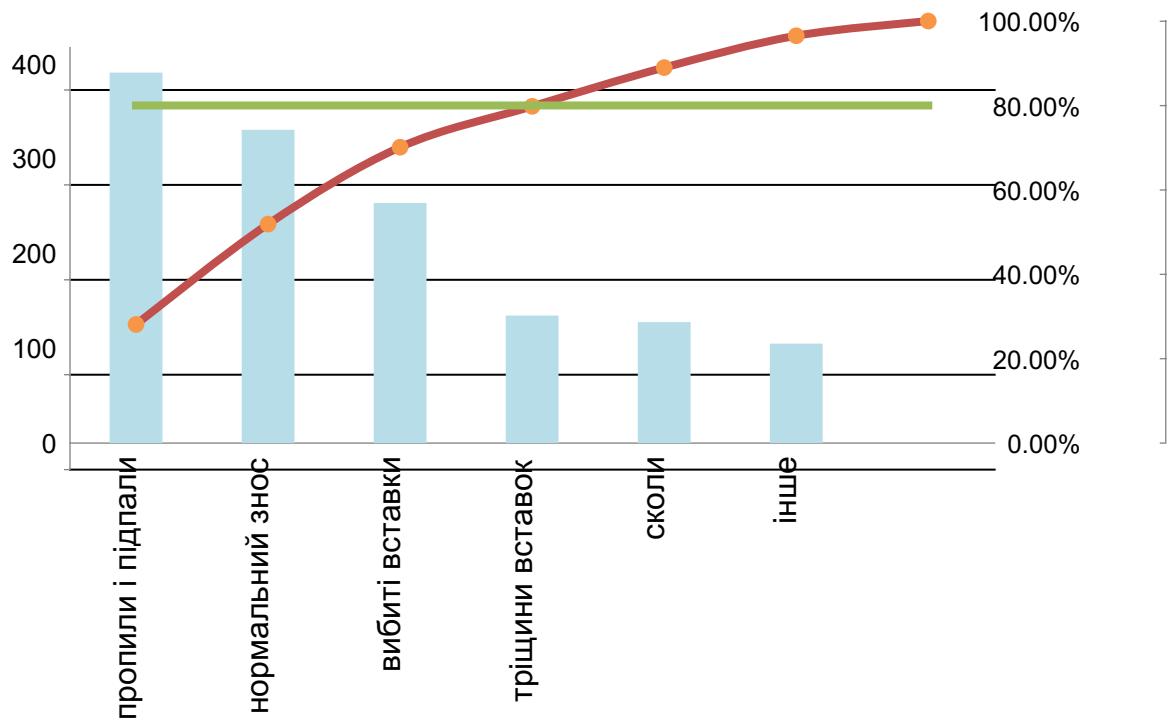


Рисунок 1.10 – Діаграма Парето

Виходячи з рис. 1.10, найважливішими причинами, що становлять разом більш ніж 50% від загального, є нерівномірний знос та пропили вставок. Різке скорочення нормативного терміну експлуатації, або ж взагалі втрата працездатності струмознімальних вставок полозів струмоприймачів, може виникнути через: проведення неякісного ремонту, неправильну експлуатацію, різноманітні перевантаження, використання неякісних струмознімальних елементів чи проблеми пов'язані з неякісним регулюванням контактної підвіски.

На рис. 1.11 приведені характерні пошкодження вугільних струмознімальних вставок типу «А».

Пошкодження поверхні тертя елементів пари тертя «контактний провід струмознімальний елемент» негативним чином впливає на якість процесу струмознімання – починають протікати деструктивні процеси, які призводять до підвищення швидкості використання технічного ресурсу елементів пар тертя

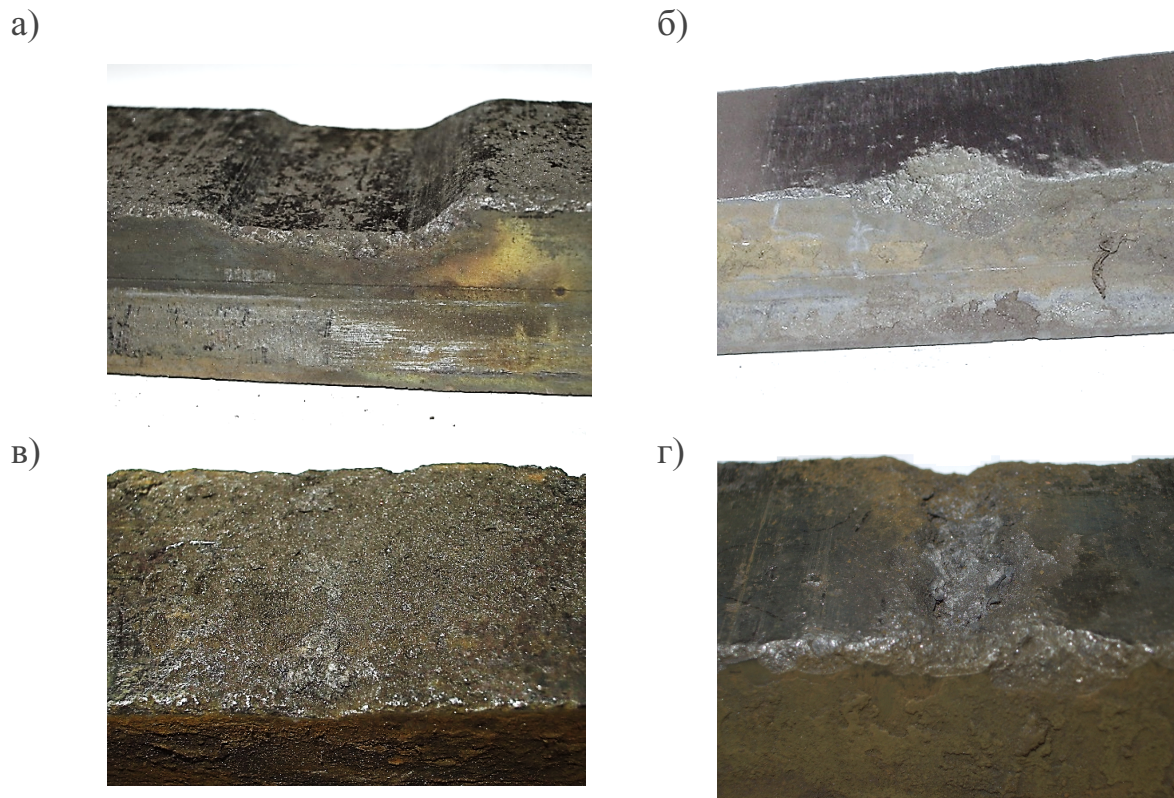


Рисунок 1.11 – Характерні пошкодження струмознімальних вставок типу «А»:
а) пропили; б) сколи на набігаючій частині вставок першого ряду; в) підпал вставки; г) кратер (в подальшому пропили)

Природа матеріалів, які використовуються для виготовлення контактних проводів, несучих тросів, струмознімальних елементів і їх якість виготовлення грає значну роль при переході на швидкісний рух.

Прослідкувати характер взаємозв'язку електричної та механічної складової зносу пари тертя під час струмознімання, можна з рис. 1.12 [3, 4, REF Больш_Ант_Дослідження_властивостей_5 \r \h * MERGEFORMAT 35].

В результаті нагрівання зони контакту, перш за все підвищується температура контактної плями [REF Колесов_Материалы_и_взаимод_синяя_книга \r \

h * MERGEFORMAT 4 REF Хольм_Электрические_контакты_книга \r \h * MERGEFORMAT
Ошибка! Источник ссылки не найден., REF Крагельский_Трение_износ_книга \r \h * MERGEFORMAT 26], яка являється важливим параметром, визначаючим фізичні та хімічні процеси, які протікають в ковзному контакті. Контактна пляма являється основним елементом при розгляді взаємодії контактного проводу зі струмоприймачем, її площа визначається фізичними та хімічними властивостями матеріалів контактної пари «контактний провід – струмознімальний елемент», а також залежить від швидкості ковзання та сили притиснення, динамічних параметрів контактних підвісок та струмоприймачів. Тому, дотримування існуючих тенденцій з уніфікації діючих норм [19, 22] Європейським вимогам може забезпечити підвищення економічності взаємодії елементів сильнотривого контакту [36–41].

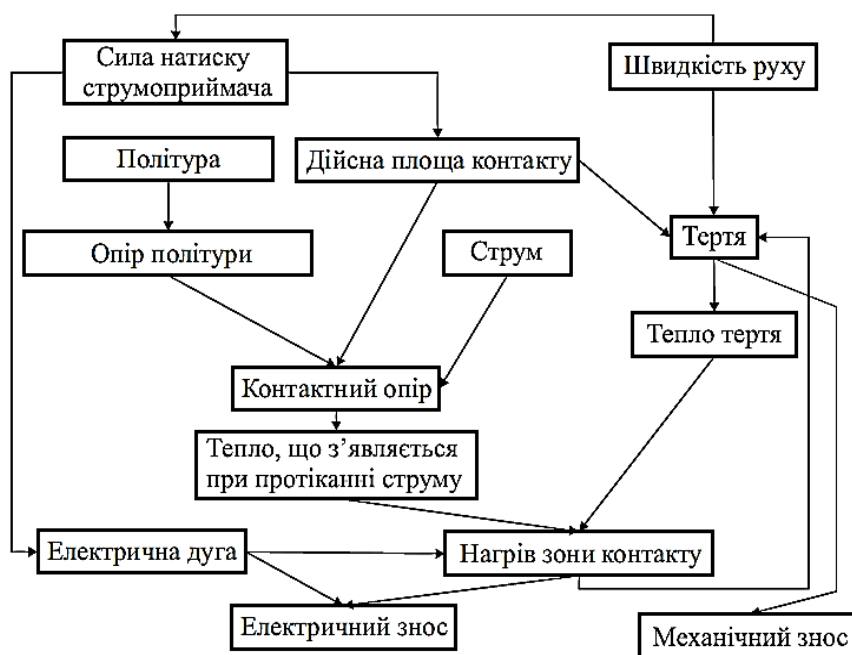


Рисунок 1.12 – Взаємозв’язки в точці контакту пари тертя «контактний провід – струмознімальна вставка»

Відомо, що при терті всі фізико-хімічні процеси намагаються зосередитися в тонкому поверхневому шарі, це є змістом принципу вторинної дисипативної гетерогенності Л. І. Бершадського [42, 43]. В результаті на поверхні тертя створюються так звані вторинні структури, а

саме явище їх утворення називається структурною пристосовуваністю. Явище структурної пристосовуваності разом зі зношуванням вважається атрибутом тертя [44].

В процесі тертя створюється зона переважного розсіювання енергії з підвищеним рівнем внутрішньої енергії. При умові однакового рівня енергії системи ентропія системи буде знижуватися з ростом нерівномірності розподілення енергії, а ентропія тіла, що треться з вторинними структурами буде меншою ентропії того ж самого тіла, яке знаходиться в рівновазі. Зменшення ентропії говорить про впорядкування системи, тобто в системі тертя створюються нові структури [45].

Стійкість вторинних структур [46, 47] узгоджується з принципом Ле-Шательє, відповідно до якого, система реагує на зовнішній вплив таким чином, щоб зменшити результат цієї взаємодії. Стосовно трибосистеми вона повинна реагувати на зовнішній вплив так, щоб зменшити результат цієї взаємодії, тобто зносу. Реакція тіл що труться, на тертя, полягає в створенні вторинних структур, відповідно до принципу Ле-Шательє, що сприяє зниженню зносу, тобто, вторинні структури здійснюють захисні функції.

Дослідження складів та процесів створення вторинних структур на поверхні тертя контактних проводів та струмознімальних елементів проводилося в [48–50]. Встановлено, що основну роль в створенні вторинних структур та здійсненні ними захисних функцій грає вуглець, що свідчить про перспективність використання вуглецевмісних струмознімальних елементів.

1.3 Аналітичний огляд робіт, направлених на підвищення якості та економічності струмознімання

Метою робіт з вдосконалення якості струмознімання є досягнення найбільшої його економічності, на основі досягнення обґрунтовано високої довговічності контактного проводу при забезпеченні необхідної довговічності струмознімальних елементів струмоприймачів та надійної їх взаємодії.

Так чи інакше, всі напрямки досліджень процесу струмознімання направлені на зменшення капітальних та експлуатаційних витрат на ремонт та утримання контактної мережі та пристроїв струмознімання.

Узагальнюючим критерієм оптимальної якості струмознімання для ділянок, що проектується або заново споруджуються є мінімальні сумарні приведені витрати на контактну мережу та струмоприймачі [2, 3], які дозволяють забезпечити при їх взаємодії задані режими роботи електрорухомого складу, і визначаються за виразом:

де $C_{\text{пр}}$ – приведені витрати на контактну мережу та струмоприймачі, грн/рік;

K – коефіцієнт ефективності капітальних витрат, 1/рік;

$C_{\text{к}}$ та $C_{\text{сп}}$ – капітальні витрати на контактну мережу та струмоприймачі відповідно, грн;

$E_{\text{к}}$ та $E_{\text{сп}}$ – річні експлуатаційні витрати на контактну мережу та струмоприймачі відповідно (включаючи амортизаційні відрахування), грн/рік

.

В якості узагальненого критерія для оптимізації характеристик та параметрів контактних підвісок й струмоприймачів можна також використовувати мінімум приведених річних витрат:

де $C_{\text{пр}}$ – мінімальні приведені річні витрати, грн/рік;

T та $T_{\text{сп}}$ – строк служби контактних підвісок та струмоприймачів, відповідно, років.

Основною частиною витрат, пов'язаних з процесом струмознімання, на утримання контактної мережі та струмоприймачів являються витрати на заміну контактних проводів та струмознімальних елементів струмоприймачів [51–54], які обираються у відповідності до типу електрорухомого складу (рід струму), його потужності та кліматичних умов експлуатації.

Для правильного вибору оптимальних параметрів контактних підвісок та струмоприймачів, необхідно оцінювати якість струмознімання при різноманітних варіантах виконання взаємодіючих систем та впливаючих на них зовнішніх факторах.

Для рішення цих задач існує цілий комплекс розроблених методик взаємодії контактних підвісок зі струмоприймачами.

Процес взаємодії контактних підвісок зі струмоприймачем представляє складний коливальний процес, в якому мають місце різноманітні коливальні системи, такі як контактна підвіска, залізничне полотно, струмоприймач, електрорухома одиниця. Так, точка контакту полозу струмоприймача з контактним проводом здійснює коливання, які обумовлені конструктивним виконанням взаємодіючих систем, їх параметрами, впливом зовнішніх факторів та коливаннями, які передаються від залізничного полотна та електрорухомого складу до струмоприймача, а також кількістю струмоприймачів.

При взаємодії контактної підвіски з декількома струмоприймачами, на коливання кожного з них будуть накладатись коливання викликані іншими струмоприймачами. Окрім основних хвиль коливань, існують також відбиті та заломлені хвилі. Коливання різних проводів контактної підвіски можуть бути несинфазними чи володіти іншими специфічними властивостями, які зв'язані з конструктивним виконанням контактних підвісок [15].

Основними факторами, які впливають на випадковий характер збудження, що передається на струмоприймач від контактної підвіски є нестабільність висоти підвішування контактних проводів біля опор, відхилення стріл прогину та геометричних розмірів контактних підвісок від

нормованих значень, зміна натягу проводів по довжині анкерної ділянки [2, 15].

Методи дослідження взаємодії контактних підвісок зі струмоприймачами розділяють на аналітичні, моделюючі та експериментальні. Аналітичні методи поділяють на ті що враховують та ті що не враховують динамічні процеси; моделювання може здійснюватися як на фізичних так і на математичних моделях; експерименти проводять в лабораторіях та спеціальних полігонах [2].

Врахувати весь спектр впливаючих факторів на взаємодію системи «контактна підвіска – струмоприймач» практично неможливо. Простішим для теоретичних досліджень та практичного застосування є розгляд взаємодії контактної підвіски зі струмоприймачами як детермінованого процесу.

В ході аналізу робіт [55–59] встановлено, що для вивчення досліджуваного питання можна використовувати спрощені моделі, в яких домінує досліджуваний процес.

В роботах [2, 15, 55, 59] був вирішений цілий ряд питань, відносно створення моделей взаємодії контактних підвісок зі струмоприймачами: розроблені основні принципи врахування в розрахункових схемах демпфуючих характеристик струмоприймачів та контактних підвісок, визначені значення реальних демпфуючих характеристик, приведених мас контактних підвісок та інших параметрів системи «контактна підвіска – струмоприймач», а також можливий діапазон їх виміру, обговорені основні допущення, які дозволили спростити розрахункові моделі.

В більшості робіт, по дослідженню взаємодії контактних підвісок зі струмоприймачами, розглядають один робочий струмоприймач та спрощені контактні підвіски.

Складність розрахунку математичних моделей з контактними підвісками представленими у вигляді системи з розподіленими параметрами, викликає цілий ряд складнощів, а результати отримані за такими методиками мають значну розбіжність з експериментальними даними, подібні

дослідження зводяться до представлення контактної підвіски як системи зі зосередженими масами, а ділянка підвіски з однією струною приймається як одна зосереджена маса.

В роботі [60] була успішно розроблена математична модель взаємодії струмоприймачів з контактною підвіскою з використанням методу кінцевих елементів, яка описує процес взаємодії контактної підвіски зі струмоприймачем з врахуванням розповсюдження коливань по контактній підвісці. Але жодні з приведених досліджень не враховують взаємодії цих коливальних систем, як факторів, що чинять вплив на процес зносу елементів пари тертя струмознімання. При цьому, на сьогодні однією із актуальних задач залізничного транспорту залишається питання підвищення надійності та збільшення ресурсу роботи струмознімальних елементів та контактних проводів.

Автором [3] було сформульовано твердження про те, що досягти оптимальної економічності та надійності струмознімання можна досягти, шляхом вибору оптимального матеріалу струмознімальних елементів. Але проблема вибору оптимального матеріалу для струмознімальних елементів струмоприймачів з'явилася з моменту електрифікації залізниць і залишається актуальною до цих пір.

Починаючи з 60-х років, на теренах СРСР, виокремились два основних напрямки розвитку струмознімальних елементів для електрорухомого складу: вугільні струмознімальні вставки [3] та металокерамічні пластини [5]. В той же час, в Європі активно використовувались вуглецево-мідні матеріали [3, 61].

В [62] проводились дослідження струмознімальних елементів різних типів, як на залізній та мідній основі, так і на вуглецевій, що свідчить про відсутність єдиного рішення відносно вибору основи матеріалу. В роботах [63, 64] приводяться докази та дослідження відносно необхідності підвищення навантажувальної здатності вуглецевих струмознімальних елементів.

На сьогодні виділяють два напрямки досліджень по вдосконаленню матеріалу струмознімальних елементів. До першого відносять роботи по виробництву струмознімальних елементів на металевій основі.

Переважна частина сполук для контактних пластин на мідній основі містить у собі додаткові легуючі домішки, такі як: нікель, фосфор, цинк, кремній, кадмій, срібло. Окрім елементів, які створюють твердий розчин з міддю, в композиційний матеріал додаються більш тугоплавкі з'єднання, необхідні для підвищенні міцності матеріалу: хром, залізо, молібден, ферохром, феромолібден, карбід хрому. Графіт вводять в склад пластин як тверде мащення, також в якості хімічно-активного твердого мащення можуть вводитись сульфіди металів [65].

Введення графіту в композиційні матеріали повинно забезпечувати самозмащувальні властивості, а легуванням порошків міді необхідно досягти сумісності елементів пари тертя, тобто властивості не схоплюватись між собою в процесі тертя ковзання. При цій взаємодії тіл, тертя повинне супроводжуватися незначною деформацією поверхневих шарів, що забезпечує правило додатного градієнту [26].

Другим напрямком досліджень по вдосконаленню струмознімальних елементів, який найбільше розвивається, є використання вуглецевих композиційних матеріалів. Результати успіхів в цьому напрямку, при їх тривалій експлуатації приводяться в [66].

В аналізі технічних вимог до вугільних струмознімальних вставок [67] показано, що вугільна струмознімальна вставка повинна відповідати взаємовиключним умовам роботи. З однієї сторони це умова мінімального зносу контактного проводу при забезпеченні надійного струмознімання, а з іншої сторони – максимально можливий міжремонтний пробіг полозу струмоприймача. Таким чином, матеріал вставки повинен відповідати ряду суперечливих та несумісних властивостей, мати високі антифрикційні та фізико-механічні властивості, низький питомий електричний та перехідний опір, високу електроерозійну стійкість.

В [15] на основі значного досвіду експлуатації, а також обліку впливу різноманітних факторів на механічну та електричну складову зносу зроблений висновок: вугільний матеріал струмознімальних елементів повинен володіти щільністю, питомим електричним опором та дугостійкістю вугільних вставок типу «Б» та фізико-механічними характеристиками вставок типу «А».

Проте, автори [REF Больш_Гершм_Сыч_Персп_напрвления_стаття \r \h * MERGEFORMAT 67] зауважують, що більш гнучким та ефективним шляхом є створення вуглецево-металевих струмознімальних елементів є введення в вугільний матеріал мідних домішок різного виду та різними способами, дозволяє регулювати властивості струмознімальних вставок в широких межах [68]. На сьогодні виділяють декілька способів введення мідної складової в вуглецевий матеріал [69–72, 74]:

- а) просочування пористої вугільної заготовки розплавом міді чи її сплавами;
- б) введення порошку міді на стадії приготування шихти;
- в) введення частинок графіту чи коксу з мідним покриттям;
- г) введення металевої складової в вигляді коротких волокон.

Окрім хімічного складу, значним чином на процес взаємодії ковзних контактів впливає форма струмознімальних елементів.

Відомий досвід розробки вставок з трапецеїдальною формою профілю [75, 76]. Профіль вставки [75], виконаний з кутом нахилу 30–60° прямолінійної ділянки до основи, а профіль вставки [76] має криволінійну форму контактуючої поверхні, що описується віткою параболи. Такі профілі дозволяють знизити динамічні удари на бокову поверхню вставки, але не вирішують проблему аеродинамічних властивостей полоза струмоприймача в цілому. Авторами [74], запропонована вставка з профілем випуклої форми, яка показала кращий результат під час дослідних випробувань, в порівнянні зі вставками з трапецеїдальним та стандартним профілем. Випукла форма профілю вставки, позитивно впливає на аеродинамічні властивості полозу

струмоприймача, при цьому, вага полозу зменшується на 6–11%.

Відомий досвід експлуатації струмознімальних елементів в мідній обоймі [77], метою розробки яких було забезпечення струмознімання при стоянці без впливу на місцисні властивості контактних проводів, також, мідний каркас слугував в якості тепловідводу в зоні контакту та повинен був захищати від ударів на набігаючій частині. Але було встановлено можливість відшарування мідної оболонки від вуглецевої частини [3]. Досвід експлуатації таких струмознімальних елементів встановив значну інтенсивність зношування контактних проводів при взаємодії зі струмознімальними елементами.

В роботі [78] приводяться дослідження, направлені на зменшення питомого електричного опору вугільних струмознімальних вставок шляхом металізації подошви вставок. Але як і в [3], це не дало якісного результату. Окрім того що мідне напилення відшаровувалось, з'явилася проблема інтенсивного кородування сталльної поверхні полозу струмоприймача, відмічались пропали полозу і для забезпечення необхідної повздовжньої електропровідності каркасу було запропоновано закріпити на поверхні каркасу полозу струмоприймача, під кожним рядом вставок мідну пластину товщиною 0,4 мм.

В роботі [35] було встановлено, що струмознімальні елементи на вуглецевій основі мають значний недолік, обумовлений технологією їх виготовлення – щільність матеріалу по довжині струмознімального елемента може значним чином коливатися. Ця умова впливає на міцнісні характеристики вугільних вставок і, як результат, призводить до збільшення кількості струмоприймачів, що замінюються через появу таких пошкоджень як пропили та нерівномірне зношування струмознімальних елементів [51, 79].

Вугільні вставки, на етапі виготовлення, проходять заводський контроль якості, порядок якого встановлений нормативною документацією [24, 80]. Види контролю, які для цього використовуються, передбачають

вимір твердості струмознімальної частини вставок за шкалою Шора, вимір межі міцності при трьохточкову статичному згинанні і статичному стисненні, визначення щільності зразка методом гідростатичного зважування, вимірювання величини водопоглинання, а також визначення електричного опору вставки.

Твердість струмознімальної частини вставки визначають методом пружного відскоку бойка за Шором [81] (більшого розповсюдження, на сьогодні, отримав метод видавлювання кульки діаметром 5 або 10 мм [82]) та розраховують як середнє арифметичне значення п'яти вимірів в точках, що знаходяться один від одного і від торців вставок на рівних відстанях. Межу міцності на стиск, визначають на фрагменті вуглецевої струмознімальної частини вставки циліндричної форми, використовуючи універсальну випробувальну машину [83]. Межу міцності при статичному згинанні визначають на фрагменті у формі прямокутного паралелепіпеда вирізаного з вугільної струмознімальної частини вставки.

При визначенні електроопору вугільної вставки вимірювання проводяться методом амперметра-мілівольтметра [84]. Розташування струмових і потенційних електродів на вставці обумовлює фізичний зміст вимірюваного опору. Зменшення відстані між потенційними електродами дозволяє фіксувати зміну електроопору вставки в залежності від мінливої внутрішньої структури.

Нормативні дослідження контактних вставок, за умови комплексного аналізу всіх їх результатів, можуть дати уявлення про якість кожного конкретного розглянутого зразка, але застосування подібних методів вхідного контролю вставок для визначення параметрів кожного окремого зразка не може бути реалізовано.

Відповідно до вищесказаного, постає важливе питання вибору та застосування економічно-доцільного методу неруйнуючого контролю, як нових так і експлуатованих струмознімальних елементів.

В практиці експлуатації використовується метод непрямих вимірів, відповідно до якого, обирається вихідний параметр, який є найзручнішим для виміру та зв'язаний певною залежністю з необхідним структурним параметром. Знаючи взаємозв'язок вихідного та структурного параметрів, можна визначити технічний стан об'єкту. Вихідні параметри, що використовуються для оцінки технічного стану об'єкту, прийнято називати діагностичними.

Зв'язок між структурними та діагностичними параметрами може бути як однофакторним, так і багатфакторним. Останній представляє собою зміну одного чи декількох діагностичних параметрів, що відповідають зміні одного чи декількох структурних параметрів.

У відповідності до загальноприйнятої класифікації, всі методи неруйнівного контролю поділяють на дев'ять різних видів: магнітний, електричний, вихреструмний, радіохвильовий, тепловий, оптичний, радіаційний, акустичний та проникаючими речовинами.

Найбільш часто використовуваними неруйнівними методами контролю внутрішньої структури матеріалу є: рентгенографія і ультразвукові дослідження. Ці методи частково перекривають області застосування один одного і частково розширюють їх. Таким чином, багато завдань контролю можна вирішувати більш економічним і безпечним ультразвуковим методом, а в ряді спеціальних проблем – використовувати рентген.

Ультразвукові методи дефектоскопії і, зокрема, ехо-імпульсний метод контролю, відносяться до числа найбільш універсальних методів неруйнівного контролю. Вони дозволяють контролювати різноманітні властивості (довжину, товщину, суцільність матеріалу тощо) виробів, виготовлених з акустично прозорих конструкційних матеріалів. Не вимагають забезпечення безпосереднього контакту з контрольованою поверхнею, що дозволяє вести контроль виробів без їх демонтажу з конструкції. Ці методи мають високу чутливість, достатню для контролю конструкцій і виробів в експлуатації (мінімальна площа дефекту, який

виявляється на відстані 2500 мм від випромінювача, становить близько 1 мм).

В роботах [85, 86], авторами був встановлений зв'язок між властивостями матеріалу контактної вставки та характером акустичного сигналу, на основі чого була розроблена методика вибраковки та сортування вставок по якості виготовлення методом ультразвукового зондування.

В той же час, цей метод має наступні недоліки:

- високі вимоги до контрольопридатності конструкції чи виробу;
- низькі показники надійності результатів контролю;
- складність процесу виміру, апаратури та її використання;
- великі габарити та вагу;
- відносно-низьку завадостійкість.

Отже, постає важливе питання вибору та застосування економічно-доцільного методу неруйнуючого контролю вуглецевмісних струмознімальних елементів [87].

Значна складність при роботі з пристроями ультразвукового контролю, висока вартість та низькі показники надійності результатів вимірювання унеможливають використання подібних систем для контролю якості вугільних вставок в умовах депо.

Більш доцільним є використання пристроїв, які шляхом непрямих вимірів електричних параметрів струмознімальних елементів можуть дати оцінку якості виготовлення струмознімальних елементів на вуглецевій основі

1.4 Постановка мети та задачі досліджень

Аналіз напрямків підвищення якості струмознімання, вказує на складність та неоднозначність застосування заходів та засобів, направлених на досягнення найвищої якості струмознімання.

Так як критерієм оптимальної якості струмознімання є мінімальні приведені витрати на контакту мережу та струмоприймачі, величина котрих

безпосередньо залежить від капітальних та експлуатаційних витрат на контактні проводи та струмознімальні елементи полозів струмоприймачів, усі заходи, які реалізуються на електрорухомому складі та контактній мережі, для підвищення якості струмознімання, повинні бути економічно обґрунтовані.

Різка структурна неоднорідність матеріалу вуглецевмісних струмознімальних вставок та коливання їх щільності, при значних струмових навантаженнях у точці контакту між контактним проводом та вугільною вставкою, викликає різке збільшення електричної складової зносу (вигорає матеріал вставок, з'являються підпали, каверни, кратери і, як результат, пропили), призводить до появи вимушеного режиму роботи та аварійних ситуацій.

Відсутність методики для перевірки якості виготовлення струмознімальних елементів унеможливорює раціональне використання струмознімальних елементів в експлуатації, забезпечення надійної роботи системи електропостачання та досягнення оптимальної якості струмознімання.

На основі приведеного вище, сформована мета роботи, яка полягає в є удосконалення взаємодії елементів сильнострумового контакту електротранспорту шляхом врахування фізико-механічних параметрів струмознімальних елементів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

1. Провести аналіз стану якості струмознімання на електрифікованому залізничному транспорті: технічного стану, особливостей роботи і видів пошкоджень контактної мережі та полозів струмоприймачів електрорухомого складу, впливу їх параметрів на процес струмознімання.
2. Розробити методики та технічні засоби визначення параметрів струмознімальних елементів та проведення експериментальних досліджень процесу зносу пари тертя сильнострумового контакту електротранспорту.

3. Провести експериментальні дослідження фізико-механічних параметрів вуглецевих струмознімальних елементів з визначенням їх взаємозв'язку та впливу на процес струмознімання.

4. Провести експериментальні дослідження процесу зносу пари тертя сильнострумowego контакту електротранспорту, отримати залежності між впливаючими факторами та параметрами струмознімальних елементів на процес зносу елементів пари тертя і величиною їх зносу.

5. Розробити прогнозну математичну модель зносу пари тертя струмознімання «контактний провід – струмознімальний елемент».

6. Розробити метод прогнозування зносу пари тертя сильнострумowego контакту та верифікувати з експериментальними даними, отримані за допомогою нього результати прогнозування.

7. Провести техніко-економічне обґрунтування ефективності застосування запропонованих заходів.

Висновки до розділу 1

1. Встановлено, що найбільше відмов проводів та тросів контактної мережі електрифікованого залізничного транспорту постійного та змінного струму приходить на контактні проводи і складає 49,8 % від загального. Питома пошкоджуваність контактної мережі в порівнянні з 2004 роком збільшилась на 20,5 %, а бальна оцінка її стану погіршилась в 2 рази.

2. Відбувається обвальне старіння контактної мережі, розгорнута довжина ділянок контактної мережі, що знаходяться в експлуатації понад 40 років збільшилась в 15 разів, в зрівнянні з 1998 роком та становить 64,9 % від загальної довжини, за прогнозами на 2020 рік, протяжність ділянок з терміном експлуатації понад 40 років становитиме понад 80%.

3. Проведений аналіз роботи полозів струмоприймачів показує, що інтенсивність їх виходу з ладу значним чином залежить від впливаючих на процес струмознімання чинників. Заміна полозів за граничним зносом струмознімальних елементів проводиться тільки у 18 % випадків. Основні

типи пошкоджень пов'язані з нерівномірним зношуванням струмознімальних елементів (28 %), пропилами з підпалами (24 %).

Отримані в першому розділі результати аналізу процесу струмознімання опубліковано в роботах [19, 29, 79].

РОЗДІЛ 2

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ТА ПРОЦЕСУ ЗНОШУВАННЯ КОВЗНОГО СИЛЬНОСТРУМОВОГО КОНТАКТУ

Процес взаємодії пари тертя струмознімання «контактний провід – струмознімальний елемент» протікає в експлуатації при змінних умовах і залежить від великої кількості впливаючих факторів. У відповідності до теорії тертя та зношування [27, 88–91, 92] взаємодію пар тертя оцінювали при змінних вхідних параметрах і враховували, що трибосистема складається із підсистем.

Умовно структурну схему впливаючих факторів на процес зносу пари тертя можна зобразити наступним чином, рис. 2.1.

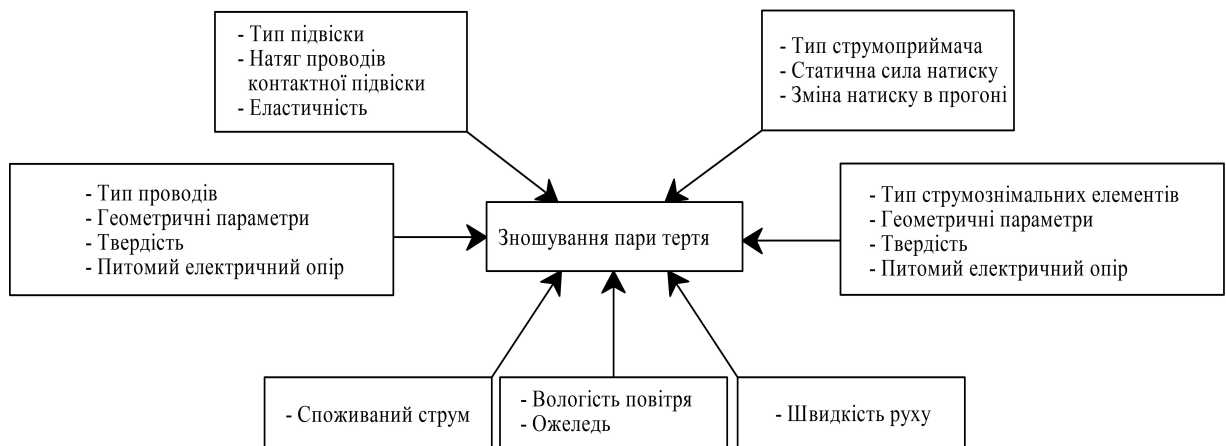


Рисунок 2.1 – Структурна схема впливаючих факторів на процес зносу

Як вже було вказано в розділі 1, процес струмознімання – це складний процес динамічної взаємодії двох коливальних систем, який супроводжується механічним та електричним зношуванням пари тертя струмознімання «контактний провід – струмознімальний елемент».

Неможливість адекватного математичного описання процесу струмознімання, викликає необхідність використовувати для дослідження цього процесу експериментальні установки, які з певними допущеннями та при врахуванні сукупності впливаючих факторів дозволяють отримати

залежності між впливаючими факторами та необхідними цільовими функціями.

При імітаційному моделюванні ряд таких факторів як еластичність контактного проводу, натяг проводів підвіски, зміна сили натиску струмоприймача в прогоні та ожеледь змоделювати практично неможливо. При цьому, виходячи з досліджень [REF Купцов_Беседы_о_токос_и_его_надеж_2001 \r \h * MERGEFORMAT 3, REF Колесов_Материалы_и_взаимод_синяя_книга \r \h * MERGEFORMAT 4, 15, 54, 93, 94] відомо, що рід струму та швидкість ковзання несуттєво впливають на процес зносу пар тертя струмознімання і ними можна знехтувати.

Для проведення досліджень на знос пар тертя струмознімання, були визначені методики для визначення параметрів елементів пари тертя та розроблені технічні засоби для проведення експериментальних досліджень.

Експериментальні дослідження зношування елементів сильнострумового контакту «контактний провід – струмознімальний елемент» направлені на визначення, при певних заданих умовах, впливу конкретних факторів на зміну показників економічності та надійності струмознімання.

2.1 Визначення твердості контактної поверхні та питомого електричного опору струмознімальних елементів

Твердість являється одним з найважливіший показників для всіх виробів, які являються елементами пари тертя, в тому числі і для елементів сильнострумового контакту. Вона вирішальним чином впливає на їх стійкість по відношенню до механічного зношування. Твердість вугільно-графітових матеріалів визначається рецептурою та технологією виготовлення, тісно зв'язана з провідниковими властивостями [71, 95, 96], які для вугільних вставок також мають першочергове значення. Ці зв'язки показують, що якщо по тим чи іншим міркуванням небажано вводити в склад вставок метал, то зменшення питомого електричного опору досягається за рахунок певної

втрати їх твердості [39].

Поєднання високої твердості, міцності та низького питомого електричного опору забезпечує високі експлуатаційні показники вставок при зніманні великих значень струму, однак необхідно при цьому враховувати дугостійкість матеріалу та інтенсивність механічного зносу контактного проводу, в свою чергу занижене значення твердості матеріалу струмознімального елемента призведе до різкого зменшення його ресурсу, збільшення витрат на обслуговування полозів струмоприймачів, але в той самий час позитивно вплине на інтенсивність зносу контактного проводу.

Автор [39] приводить в роботі результати дослідження навантажувальної здатності вуглецевмісних струмознімальних елементів і вказує, що іскріння збільшується зі збільшенням величини струму який знімається. Це явище не зв'язане з відривами полозу від проводу, а пояснюється тим, що потужність втрат, яка виділяється в контактній точці, при великих струмах може перевищити допустиму потужність розсіювання контактної містки, для даного струмознімального матеріалу, це підтверджується роботами [4, 25], при цьому контактний місток руйнується, його матеріал виноситься, а сам процес проявляється у вигляді іскріння.

Вставки на графітовій основі, в порівнянні з вугільними володіють підвищеною дугостійкістю за рахунок меншої твердості та меншого питомого електричного опору матеріалу, а також більшої стійкості графіту до окислення в порівнянні з його аморфним різновидом – вугіллям [3, 15]. Однак, графітові вставки мають настільки низьку механічну міцність та зносостійкість, через що на європейських та американських залізницях вони не використовуються і в перспективі не розглядаються.

В роботі [15] на підставі тривалих експлуатаційних досліджень, зроблено висновок, відносно того, що універсальна вуглецева вставка повинна поєднувати в собі високі фізико-механічні характеристики вставок типу «А» та дугостійкість, щільність, питомий електричний опір вставок типу «Б».

Однією з причин різкого скорочення терміну експлуатації вугільних вставок є нерівномірний розподіл твердості по їх довжині, що свідчить про різку структурну неоднорідність матеріалу готового виробу та коливання щільності вставки по довжині [35, 79, 97].

2.1.1 Визначення твердості струмоznімальних елементів

Під твердістю розуміють властивість матеріалу чинити опір проникненню в нього іншого набагато твердішого тіла. Випробування на твердість – найбільш масове високопродуктивне неруйнуюче випробування матеріалів, яке є надійним і універсальним методом фізико-хімічного аналізу властивостей досліджуваного матеріалу. Випробування на твердість і мікротвердість охоплюють практично необмежене коло матеріалів від найм'якіших (наприклад, графіт) до ультратвердих (алмаз, карбіди тощо).

Випробування на мікротвердість дає можливість відрізнити пластичні незруйновані відбитки на самих крихких матеріалах з яких неможливо приготувати зразки для інших механічних випробувань. Визначення твердості здійснюється спеціальними приладами – твердомірами.

Відомо більше 30 способів вимірювання твердості і мікротвердості, які можна класифікувати наступним чином:

- способи, засновані на вдавлюванні жорсткого наконечника у вигляді кулі, конуса, піраміди, циліндра, леза, тощо, у випробовуване тіло, зазвичай з плоскою поверхнею;
- способи, засновані на дряпанні випробовуваного тіла: набором еталонних зразків різної твердості, твердим наконечником у вигляді кулі, конуса, піраміди тощо;
- способи, засновані на коливанні маятника, що спирається твердим наконечником певної форми (зазвичай куля) на випробовуване тіло.

Найбільш поширеними способами вимірювання твердості є вимірювання за Брінеллем, Роквеллом, Віккерсом та за Шором.

Величина твердості і її розмірність для одного і того ж матеріалу залежить від застосованого способу вимірювання. При цьому перерахунок значень твердості, визначених різними способами проводиться за таблицями або емпіричними формулами.

Твердість матеріалу струмознімальної частини вимірювали у відповідності до [82] на струмознімальній частині вставки чи її фрагменті.

Метод вимірювання твердості за Брінеллем полягає у вдавлюванні сталеві кульки з діаметром D в зразок (виріб) під дією зусилля F , прикладеного перпендикулярно до поверхні зразка протягом певного часу і вимірюванні діаметру d відбитка після зняття зусилля.

Твердість за Брінеллем позначають символом HB , якому передують числове значення твердості з трьох значущих цифр, і після символу вказують діаметр кульки, значення прикладеного зусилля і тривалість витримки. Мірою твердості служить величина, яка чисельно дорівнює відношенню прикладеного зусилля F до площі сферичного відбитка A і розраховується за формулою:

- де F – навантаження, що прикладається до кульки, Н;
- D – діаметр сталеві кульки, мм;
- d – діаметр відбитку кульки, мм.

Отримане число твердості при інших рівних умовах тим більше, чим менший діаметр відбитку.

При вимірюванні твердості за методом Брінелля необхідно виконувати наступні умови:

- товщина зразка повинна не менш ніж у 8 разів перевищувати глибину відбитка, а на протилежній стороні зразка після випробування не повинно бути слідів деформації;

- поверхня зразка повинна бути плоскою, гладкою і вільною від окисної плівки, шорсткість поверхні зразка (або майданчика на виробі) не більше Ra 2,5, обробку поверхні зразка (вироби) можна проводити шліфуванням або дрібним напилком;

- відстань між центром відбитка і краєм зразка має бути не менше 2,5 діаметрів відбитка d ; відстань між центрами двох суміжних відбитків повинно бути не менше 4 діаметрів відбитка;

- діаметри відбитків вимірюються в двох взаємно-перпендикулярних напрямках, за діаметр відбитка d приймається середнє арифметичне значення результатів вимірювання;

- діаметр кульки D і відповідне зусилля F вибирають таким чином, щоб діаметр відбитка знаходився в межах $(0,24...0,6) D$.

Зусилля F в залежності від значення часу досліджень та діаметра кульки D встановлюють у відповідності до [82].

Для оцінки твердості вставок використовувався твердомір Брінелля ТШ- 2М, зі сталюю кулькою діаметром 10 мм, навантаженням 250 кг та часом витримки 30 с. Вимір твердості проводився не в п'яти точках, як того вимагає [23], а в восьми, для більш адекватної оцінки розподілу твердості по довжині вугільної струмоznімальної вставки, рис. 2.2.



Рисунок 2.2 – Робоча поверхня струмоznімальної вставки в плані

Діаметри відбитків вимірювали бінокулярним мікроскопом [98], на окулярі якого нанесена шкала з поділками, відповідними десятим часткам міліметра. Діаметр відбитка вимірювали з точністю до 0,05 мм у взаємно перпендикулярних напрямках; для визначення твердості приймали середню з трьох отриманих величин.

Твердість струмознімального елемента визначалася як середнє арифметичне значення, округлене до цілого, восьми вимірів в точках, які віддалені одна від одної та від торцевих поверхонь на однакову відстань.

Для проведення досліджень, струмознімальні вставки обиралися з партії у відповідності до вимог [23], а саме:

- Відхилення довжини струмознімального елемента від її номінальної не повинне перевищувати $\pm 1,0$ мм, при цьому, висота повинна бути не більше 30,0 мм.

- На робочій та бокових поверхнях струмознімальної частини вставки не допускається наявність більше чотирьох сколів глибиною більше 3 мм та розміром в поперечному перерізі більше 10 мм.

Твердість є важливою фізико-механічною властивістю гетерогенних структур, до яких відносяться і вугільні матеріали [5, 25].

Загальноприйнятим та широко розповсюдженим для виробів з вугільних матеріалів є визначення (вимірювання) твердості методом вдавлювання кульки за методом Брінелля [82], однак в [23] вказується значення твердості струмознімальної частини вставок за методом пружного відскоку бойка за Шором, яке для вставок типу «А» визначається в межах 35 – 100 HSD. Максимальне значення перевищує мінімальне більше ніж в 2 рази, такий значний інтервал розкиду $\pm 32,5$ одиниць від середнього значення 67,5 Н призводить до наступного:

- Поставки партій вставок суттєво можуть відрізнитися одна від одної.

- В межах однієї партії можлива наявність вставок з мінімальними та максимальними значеннями твердості.
- Сама вставка по довжині може мати різну твердість, так як вимір проводиться в п'яти точках [23], з відхиленням від середнього значення +/- 48%. Наприклад, вимір дає результати: 57, 64, 37, 95, 52, значить середнє значення твердості вставки становить 61, що відповідає нормативному показнику, проте, різниця між мінімальним та максимальним значенням складає 61 %.
- В процесі екіпірування полозу струмоприймача, 8 чи 11 вставок можуть бути встановлені з різною твердістю.
- Нестабільність міцнісних властивостей вставок від партії до партії, а також в межах однієї партії, при експлуатації обумовлює підвищення їх витрат та при несприятливих погодних умовах, до збільшення кількості пропилів, сколів та інше.

Дослідним шляхом встановлено, що при аналізі зношених вставок, вставки з твердістю 87 HSD та вище різко збільшують ймовірність появи на їх робочій поверхні слідів міді з контактного проводу рис. 2.3.



Рисунок 2.3 – Сліди міді на струмознімальній частині вставок

Таким чином, вставки з такою твердістю здирають політуру з проводу, тобто захисні вторинні структури, за рахунок появи яких на

поверхні тертя контактного проводу, досягається зменшення його зносу. Крім цього, вставки з підвищеною твердістю мають вищу крихкість, вищий питомий електричний опір, що призводить до надмірного зносу контактних проводів, зменшення їх міцнісних характеристик, а так як такі параметри вставок можуть суттєво коливатися в середині партії це може призводити до пошкоджень полозів струмоприймачів та дострокового демонтажу полозу для проведення ремонту.

При значних струмових навантаженнях, густина струму в точці контакту зростає, збільшується електрична складова зносу, котра може проявлятися в якості підпалів, появи каверн та кратерів, які в подальшому перетворюються в пропили та різко погіршують якість струмознімання і можуть призвести до пошкодження контактного проводу. Також, як було показано в [35], подібні пошкодження характерні для крайніх вставок третього ряду (рис. 2.4, а) за рухом локомотиву трирядного (чи другого ряду для дворядного) полозу, що обумовлено недостатнім притисканням останнього за напрямком руху локомотива ряду вставок – це обумовлено конструктивними особливостями каретки струмоприймача.



Рисунок 2.4 – Підпали на останньому (а) та сколи на першому (б) за рухом ряді струмознімальних елементів

Як результат, в точці контакту підвищується контактний опір, з'являється іскріння, що призводить до нагріву точки контакту та збільшеному електричному та механічному зношуванню струмознімальних елементів. Досягти мінімізації таких негативних явищ можна шляхом встановлення вставок зі зменшеною твердістю та, відповідно, питомим електричним опором замість крайніх вставок.

Для набігаючої поверхні струмознімальних елементів першого ряду характерна поява сколів (див. рис. 2.4, б), що обумовлюється високою хрупкістю вугільних струмознімальних елементів та тісно пов'язані твердістю струмознімальної частини вставки. Застосування струмознімальних вставок середньої твердості в середній частині полозу на першому за рухом ряді струмознімальних елементів, дозволило б зменшити кількість сколів та не вплинути негативним чином на ресурсні характеристики полозу струмоприймача.

Твердість струмознімальної частини вставки визначалась у 8 точках по її довжині у відповідності до [82] на твердомірі Брінелля ТШ-2М (рис. 2.5).

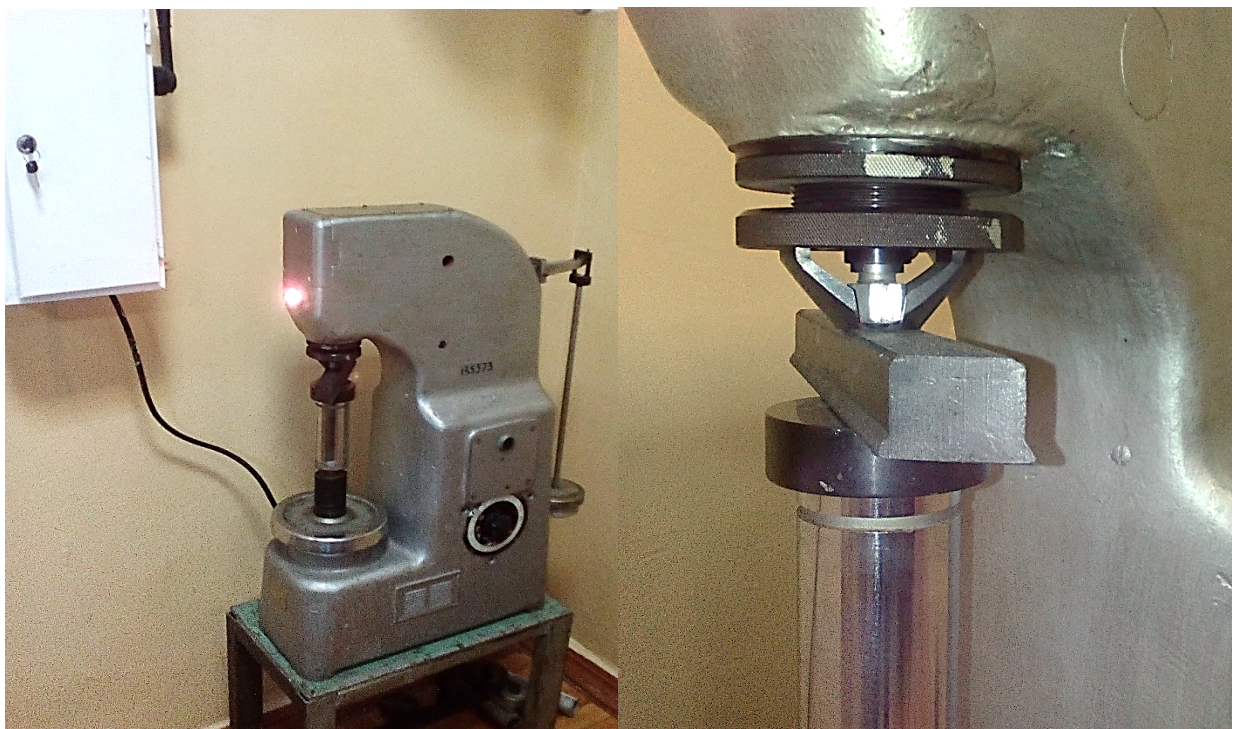


Рисунок 2.5 – Вимірювання твердості вуглецевих вставок
твердоміром Брінеля ТШ-2М

На рис. 2.6 та 2.7 приведені результати дослідження твердості струмознімальної частини довільно обраних з партії струмознімальних вставок типу «А» та «Б» відповідно.

Як видно з отриманих результатів проведених досліджень, більша частина досліджених вставок типу «А» не відповідає за показником твердості нормативному розкиду значень 25...36 *НВ* для вставок такого типу (при випробуваннях *НВ* 10/250/30, максимальне число твердості становить не більше 50 одиниць за шкалою Брінеля). Використання таких ковзних контактів в експлуатації призведе до різкого збільшення механічної складової зносу контактного проводу, збільшення електричної складової зносу вугільних вставок і як результат, до марнотратного використання їх ресурсу [99].

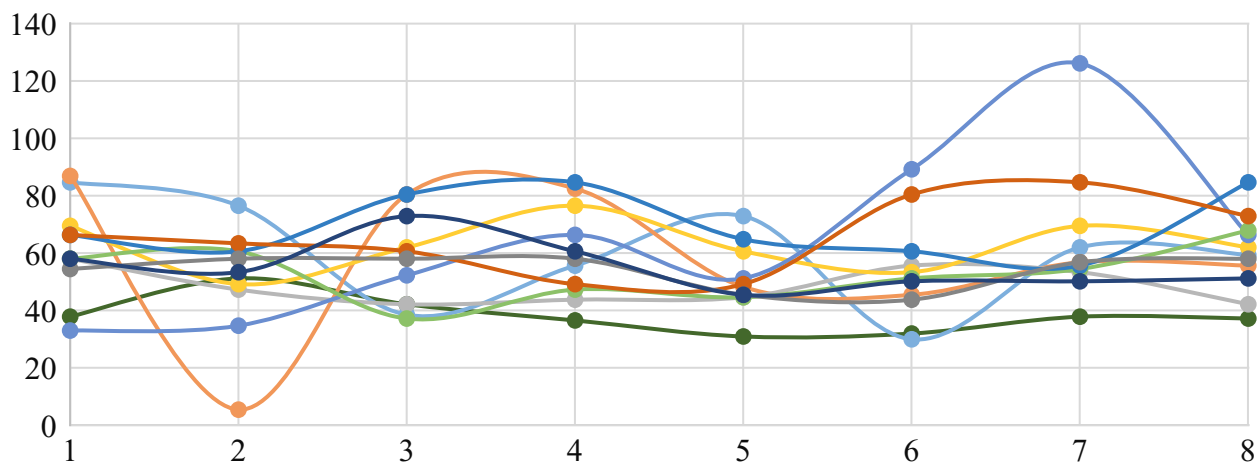


Рисунок 2.6 – Розподіл твердості на струмознімальній частині
вугільних вставок типу «А»

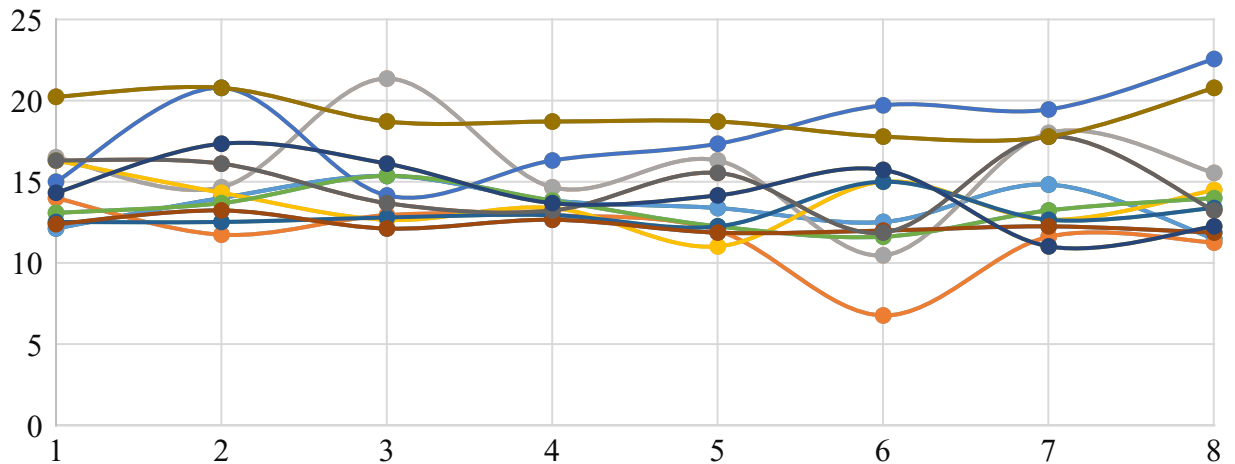


Рисунок 2.7 – Розподіл твердості на струмознімальній частині вугільних вставок типу «Б»

Результати досліджень вставок типу «Б» показують занижені міцнісні характеристики, при нормі 15...24 *HV*. Подібні струмознімальні елементи мають низькі ресурсні показники, але зносостійкість контактного проводу при їх використанні зростає.

2.1.2 Визначення питомого електричного опору та функціональної залежності фізико-механічних параметрів струмознімальних елементів

В роботі проводилось дослідження наявності взаємозв'язку твердості та питомого електричного опору, для комплекту вуглецевих струмознімальних вставок типу «А» та «Б» різних виробників.

Визначення питомого електричного опору матеріалу струмознімальної частини проводили у відповідності до [24, 84] на робочій поверхні за допомогою метода амперметра-мілівольтметра.

В ході дослідження потенціальні проводи мали загострені штирі, відстань між якими становила не менше 150 мм. Штирі встановлювалися на рівній відстані від торцевих поверхонь вставок. Довжина штирів була не менше 20 мм. Сила струму в ланцюзі складала 4 А.

Питомий електричний опір ρ , мкОм·м, обчислювали за формулою:

де U – падіння напруги між штирями, розміщеними на відстані один від одного, мВ;

– відстань між штирями потенціальних проводів, мм;

– площа поперечного перерізу вставки, мм²;

– струм підведений до торців вставок, А.

Гранично-допустиме значення питомого електричного опору, для вуглецевих струмознімальних елементів у відповідності до [23] становить 30 та 15 мкОм·м для вугільних вставок типу «А» та «Б» відповідно.

Нестабільність міцнісних характеристик струмознімальних елементів в середині партії та між партіями негативним чином може впливати на ресурсні характеристики роботи контактних проводів та полозів струмоприймачів. Перспективним напрямком підвищення їх ресурсу є застосування пристроїв, що дозволяють визначати параметри кожного конкретного розглядуваного зразка струмознімального елемента та визначати місце їх встановлення на полозі струмоприймача для досягнення найбільшої економічності струмознімання.

Основним чинником, який визначає фізико-механічні параметри вуглецевих струмознімальних елементів є щільність матеріалу, з якою безпосередньо пов'язаний такий механічний параметр як твердість та електричний– питомий електричний опір. І питомий електричний опір і твердість являються параметрами, які досліджуються на етапі виробництва струмознімальних елементів та при їх прийманні в умовах локомотивних депо.

Для визначення можливого статистичного взаємозв'язку між твердістю та питомим електричним опором вуглецевих струмознімальних елементів типу «А» та типу «Б», була проведена сукупність експериментальних досліджень, в результаті яких отримані масиви даних.

Отримані дані аналізувалися на нормальність за допомогою програмного пакету STATISTICA. Для чого були обрані такі описові статистики: середнє значення, медіана, коефіцієнт асиметрії та його стандартна похибка, ексцес і його стандартна похибка.

Для сукупності даних, що аналізувалися на нормальність, було встановлено (табл. 2.1, 2.2), що середнє значення та медіана близькі між собою за значенням, коефіцієнт асиметрії від'ємний та відносно близький за значенням до нуля, стандартна похибка асиметрії не перевищує більш ніж в три рази абсолютне значення коефіцієнту асиметрії, при цьому, ексцес має досить суттєве від'ємне значення, але його стандартна похибка також не перевищує більш ніж в три рази його абсолютне значення. Проведена перевірка за обраними описовими статистиками свідчить, що гіпотеза на нормальність не відхиляється.

Таблиця 2.1 – Результати перевірки на нормальність за описовими статистиками для струмознімальних елементів типу «А»

Змінна	Середнє значення	Медіана	Мінімум	Максимум	Асиметрія	Стандартна похибка асиметрії	Ексцес	Стандартна похибка ексцесу
<i>НВ</i>	32,55309	32,99417	17,36464	48,64255	-0,076763	0,220879	-0,936247	0,438331
ρ , мкОм·м	27,70436	27,58700	21,45058	35,73885	-0,093179	0,220879	-0,671791	0,438331

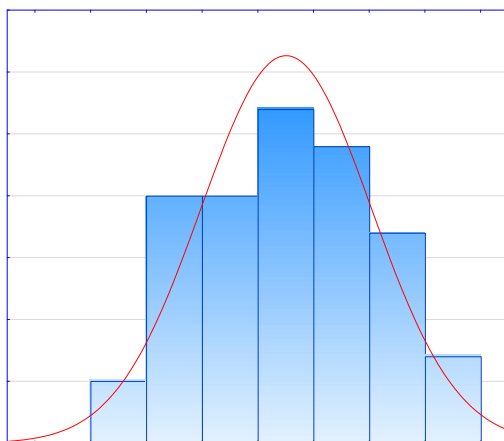
Таблиця 2.2 – Результати перевірки на нормальність за описовими статистиками для струмознімальних елементів типу «Б»

Змінна	Середнє значення	Медіана	Мінімум	Максимум	Асиметрія	Стандартна похибка асиметрії	Ексцес	Стандартна похибка ексцесу
<i>НВ</i>	15,57259	15,75114	11,49877	19,20000	-0,244896	0,219986	-0,850413	0,436585

$\rho_{\text{мкОм}\cdot\text{м}}$	18,54751	18,57000	10,81487	25,56000	-0,103759	0,219986	-0,876672	0,436585
-----------------------------------	----------	----------	----------	----------	-----------	----------	-----------	----------

Проведені розрахункові тести Колмогорова - Смірнова і Шапіро - Вілка для струмознімальних елементів типу «А» та типу «Б» показали (рис. 2.8, 2.9), що рівень значущості для тесту Колмогорова - Смірнова більше 0,2 – це свідчить, про те, що гіпотеза про нормальність за ним не відхиляється. За тестом Шапіро – Вілка, для струмознімальних вставок типу «А», рівень значущості становить менше 0,05 для твердості – гіпотеза про нормальність відхиляється, для більше для питомого електричного опору більше 0,05 – гіпотеза приймається. Також, гіпотеза про нормальність за тестом Шапіро – Вілка приймається для струмознімальних вставок типу «Б».

а)



б)

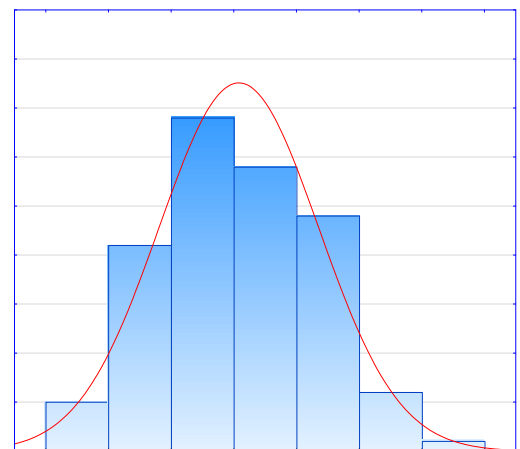


Рисунок 2.8 – Графічне відображення розрахункових тестів на нормальність Колмогорова – Смірнова і Шапіро – Вілка для струмознімальних елементів типу «А»

а)

б)

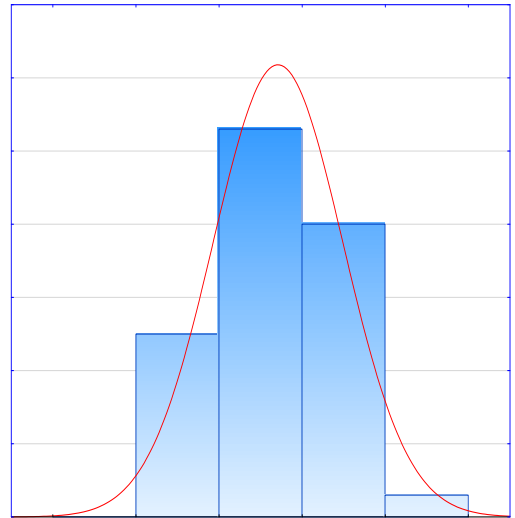
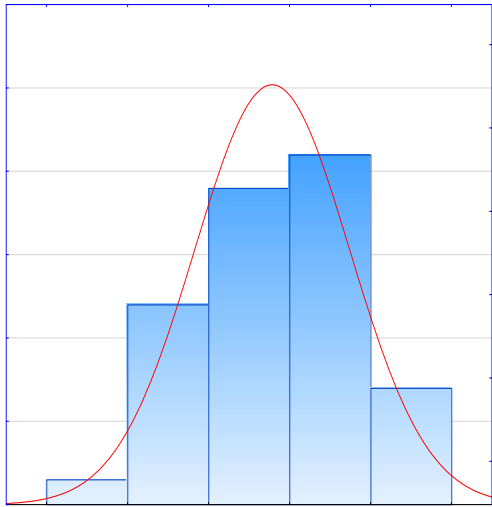
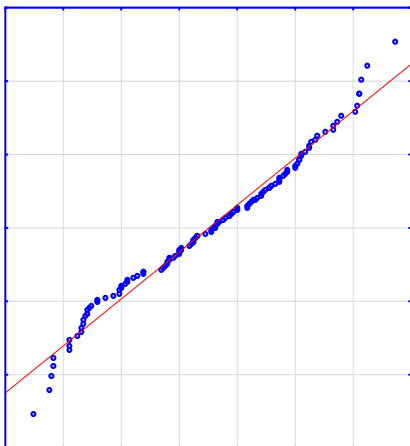


Рисунок 2.9 - Графічне відображення розрахункових тестів на нормальність Колмогорова – Смірнова і Шапіро – Вілка для струмознімальних елементів типу «Б»

Аналіз нормально-вірогіднісних графіків (рис. 2.10, 2.11) показав, що наявні несистематичні відхилення, але гіпотеза про нормальність не відхиляється, так як основна частина фактичних даних розташована вздовж теоретичної нормальної прямої.

а)



б)

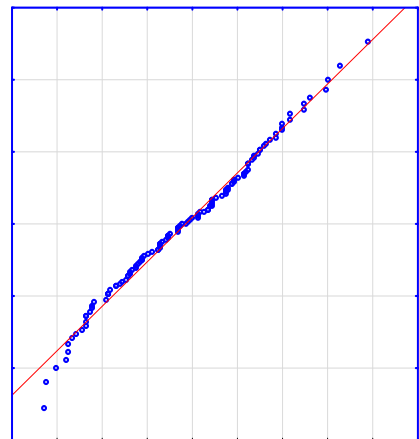


Рисунок 2.10 – Normally-вірогіднісний графік розподілу даних для струмознімальних елементів типу «А»

а)

б)

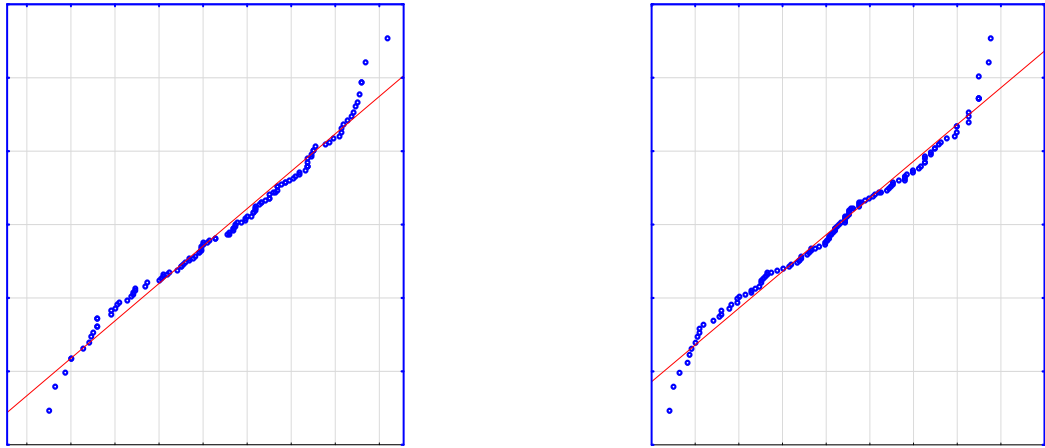


Рисунок 2.11 – Нормально-вірогіднісний графік розподілу даних для струмознімальних елементів типу «Б»

Побудовані коробчасті діаграми (рис. 2.12, 2.13) показують, що викиди відсутні, коробочка та вуса діаграми симетричні, а медіана розташована по центру, що свідчить про нормальність розподілу даних.

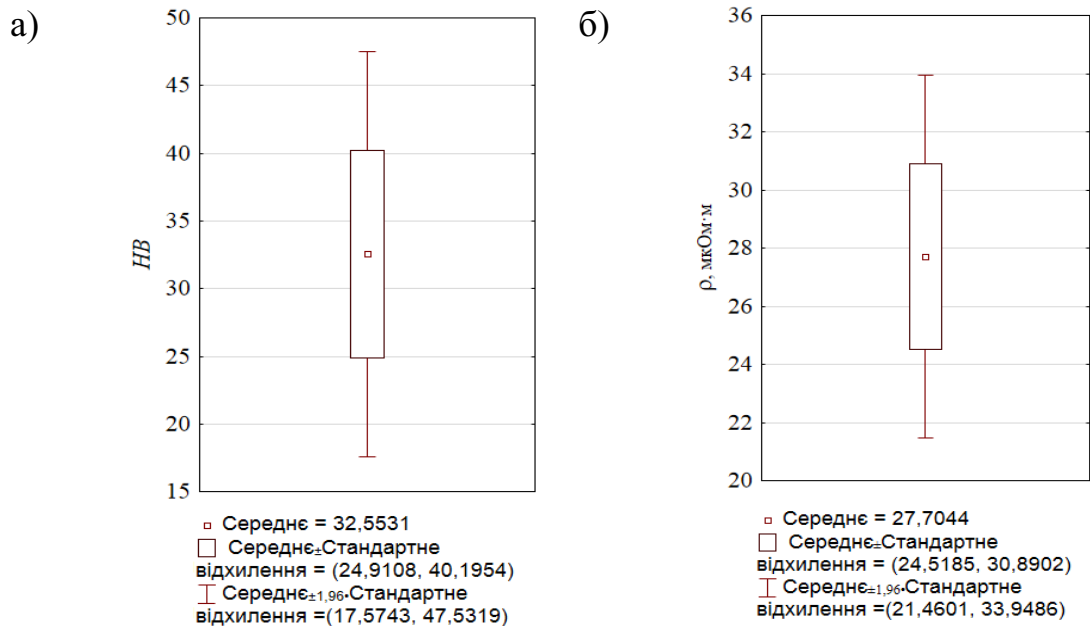


Рисунок 2.12 – Коробчасті діаграми для струмознімальних елементів типу «А»

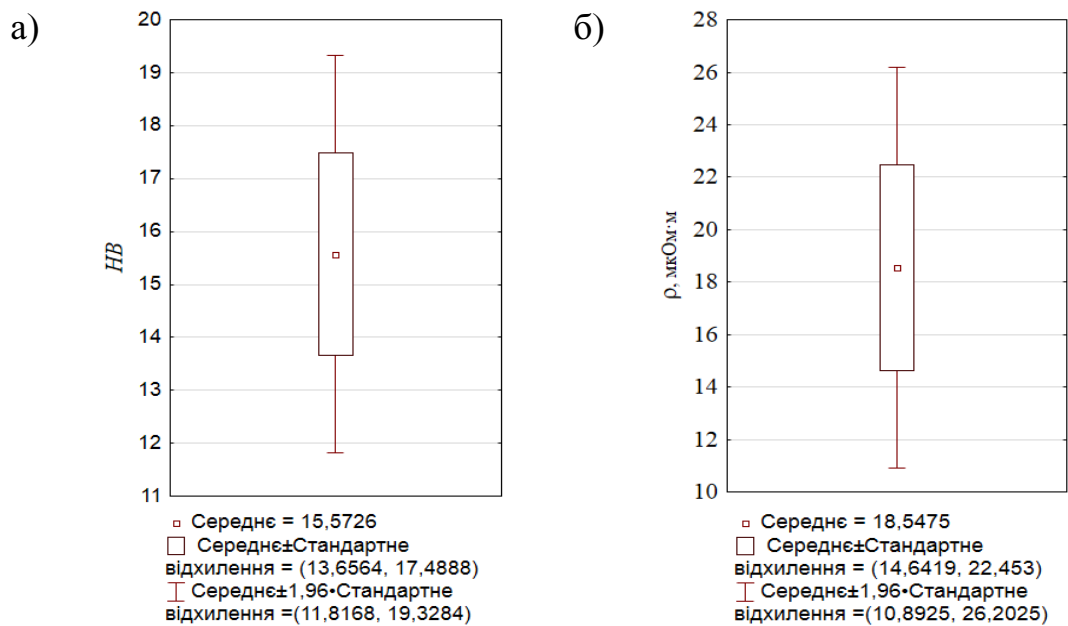


Рисунок 2.13 – Коробчасті діаграми для струмознімальних елементів типу «Б»

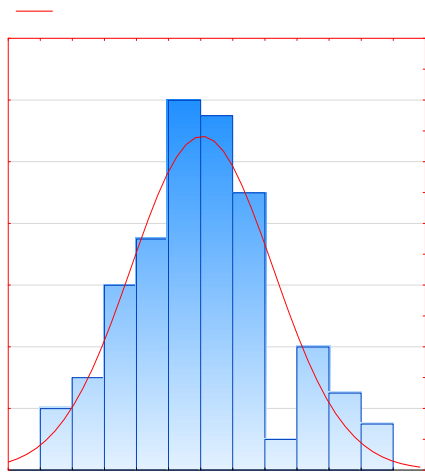
Розподіл даних можна вважати нормальним, так як лише один з п'яти тестів (опосередкованих, графічних та розрахункових) показав ознаку ненормальності.

Гіпотеза про нормальність даних не відхиляється, а дані в цілому підпорядковані нормальному закону розподілу.

Для визначення статистичного взаємозв'язку між досліджуваними параметрами вуглецевих струмознімальних елементів була побудована кореляційна матриця, яка показала, що між твердістю та питомим електричним опором наявна сильна кореляція (більше 0,95 для струмознімальних елементів типу «А» та більше 0,97 для типу «Б»).

Побудовані гістограми залишків (рис. 2.14), які показують, що залишки зосереджені в середній частині інтервалу, гістограма симетрична, можна вважати, що гіпотеза про нормальність їх розподілу не відхиляється.

а)



б)

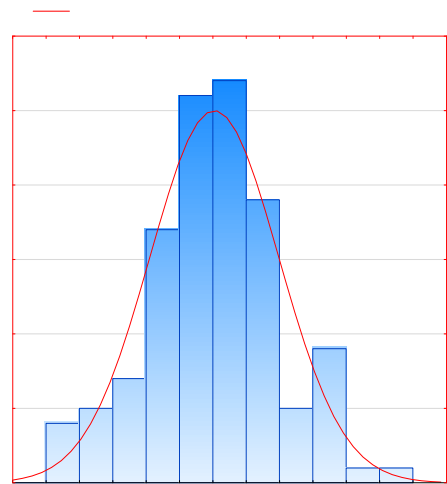
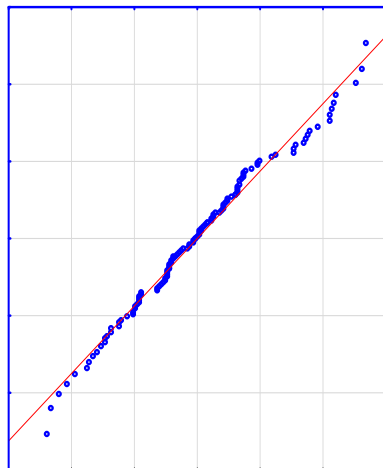


Рисунок 2.14 – Гістограма залишків для струмознімальних елементів типу «А» (а) та типу «Б» (б)

Побудований нормально-вірогідний графік залишків (рис. 2.15) свідчить про відсутність систематичних відхилень фактичних даних від теоретичної прямої, що також свідчить про нормальність розподілу залишків.

а)



б)

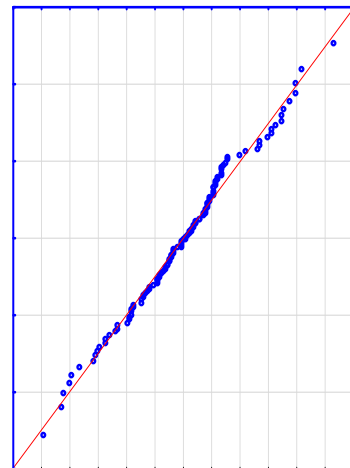


Рисунок 2.15 – Нормально-вірогідний графік залишків для струмознімальних елементів типу «А» (а) та типу «Б» (б)

Побудована діаграма залежності розсіювання залишків (рис. 2.16) від передбачених значень свідчить про відсутність направленості розподілення точок – вони досить хаотично розташовуються на площині, відповідно можна зробити висновок, що залишки не залежать від передбачених даних.

а)

б)

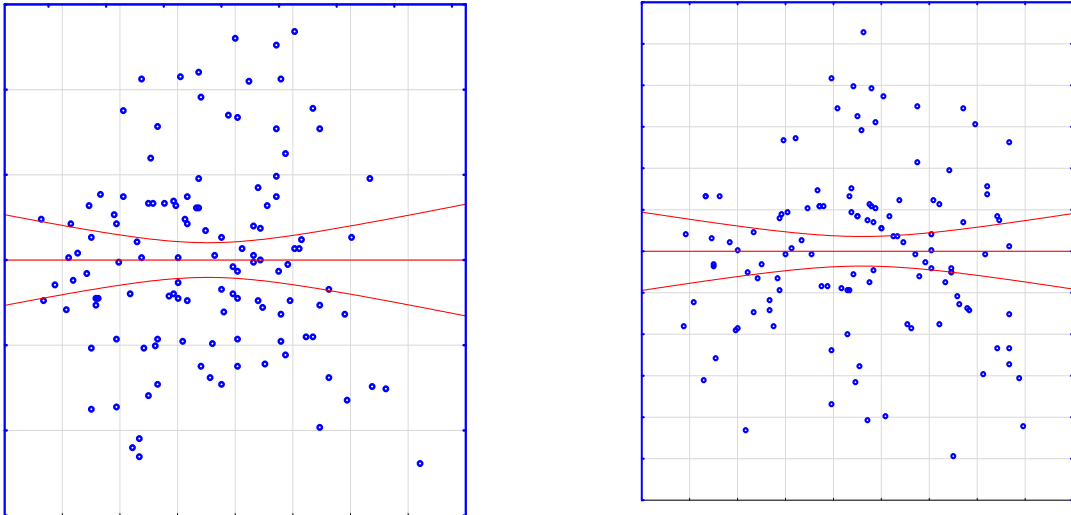


Рисунок 2.16 – Діаграма розсіювання залишків для струмознімальних елементів типу «А» (а) та типу «Б» (б)

Проведений аналіз залишків показав досить високу якість моделей.

Для оцінки прийнятності моделі в цілому, проводився дисперсійний аналіз (ANOVA), так як рівень значимості становить менше 0,05 можна сказати, що модель є прийнятною.

Значення коефіцієнта детермінації для струмознімальних елементів типу «А» $R^2=0,928$ та типу «Б» $R^2=0,958$ показує, що існує тісний статистичний взаємозв'язок між твердістю та питомим електричним опором для цих типів струмознімальних елементів.

Лінійна модель, яка описує статистичний взаємозв'язок між твердістю та питомим електричним опором для струмознімальних елементів типу «А» має вигляд:

Лінійна модель, яка описує статистичний взаємозв'язок між твердістю та питомим електричним опором для струмознімальних елементів типу «Б» має вигляд:

Останнім етапом перевірки моделі було зрівняння прогнозованих значень з вимірними, які не включалися в навчальну вибірку. Відносна похибка прогнозованого та фактичного (виміряного) значення склала для струмоznімальних елементів типу «А» 5,83%, а для типу «Б» 4,91%.

Вимірювання питомого електричного опору та твердості, для ряду струмоznімальних елементів показало, що їх взаємозв'язок відображає структурну однорідність матеріалу.

При цьому, серед партії можуть мати місце струмоznімальні елементи як з максимальним значенням твердості та питомого електричного опору так і з мінімальним, що відповідає вимогам існуючої нормативної документації, але обмеження цього розкиду могло б позитивним чином вплинути на ресурсні характеристики як контактних проводів так і струмоznімальних елементів.

Визначення параметрів струмоznімальних елементів, проводилось також для проведення подальших досліджень на зношування. З метою отримання найбільш якісної картини впливу зовнішніх факторів на процес зношування пар тертя в подальших дослідженнях відбирались струмоznімальні елементи з характерним розкидом параметрів.

2.2 Дослідження впливу контактного опору пар тертя та перехідного опору «струмоznімальний елемент – полоз» на процес струмоznімання

Інтенсивність електричного зношування матеріалів ковзного контакту залежить не тільки від їх природи, а також від щільності струму і конструкції контакту. Поверхні розривних і ковзних контактів завжди мають нерівності (шорсткість) в результаті механічної обробки, зношування, пластичної деформації. Крім того, вони покриті плівкою оксидів і сульфідів, що утворюються під впливом кисню повітря, озону, сірковмісних газів і рідин, а також випадкових різних забруднювачів. Товщина такої плівки залежить від багатьох факторів і зазвичай становить 10^{-6} - 10^{-5} мм. Розподіл струму по

контактуючим поверхням нерівномірний, так як їх структура неоднорідна.

Електричний струм, рівномірно розподілений по площі перерізу контактуючих елементів (наприклад, контактного проводу та струмознімальних елементів), при проходженні через струмопровідні ділянки (плями) стягується. В результаті щільність струму на цих ділянках підвищується і, відповідно, виникає електричний опір стягування ліній струму. В зв'язку з цим контактний (перехідний) опір є сумою опорів, що складаються з опору, що виникає в струмопровідних ділянках, і опору, що утворюється внаслідок стягування ліній струму [100].

Сила контактного натискання P і стан контактуючих поверхонь (так само як і величина струму) безпосередньо впливають на контактний опір R_k і температуру нагрівання контактів при протіканні через них електричного струму. Зі збільшенням P в місці контакту і зменшенням ступеню шорсткості поверхонь контакту R_k може істотно знижуватися. В сильнострумовому ковзному контакті всі розглянуті процеси перебувають у динаміці, тому площі контактних плям, розміри дійсної та уявної поверхонь і сам контактний опір R_k постійно змінюються.

На контактний опір контактуючих поверхонь безпосередньо впливають сила натиску струмоприймача, сила струму в контакті і температура зони контакту, яка є результатом протікання струму і процесу тертя.

В ході досліджень встановлювали залежність контактного опору від сили натискання та сили струму, який протікав через точку контакту. Визначення контактного опору визначали експериментально за допомогою мікроомметра в статичі при усталеній температурі, так як зміна температури контактуючих поверхонь призводить до зміни контактного опору.

Результати дослідження контактного опору пар тертя приведені на рис. 2.17 – 2.19.

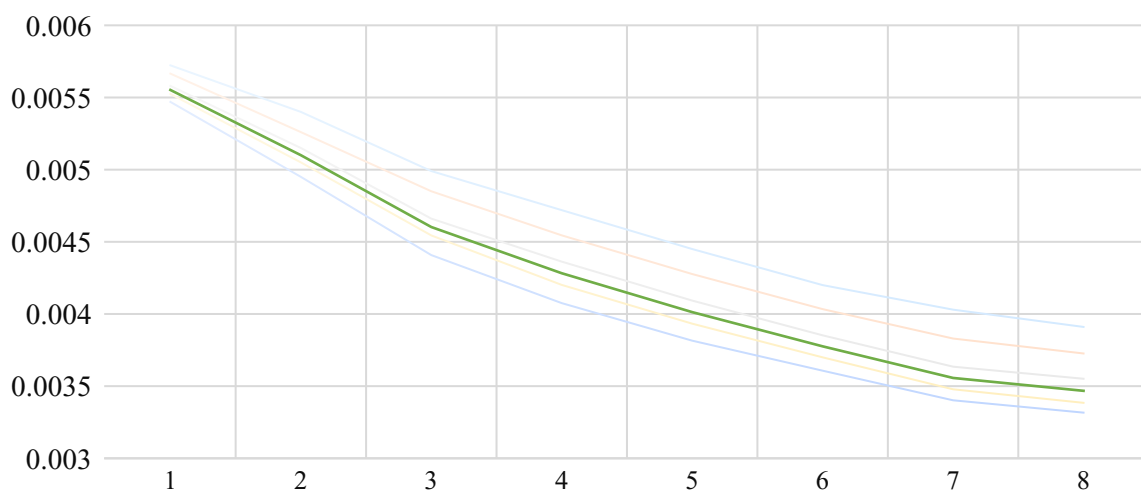


Рисунок 2.17 – Поверхня зміни контактного опору між контактним проводом та струмознімальною вставкою типу «А»

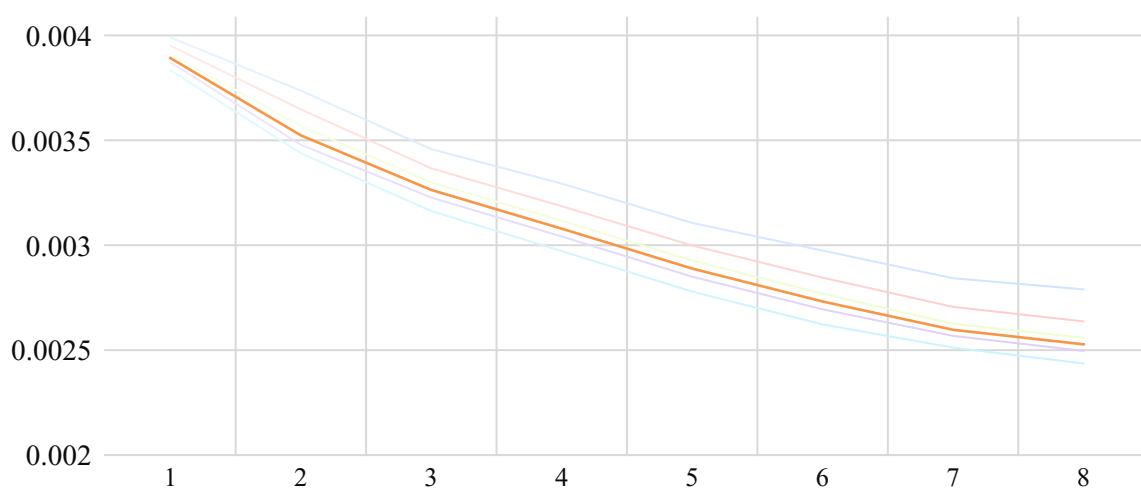


Рисунок 2.18 – Поверхня зміни контактного опору між контактним проводом та струмознімальною вставкою типу «Б»

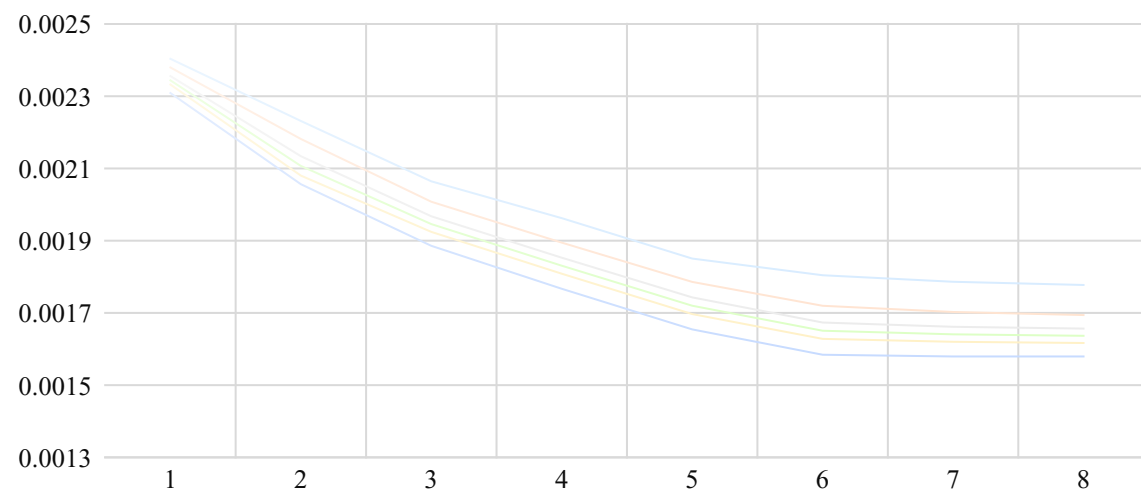


Рисунок 2.19 – Поверхня зміни контактного опору між контактним проводом та мідною пластиною

Як можна побачити з отриманих залежностей, при слабкому натиску струмознімального елемента на контактний провід величина контактного опору збільшується. Це викликано тим, що чим менша сила натиску тим більша площа неконтактуючих ділянок [5, 25].

В зв'язку з тим, що струм в сильнострумовому ковзному контакті протікає тільки через металеві та квазіметалеві ділянки, лінії електричного струму розподіляються нерівномірно по всій геометричній поверхні контакту. Вони стягуються до ділянок з металевою та квазіметалевою провідністю, в результаті чого густина струму на цих ділянках збільшується. Через це з'являється електричний опір стягування ліній струму котрий являється складовою контактного опору. Також необхідно зазначити, що в сильних електричних полях в результаті пробію товстих оксидних та сульфідних плівок, а також повітряних проміжків вони стають електропровідними і частина електричної енергії передається через електродугові розряди, що дещо зменшує контактний опір, а площа контактуючих поверхонь збільшується.

На в свою чергу безпосередньо впливають сила контактного натиску, стан контактуючих поверхонь, величина струму. Зі збільшенням натиску, зменшенням ступеню шорсткості поверхні контакту та ділянок з ізолюючими товстими плівками окислів та сульфідів може суттєво знизитись. Через те, що в сильнострумовому ковзному контакті всі процеси протікають в динаміці контактний опір змінюється по довжині контактного проводу і також залежить від зовнішніх впливаючих умов та конструкції взаємодіючих коливальних систем.

Необхідно відмітити, що значення контактного опору для усіх типів струмознімальних елементів має однаковий порядок, при цьому, для розкиду твердості струмознімальних елементів всередині партії він практично не змінюється, це свідчить про те, що не залежить від питомого електричного опору струмознімального елемента.

При проведенні досліджень на знос, контактним опором було вирішено знехтувати, через неможливість його визначення в динаміці та його несуттєвий вплив при зміні твердості струмознімальних елементів конкретного типу.

Також, на ресурс роботи вугільних струмознімальних вставок, значним чином впливає величина перехідного опору «вставка – полоз струмоприймача». В реальних умовах експлуатації повсюдно порушуються технологічні норми обслуговування струмоприймачів: відсутні мідні підкладки; сталеві каркаси полозів покриті іржею та окалиною (рис. 2.20, 2.21), що значно підвищує опір протіканню струму; незадовільне прилягання підшви вставок до каркасу полозу; наявність зазорів між торцевими поверхнями вставок та інше [51].



Рисунок 2.20 – Іржа та окалина на полозі струмоприймача



Рисунок 2.21 – Стан полозу струмоприймача в експлуатації (депо Знам'янка)

Збільшений перехідний опір пари «вставка – полоз струмоприймача» призводить до значного збільшення температури контакту і, як наслідок, до появи прогинів в середній частині полозу струмоприймача.

Для зменшення втрат в перехідному контакті «вставка – полоз» локомотивним депо необхідно посилити вимоги до якості обслуговування полозів струмоприймачів.

2.3 Експериментальні дослідження зносу пари тертя струмознімання

Експериментальні дослідження зносу ковзного сильнострумового контакту покликані для визначення характеру впливу таких параметрів як сила натиску, матеріал струмознімальних елементів, струм в контакті та наявність вологи впливають на ресурсні характеристики як контактних проводів так і струмознімальних елементів.

2.3.1 Оптимальна організація експериментальних досліджень

В ході імітаційного моделювання процесу струмознімання, для визначення значущих впливаючих факторів використовували методи планування експерименту.

Враховуючи складність та неоднозначність процесів, що відбуваються в ковзному сильнострумовому контакті, нижче визначали значущі впливаючі фактори, для чого використовували методи планування експерименту, що дозволяють проводити дослідження, одночасно змінюючи значення усіх впливаючих факторів [101–104].

Для визначення оптимальних умов роботи системи струмознімання був проведений ряд багатофакторних експериментів, у відповідності до [101].

При проведенні досліджень проводили постановку повторних та паралельних дослідів для досягнення співпадаючих результатів і мінімізації похибки відтворюваності, через це кожен експеримент носив в собі деяку невизначеність та частку довільного впливу факторів.

Процес планування експерименту починався зі збору апріорної інформації, яка дозволяє отримати представлення про досліджуваний параметр, про фактори, які на нього впливають та найкращі умови проведення дослідження.

При плануванні експерименту визначалися з функціями, які можуть бути суміщеними між собою і паралельно вимірюватись, а також встановлюватись на будь-якому рівні.

Для визначення найшвидшого покращення параметру оптимізації використовували поліном першого порядку. Для його побудови приймали мінімальну кількість рівнів – верхній та нижній, які позначали в кодованих координатах +1 та -1. Варіювання факторів на двох рівнях необхідне для визначення напрямку руху до області оптимуму. Головною вимогою до моделі була спроможність передбачати напрямок подальших дослідів.

Перевірка адекватності моделі виконувалась за допомогою критеріїв Стюдента та Фішера.

Перший етап планування експерименту для отримання лінійної моделі оснований на варіюванні двох факторів, тоді, при відомій кількості факторів можна знайти число дослідів, яке необхідне для реалізації усіх можливих поєднань рівнів факторів. Кількість дослідів буде рівною 2^k , де k – кількість факторів.

Умови експерименту записувались у вигляді матриці планування експерименту [105–REF_Ref499546147 \r \h * MERGEFORMAT 107].

Для побудови матриці планування використовувались три прийоми, для переходу від матриці меншої розмірності до матриці більшої розмірності. Після її побудови та отримання експериментальних даних розраховували коефіцієнти регресії та записували лінійну модель типу:

(2.7)

Постановка експериментальних досліджень проводилась на установці [108] (рис. 2.22, Додаток А), у відповідності до п. 2.3.2.

Процес взаємодії контактної пари «контактний провід – струмознімальний елемент» характеризувався їх власними характеристиками (фізико-хімічні властивості матеріалів пари тертя) та зовнішніми параметрами (динамічні навантаження, величина струму, натиск, швидкість ковзання та інші). Тому, для забезпечення чистоти експерименту при повторних дослідах матриця виконувалась зі зміненим порядком виконання дослідів, а поверхні взаємодіючих елементів зачищалися.

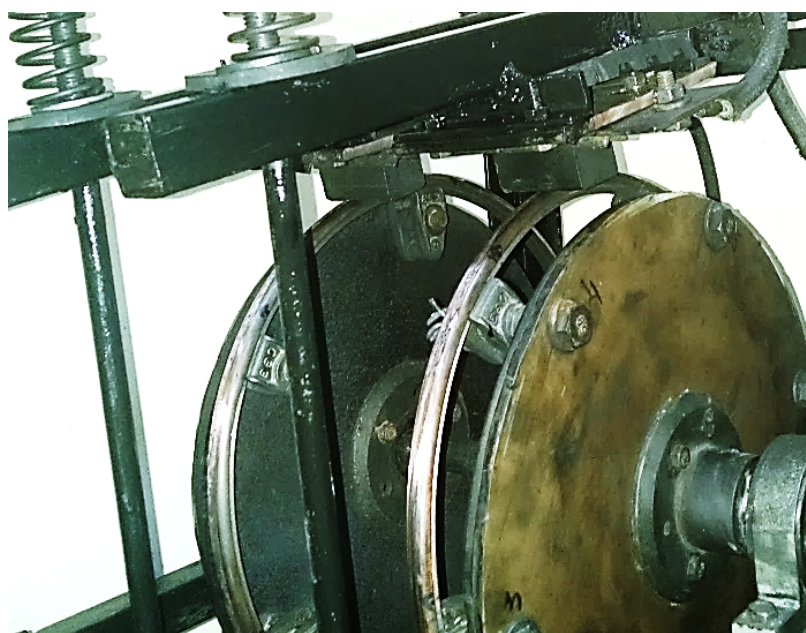


Рисунок 2.22 – Зовнішній вигляд пристрою для визначення коефіцієнту тертя та інтенсивності зношування трибопари

Використовуючи матрицю умов повного факторного експерименту визначалися коефіцієнти лінійного рівняння регресії для моделі зносу контактних провідів та струмознімальних елементів. Для цього в матрицю вводилась фіктивна змінна x_0 , яка приймає у всіх випадках значення «+».

Для дослідження сумісного впливу факторів використовувалась розвернута матриця планування експерименту.

Матриця умов повного факторного експерименту для дослідження зносу пари тертя приведена в табл. 2.4.

Таблиця 2.4 – Матриця повного факторного експерименту

№	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_1x_2	x_1x_3	x_1x_4	x_2x_3	x_2x_4	x_3x_4	$x_1x_2x_3$	$x_1x_3x_4$	$x_1x_2x_4$	$x_2x_3x_4$	$x_1x_2x_3x_4$	y
1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	1	y_1
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	y_2
3	+1	-1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	y_3
4	+1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	+1	y_4
5	+1	-1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	y_5
6	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	y_6
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	+1	y_7
8	+1	+1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	-1	-1	y_8
9	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	y_9
10	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	y_{10}
11	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	y_{11}
12	+1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	+1	-1	-1	y_{12}
13	+1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	+1	y_{13}
14	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	y_{14}
15	+1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	-1	y_{15}
16	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	y_{16}

Примітка: в таблиці x_1, x_2, x_3, x_4 – натиск, твердість струмоznімального елемента, волога, струм, відповідно, а їх добутки – комбінації цих факторів; y – параметр, що досліджується (знос контактного проводу чи струмоznімальних елементів).

Проводячи повний факторний експеримент типу 2^k , де кількість факторів $k=4$, а число рівнів $p=2$, число дослідів $N=16$, а число повторних дослідів $n=6$.

Повний факторний експеримент проводився наступним чином.

В матрицю планування додавалися результати повторних дослідів та розраховували середнє значення .

Після проведення дослідів проводилася статистична обробка результатів. Середньоквадратичне відхилення визначали за формулою:

(2.8)

Проводилася перевірка значимості коефіцієнтів регресії за критерієм Стьюдента, розрахункове значення якого визначалось як відношення модуля коефіцієнта рівняння до середньоквадратичного відхилення :

(2.9)

де середньоквадратичне відхилення визначається з формули:

(2.10)

де – відтворюваність експерименту, визначається за формулою:

(2.11)

Статистичне значення критерію Стьюдента визначалося з таблиці розподілення за числом ступенів свободи та довірчою вірогідністю рівною 0,95.

Гіпотеза про значимість коефіцієнта приймалася при умові, що розрахункове значення критерія Стьюдента більше критичного, в противному випадку він рахується незначущим, прирівнюється до нуля і гіпотеза про значимість коефіцієнта відхиляється.

Перевірка адекватності моделі проводилася за критерієм Фішера. Його розрахункове значення знаходиться з відношення дисперсії адекватності до дисперсії одиничного спостереження:

(2.12)

де дисперсія адекватності визначається як залишкова сума квадратів розділена на число ступенів свободи:

(2.13)

Число ступенів свободи визначалося як різниця числа дослідів та числа значущих коефіцієнтів рівняння. Якщо розрахункове значення критерію Фішера менше критичного, то з вірогідністю рівною 0,95 можна вважати

отриману модель адекватною.

На основі отриманих експериментальних даних сформована лінійна математична модель досліджуваного процесу, яка дозволяє визначатися з подальшим напрямком експериментальних досліджень та оптимізувати параметри стендових установок.

Користуючись матрицями повного факторного експерименту були визначені коефіцієнти лінійного рівняння регресії, проведена їх перевірка на значущість за критерієм Стьюдента та адекватність отриманих математичних моделей за критерієм Фішера. Для моделей зношування контактного проводу та струмознімальних елементів не пройшли перевірку на значимість за критерієм Стьюдента коефіцієнти, що позначають вплив вологи та струму, відповідно. Але автором було вирішено ввести ці коефіцієнти в отримані лінійні моделі для зношування контактного проводу (2.14) та струмознімальних елементів (2.15), так як роботи [94, 109, 110] свідчать про характерний вплив цих параметрів U -подібне зношування пар тертя сильнострумового контакту.

Лінійна модель зношування контактного проводу в $\text{мм}^2/10$ тис. проходів струмознімальних елементів матиме вигляд:

(2.14)

Лінійна модель зношування струмознімальних елементів в $\text{мм}/10$ км матиме вигляд:

(2.15)

Такі попередні дослідження дозволили визначити недоліки експериментальних установок, тривалість досліджень та можливі недоліки

вимірювальних засобів. Результатом такого попереднього напрацювання є алгоритм планування експерименту, план процедури вимірів та алгоритм обробки результатів.

2.3.2 Методика проведення експериментальних досліджень на зношування сильнострумового контакту

Відрізок контактного проводу МФ-100 [111] у вигляді замкнутої кривої щільно закріплювався на експериментальній установці за допомогою струнових затискачів.

Силу притискання струмознімальних елементів до контактного проводу встановлювали за допомогою динамометра в момент відриву [112] перед початком досліджень на зношування. Дослідження на зношування пари тертя проводили при зміні натиску від 15 до 85 Н, для різних поєднань пар тертя.

Перед початком та в кінці кожного дослідження проводили вимір висоти перетину контактний проводу мікрометром [113], в точках які знаходяться на рівній відстані одна від одної та висоти фрагментів струмознімальних елементів.

В місцях вимірювань висот перетину контактний проводу були нанесені мітки та номери точок, для забезпечення адекватності вимірів.

Оцінка зносу контактний проводу та струмознімального елементу визначалася як різниця висоти перетину до стендових випробувань на зношування та після.

Вимірювання зносу контактний проводу проводили після 10 тис. проходів по ньому струмознімальних елементів, проводився зовнішній огляд струмознімальних елементів та контактних проводів на наявність пошкоджень, вимірювалася висота струмознімальних елементів.

Лінійна швидкість контактний проводу визначається виходячи з перерахунку кількості об/хв електродвигуна та передаточного числа редуктора в м/с

Сила струму, який протікав через ковзний контакт визначалася амперметром, що встановлений на джерелі постійного струму. Дослідження на зношування елементів пари тертя «контактний провід – струмознімальний елемент» проводилося з протіканням струму 100 – 500 А.

Перед проведенням досліджень, проводили визначення фізико-механічних характеристик елементів пари тертя.

Налаштування параметрів установок проводилося перед початком дослідження та повторно контролювалося після його закінчення.

При протіканні струму в контакті та наявності вологи, контролювали постійність їх величини.

Для забезпечення усталеного режиму зношування контролювалася та стабілізувалася температура всередині та назовні струмознімальних елементів. Для цього використовувався інфрачервоний пірометр FLUS «IR-822» з термопарою *K*-типу і налаштованим коефіцієнтом емісії виконаний у формі пістолета з дисплеєм і керуючим джойстиком. Пірометр оснащений лазерним прицілом з двома променями, які вказують на межі області вимірювання температури по вертикалі. Він призначений дистанційного вимірювання температури будь-яких полірованих і матових тіл з середньої відстані. Наявність термопари дозволяє визначати коефіцієнт емісії та температуру в середині матеріалу. В ході досліджень пірометр встановлювався на штатив для контролю температури в заданій точці.

Вимірювання температури безпосередньо в середині вугільної вставки проводилося за допомогою термопари *K*-типу рис. 2.23.

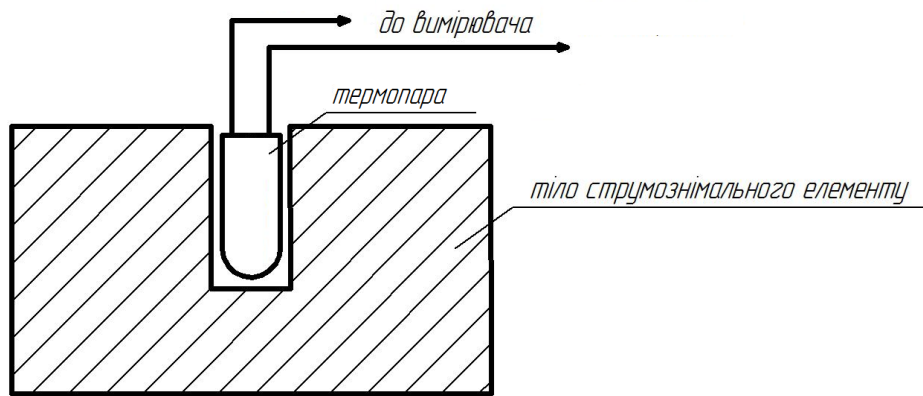


Рисунок 2.23 – Схема установки термопари в тілі струмознімального елемента

При збільшенні температури понад 100 °С зона контакту примусово охолоджувалась повітряним потоком.

Визначення відносної вологості в зоні контакту проводилося за допомогою гігрометра MDM25 обладнаного виносним датчиком, який розміщували в зоні контакту і визначали ступінь відносної вологості. Ступінь відносної вологості змінювався в межах від 40 до 100 %.

При проведенні зрівняльних експериментальних досліджень на зношування пар тертя струмознімання «контактний провід – струмознімальний елемент», впливу зміни вологості повітря, струмового навантаження та сили натиску на інтенсивність зношування контактних проводів та струмознімальних елементів різних типів використовувався пристрій для визначення коефіцієнту тертя та інтенсивності зношування трибопар [REF_Ref499542408 \r \h * MERGEFORMAT 108, 114] (Додаток А). Пристрій дозволяє пропускати через ковзний контакт струм до 500 А, змінювати швидкість обертання дисків з контактними проводами в широких межах (до 30 м/с), змінювати силу притискання зразків струмознімальних елементів до контактного проводу, а в зоні контакту може змінюватись рівень вологості повітря.

Під час переміщення контактного проводу з високою лінійною швидкістю імітували нерівномірність висоти закріплення контактного проводу, що призводило до виникнення коливань пружних елементів через

радіальні та кутові переміщення. Нерівномірність контактного натискання і відриви, що мали місце під час випробувань, імітували аналогічні процеси, які відбуваються в реальних умовах експлуатації.

Параметри струмознімальних елементів, які використовувались в експериментальних дослідженнях на зношування приведені в табл. 2.5.

Таблиця 2.5 – Параметри струмознімальних елементів

Матеріал	Тип «Б»				Тип «А»				Мідь			
<i>НВ</i>	16,2	17,8	18,7	19,2	21,3	30,1	37,8	42,1	89,4	90,3	92,6	96,8
ρ , мкОм·м	17,38	21,36	22,3	25,1	24,3	25,6	28,5	29,3	0,018	0,018	0,018	0,017

Під час досліджень було встановлено, що тривала робота пристрою, при пропусканні граничних струмів призводила до надмірного нагріву струмознімальних елементів та контактних проводів, що створювало значну похибку вимірів. Для забезпечення усталеного режиму взаємодії пар тертя струмознімання і зменшення похибки вимірів [25, 26, 90], зона контакту примусово охолоджувалась.

2.3.3 Дослідження зношування елементів пари тертя при змінній силі натиску

Важливим фактором, який впливає на надійність та економічність струмознімання є сила натиску струмоприймача та стабільність контактного натиску по всій довжині прогону при усіх можливих швидкостях руху електрорухомого складу [2, 115, 116].

При малих амплітудах коливання натиску струмоприймача вздовж прогону, його динамічна складова незначним чином впливає на якість струмознімання. Але при появі відривів струмоприймача від контактного проводу з'являється іскріння та електрична дуга блакитного кольору [1, 4].

Як вже було вказано в розділі 1, сила натиску струмоприймача включає в себе чотири складові: статичний натиск, аеродинамічну підйомну силу, інерційні сили та сили опору тертю в шарнірах струмоприймача. Так на повний натиск струмоприймача впливає його конструкція, тип контактної

підвіски та швидкість руху електрорухомого складу.

Експлуатаційні дослідження натиску струмоприймачів на ділянках з різними контактними підвісками [9, 117, 118] свідчать про наявну циклічну зміну натиску струмоприймача вздовж прогону та його нерівномірність. З чого випливає, що на економічність струмознімання безперечний вплив чинить сила притискання струмознімальних елементів та її зміна по довжині прогону.

В роботі були проведені експериментальні дослідження впливу сили притискання струмознімальних елементів на інтенсивність зношування контактного проводу та самих струмознімальних елементів, результати яких приведені на рис. 2.24 – 2.29.

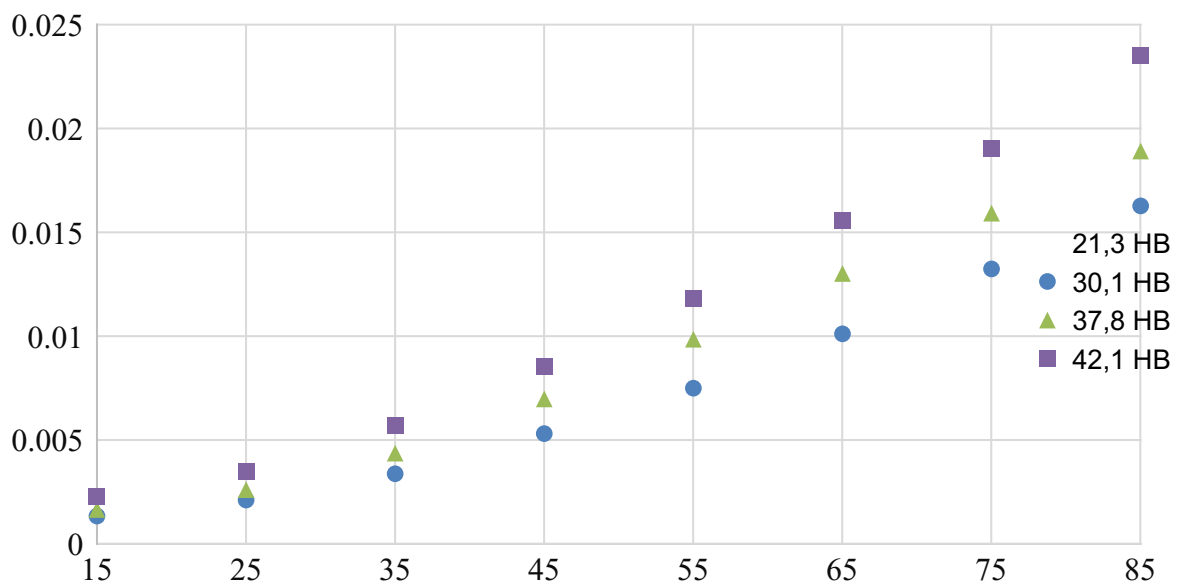


Рисунок 2.24 – Криві зносу контактного проводу в залежності від сили натиску при струмознімальних вставках типу «А»

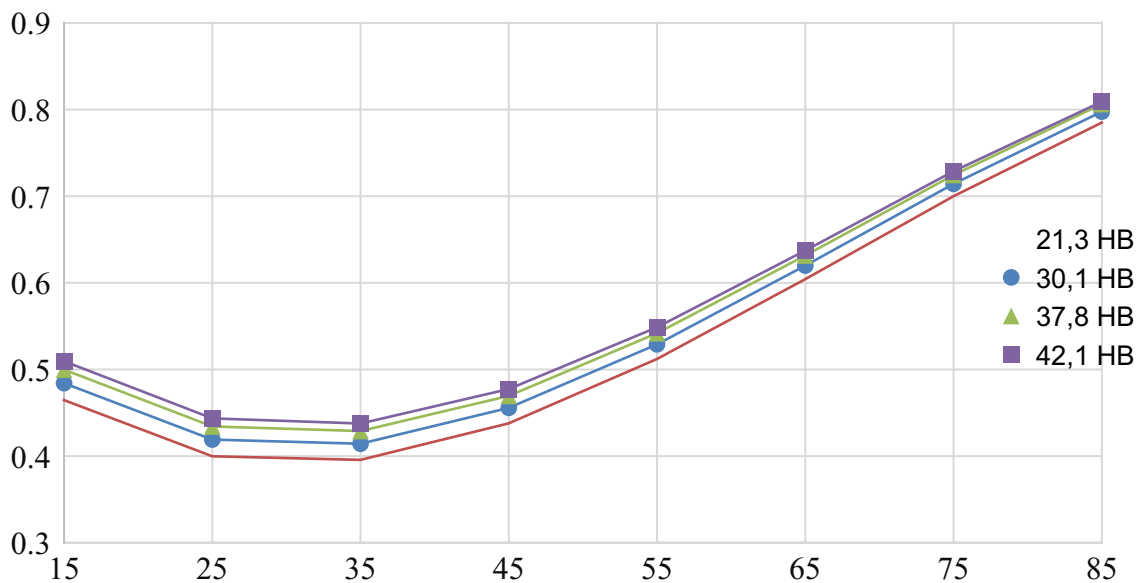


Рисунок 2.25 – Криві зносу струмознімальних вставок типу «А» в залежності від сили натиску

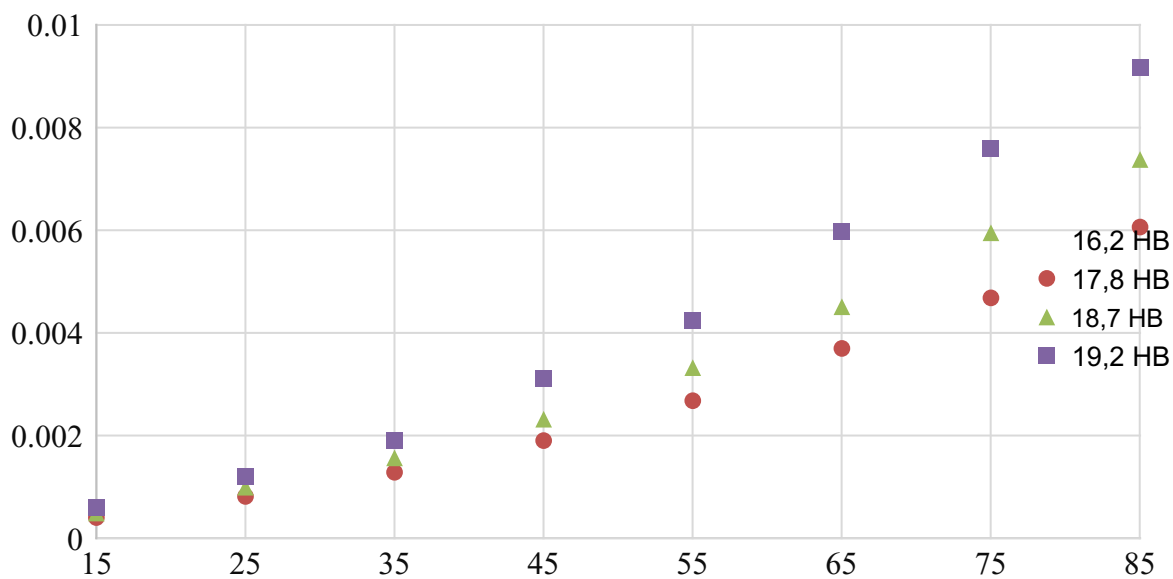


Рисунок 2.26 – Криві зносу контактного проводу в залежності від сили натиску при струмознімальних вставках типу «Б»

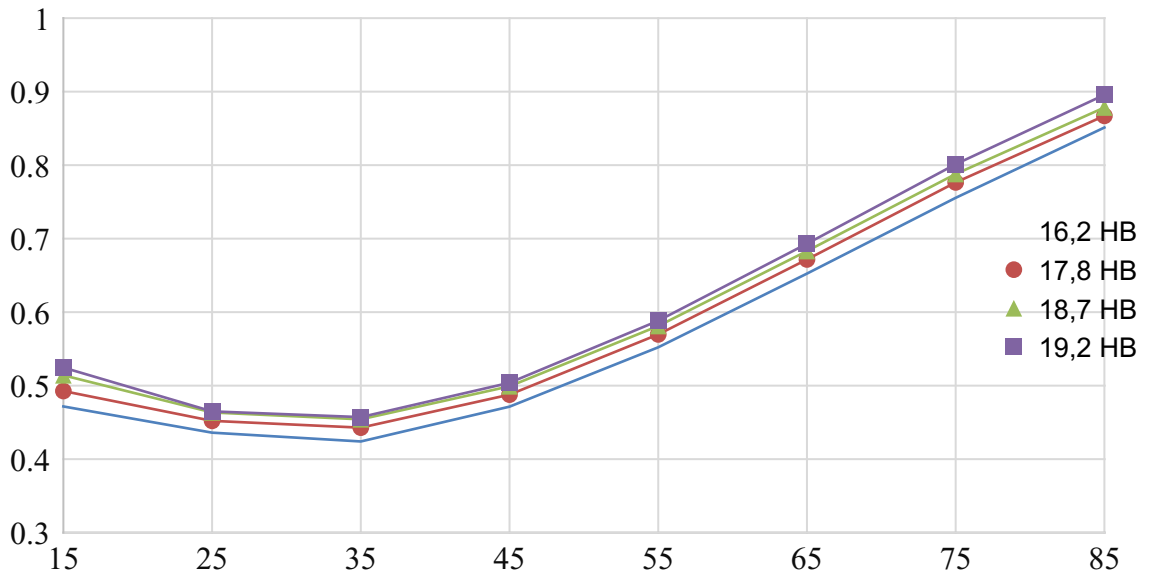


Рисунок 2.27 – Криві зносу струмознімальних вставок типу «Б» в залежності від сили натиску

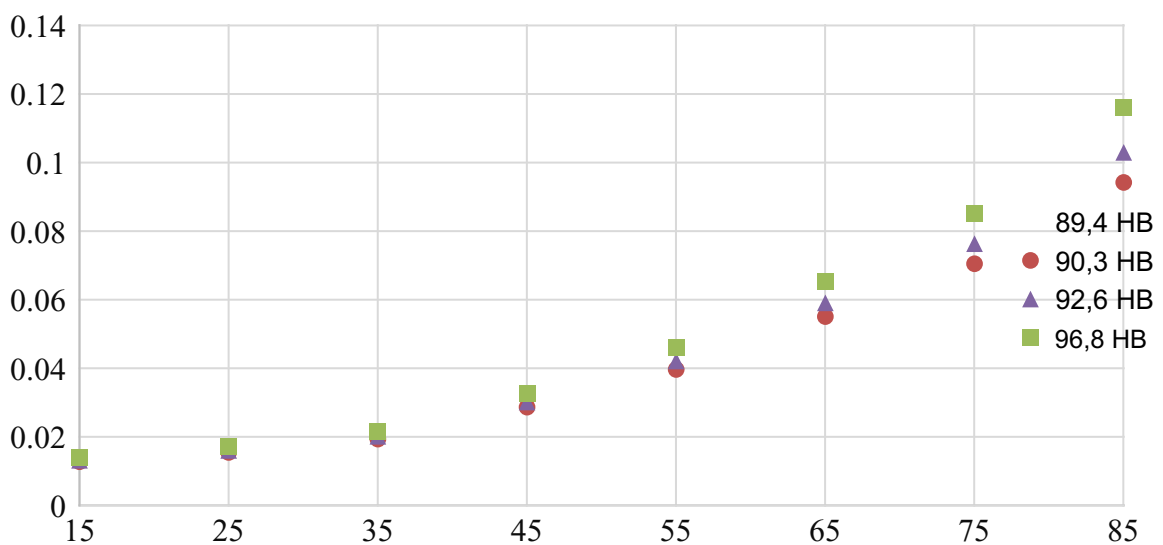


Рисунок 2.28 – Криві зносу контактного проводу в залежності від сили натиску при мідних пластинах

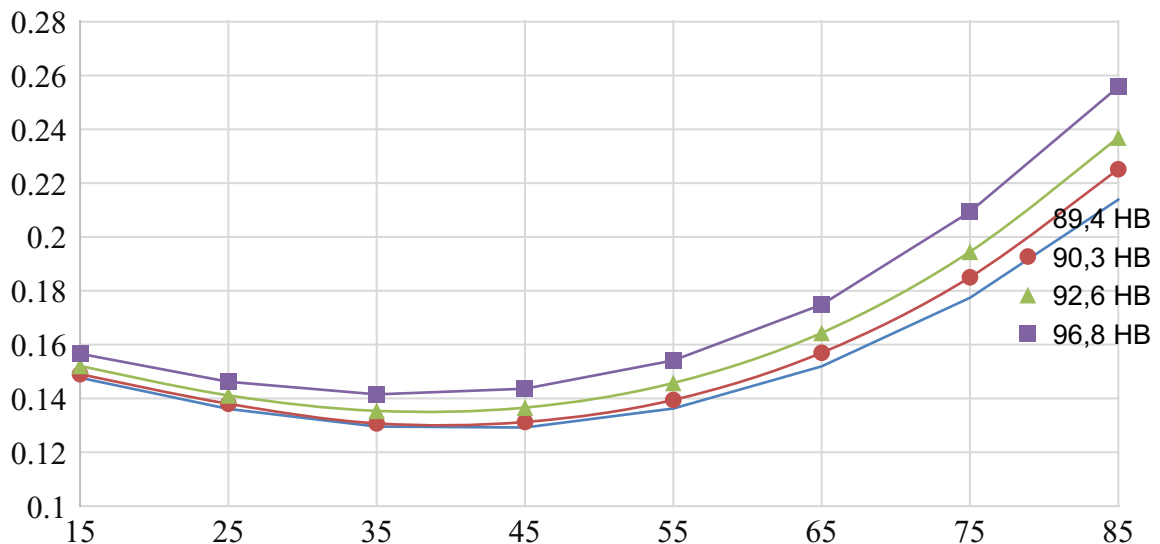


Рисунок 2.29 – Криві зносу мідних пластин в залежності від сили натиску

Аналіз отриманих результатів зношування контактних проводів та струмознімальних елементів від сили притискання, свідчить про наявність однакового характеру зношування контактного проводу при взаємодії зі струмознімальними елементами різних типів, але величина значення зносу відрізняється, що визначається фізико-механічними властивостями струмознімальних матеріалів.

З приведених кривих механічного зношування струмознімальних елементів можна побачити, що в середній частині інтервалу натиску наявна зона забезпечення оптимальної експлуатації струмознімального елемента, яка обумовлюється його мінімальним зношуванням.

2.3.4 Дослідження зношування пар тертя при протіканні струму

З [3, 5, 8, 15] відомо, що в зонах зі збільшеним натиском струмоприймача збільшується механічне зношування, а в зонах пониженого контактного натиску превалює електричне зношування контактних пар. Для визначення впливу струмового навантаження на характер зношування елементів пари тертя «контактний провід – струмознімальний елемент» були проведені додаткові дослідження з протіканням струму в контакті, який

змінювали в межах 100 – 500 А. Під час досліджень мали місце іскріння та короткочасне дугоутворення. Результати досліджень при наявності струму в контакті приведені на рис. 2.30 – 2.38.

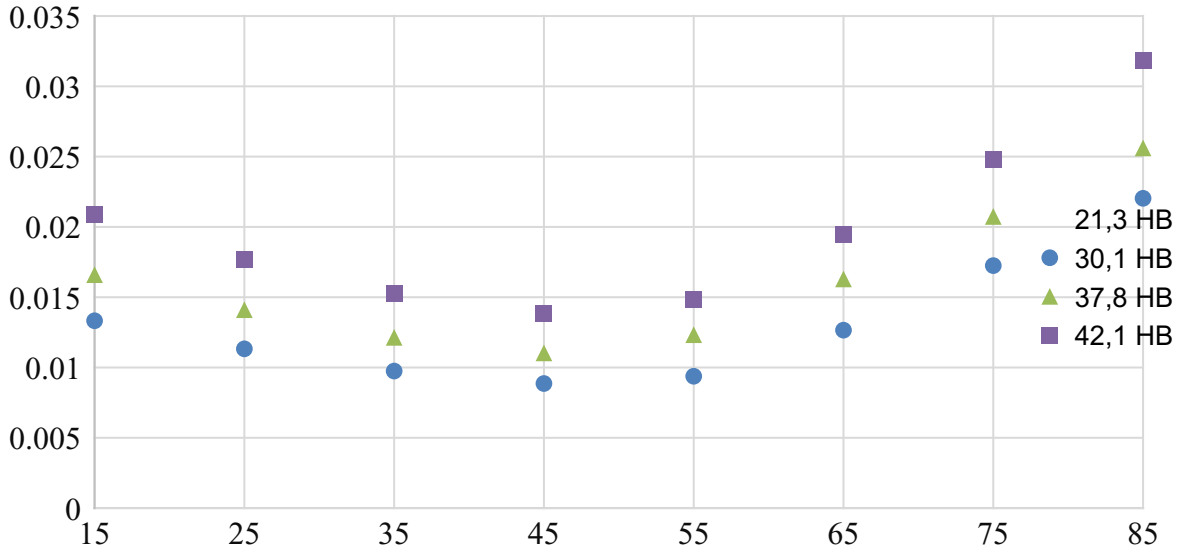


Рисунок 2.30 – Криві зношування контактного проводу в залежності від сили натиску при струмознімальних вставках типу «А» та силі струму 500 А

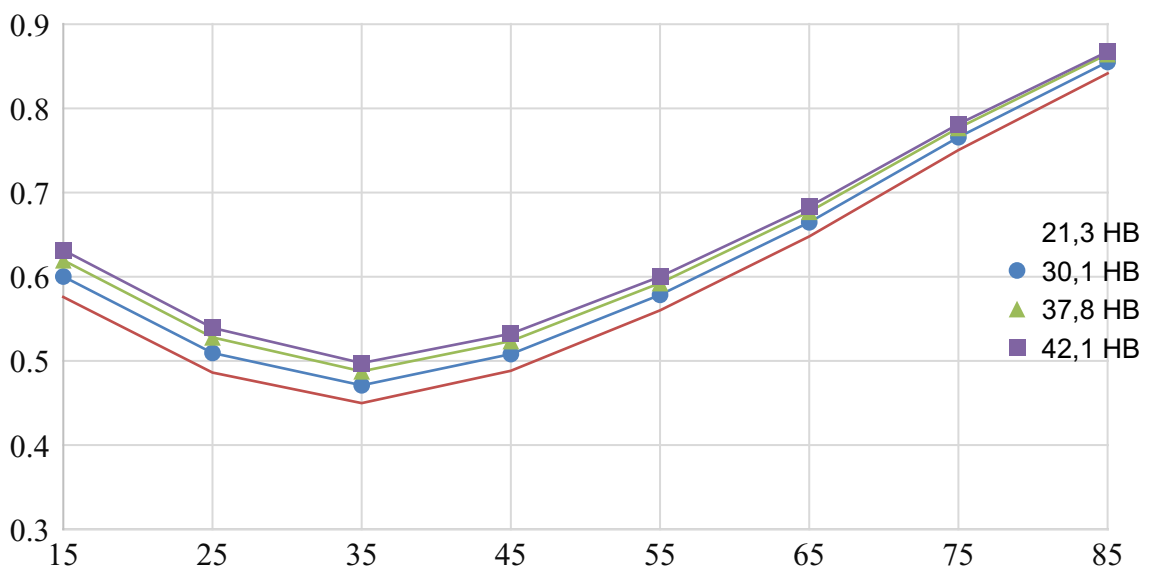


Рисунок 2.31 – Криві зношування струмознімальних вставок типу «А» в залежності від сили натиску та силі струму 500 А

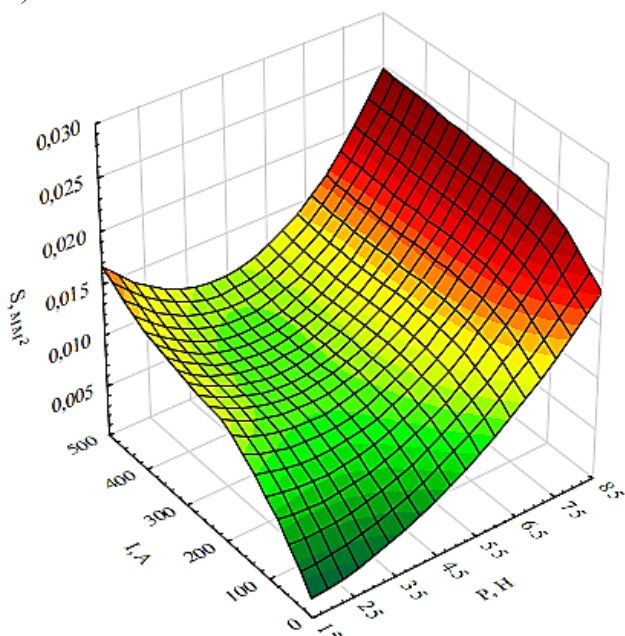
Поява іскріння та короткочасні дугоутворення при силі натиску до 45 Н обумовлені появою відривів струмознімального елемента від поверхні

контактного проводу.

При більших натисках, але при відсутності відривів струмознімального елемента від поверхні проводу та струмах 300 – 500 А також прослідковувалась поява іскріння. Поява цього явища викликана тим, що потужність втрат, яка виділяється в контактній точці, при великих струмах може перевищити граничну потужність, яка може розсіюватись в контактному містку для даного типу матеріалу. Відбувається руйнування контактної поверхні, а його матеріал випаровується і це проявляється в вигляді іскріння.

Для побудови тривимірних графіків, який описує зношення контактної поверхні та струмознімальних елементів використовувалась підгонка по точках тривимірної поверхні розсіювання. Такий підхід, дозволяє виявити приховану структуру даних і залежності між трьома змінними. Для згладжування поверхні та визначення нелінійних і немонотонних залежностей між змінними використовувався метод найменших квадратів.

а)



б)

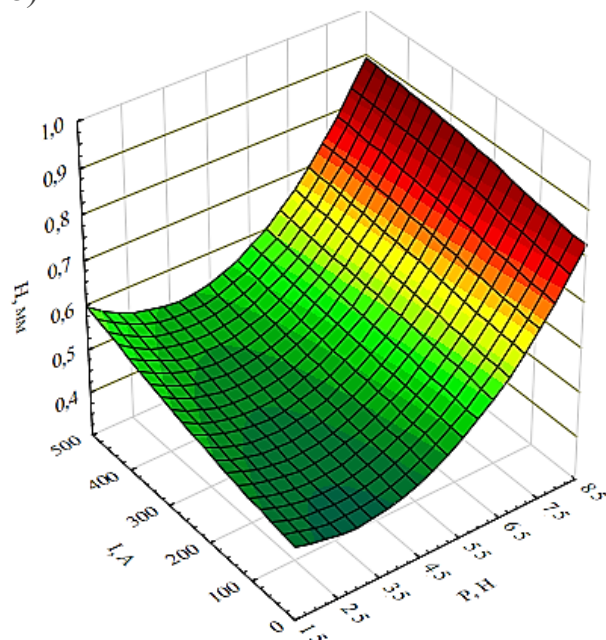


Рисунок 2.32 – Поверхня зміни зносу контактної поверхні (а) та струмознімальних елементів типу «А» (б) при зміні натиску та струму в контакті

Як можна побачити з рис. 2.32, зі збільшенням сили струму в контакті відбувається збільшення електричної складової зносу елементів пари тертя.

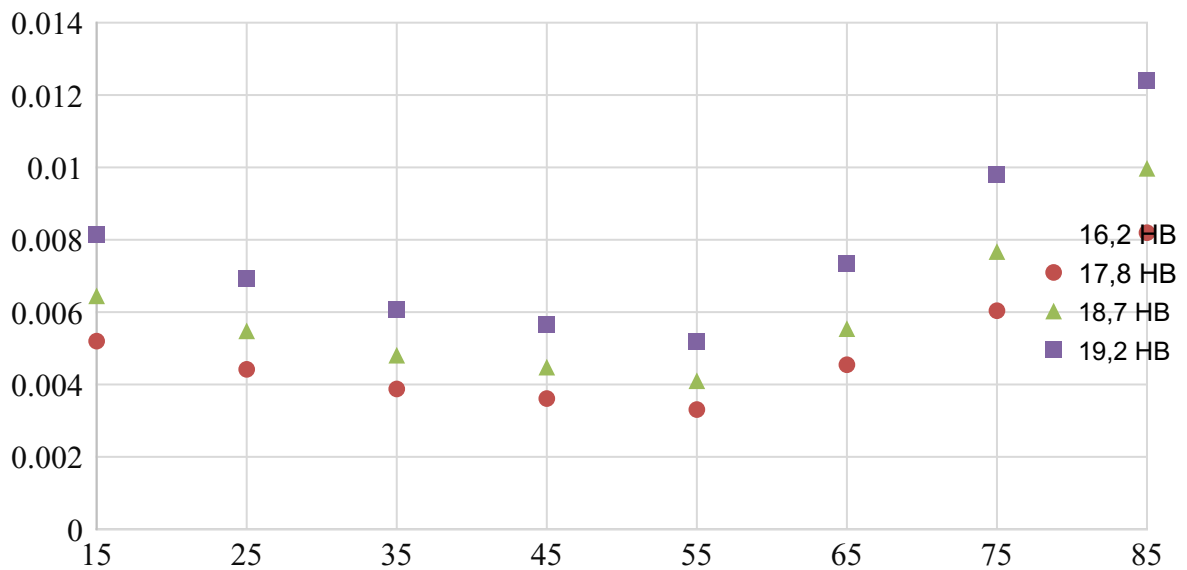


Рисунок 2.33– Криві зносу контактного проводу в залежності від сили натиску при струмознімальних вставках типу «Б» та силі струму 500 А

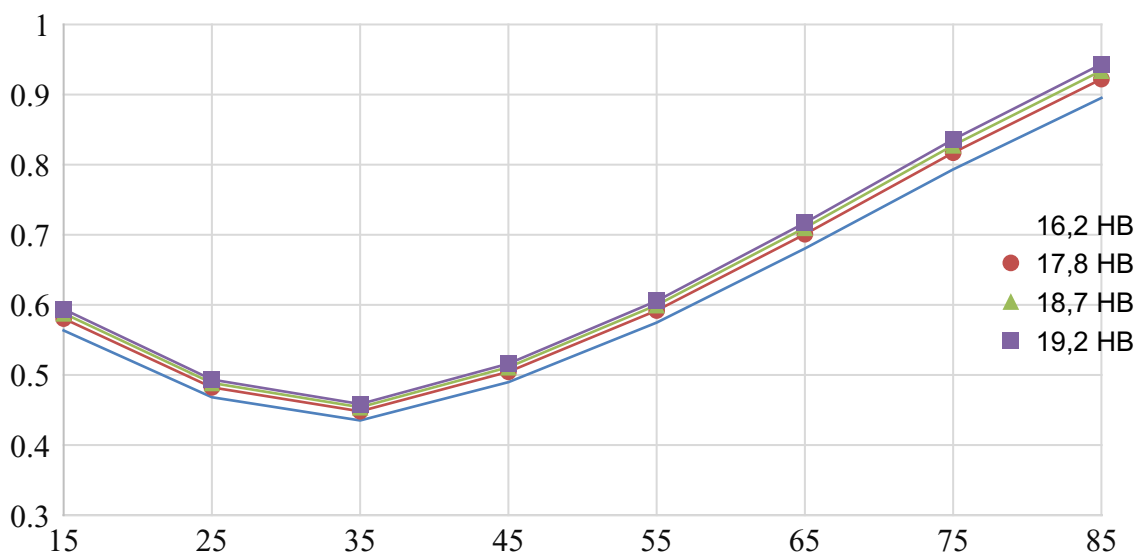
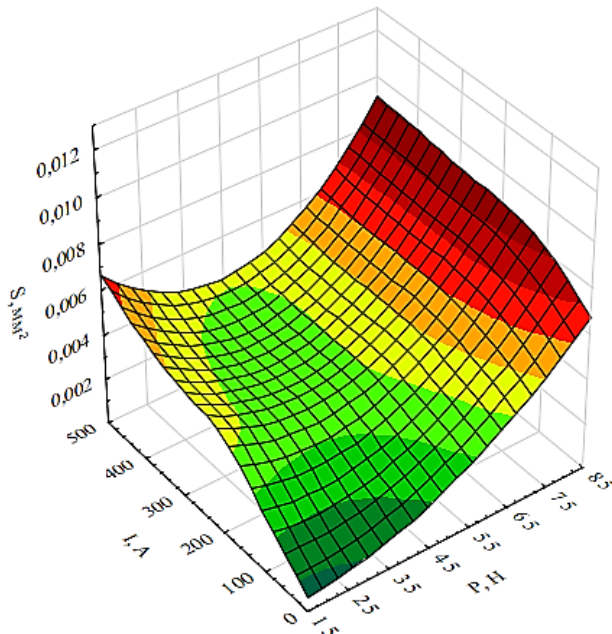


Рисунок 2.34– Криві зношування струмознімальних вставок типу «Б» в залежності від сили натиску та силі струму 500 А

При протікаючих через контакт струмах 300 – 500 А та недостатньому натиску різко проявляється електроерозійне зношування струмознімальних

елементів типу «А», а при підвищенні натиску превалює механічне зношування.

а)



б)

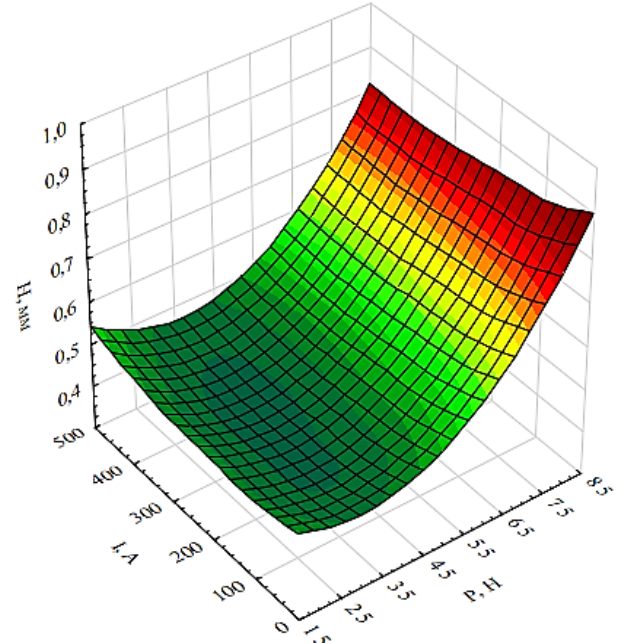


Рисунок 2.35 – Поверхня зміни зносу контактної проволу (а) та струмознімальних елементів типу «Б» (б) при зміні натиску та струму в контактї

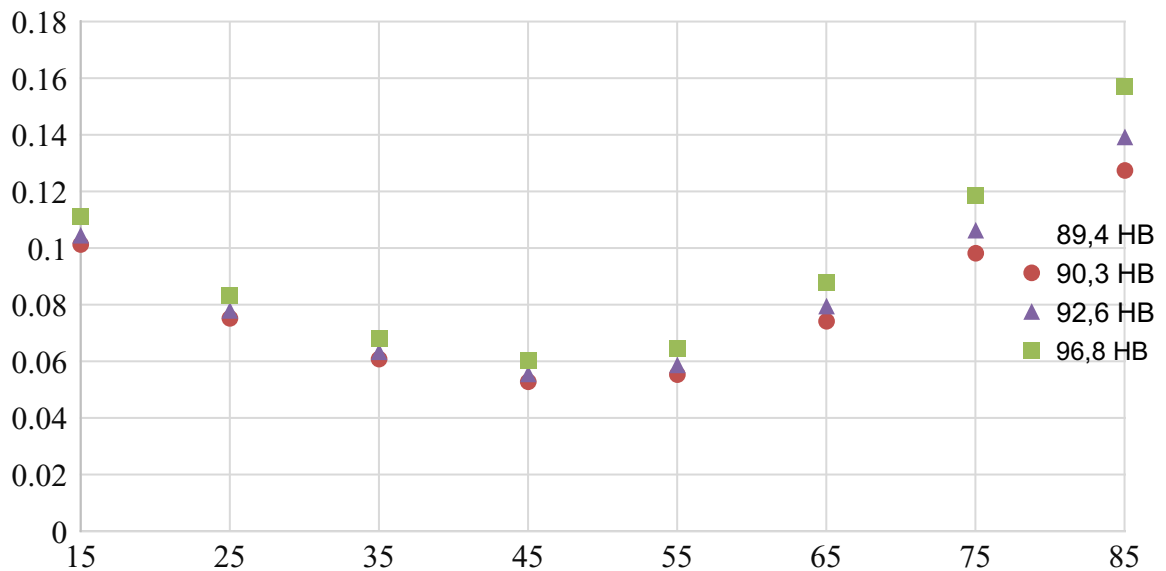


Рисунок 2.36 – Криві зношування контактної проволу в залежності від сили натиску при мідних пластинах та силї струму 500 А

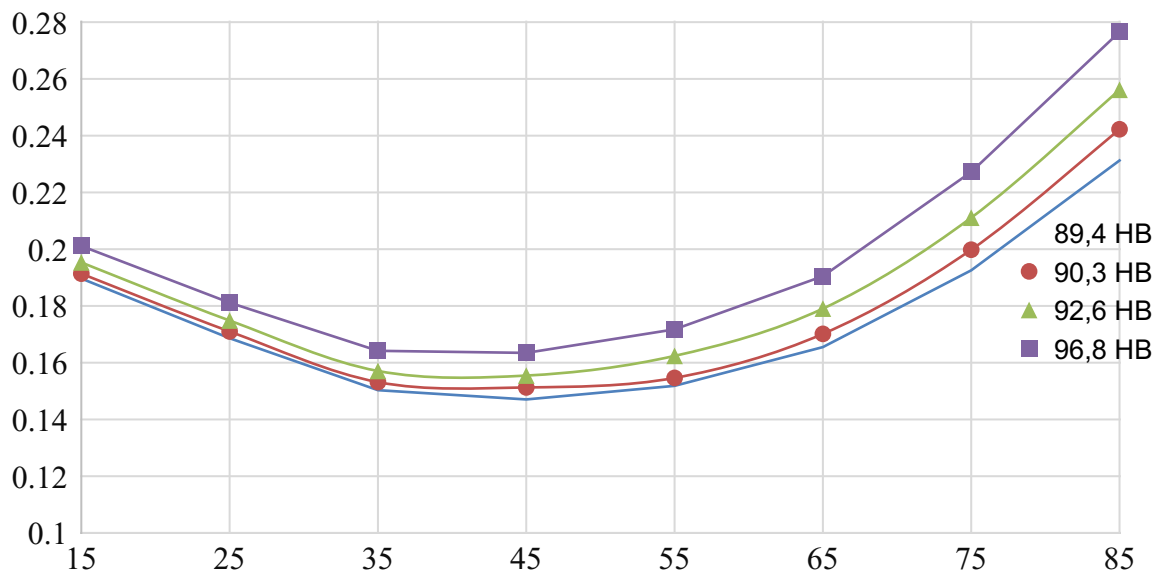
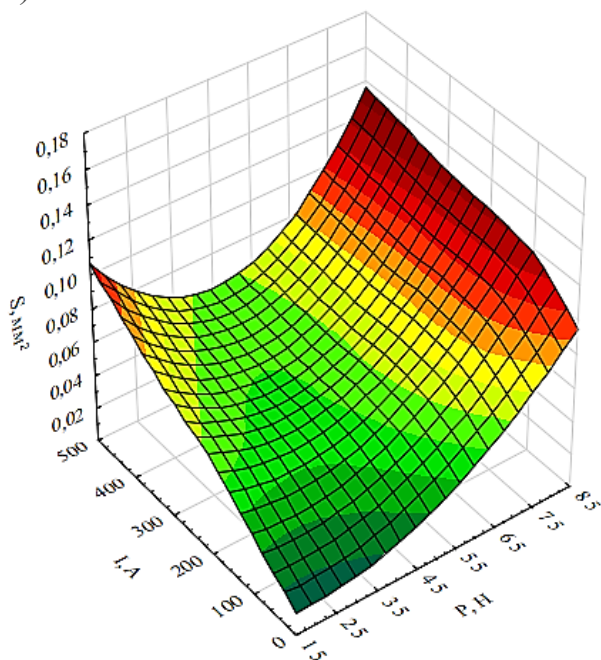


Рисунок 2.37– Криві зношування мідних пластин в залежності від сили натиску та сили струму 500 А

Аналіз отриманих залежностей показує, що для усіх типів струмознімальних елементів властивий однаковий характер зношування.

а)



б)

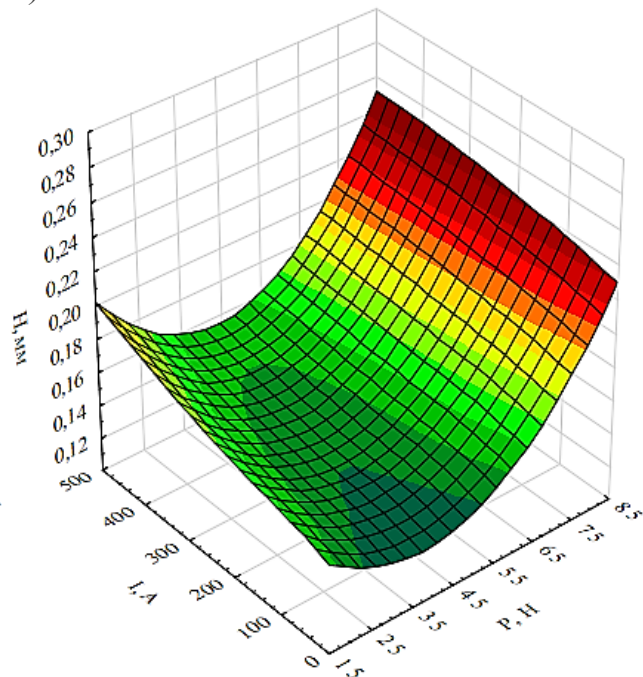


Рисунок 2.38 – Поверхня зміни зносу контактної проволки (а) та мідних пластин (б) при зміні натиску та струму в контакті

Взаємодія струмознімальних вставок типу «А» та типу «Б» з контактним проводом створює на поверхні його тертя блискучу політуру графітового кольору (рис. 2.39, а), а при появі вологи в контакті політура зникає (рис. 2.39, б), не дивлячись на це, інтенсивність зношування контактного проводу не збільшується.

При взаємодії контактного проводу з мідними пластинами в процесі тертя без змащування з'являються задири, схоплювання поверхонь і, як результат контактний провід набагато інтенсивніше зношується (рис. 2.39, в) [119].

Результати зношування контактних проводів в парі з мідними пластинами свідчать про їх трибонесумісність [119]. Поява схоплень, котру можна зрівняти зі зварюванням контактних виступів, при повній відсутності змазки та плівок окислів залежить від сили натиску в контакті, температури поверхневих шарів та властивостей матеріалу.

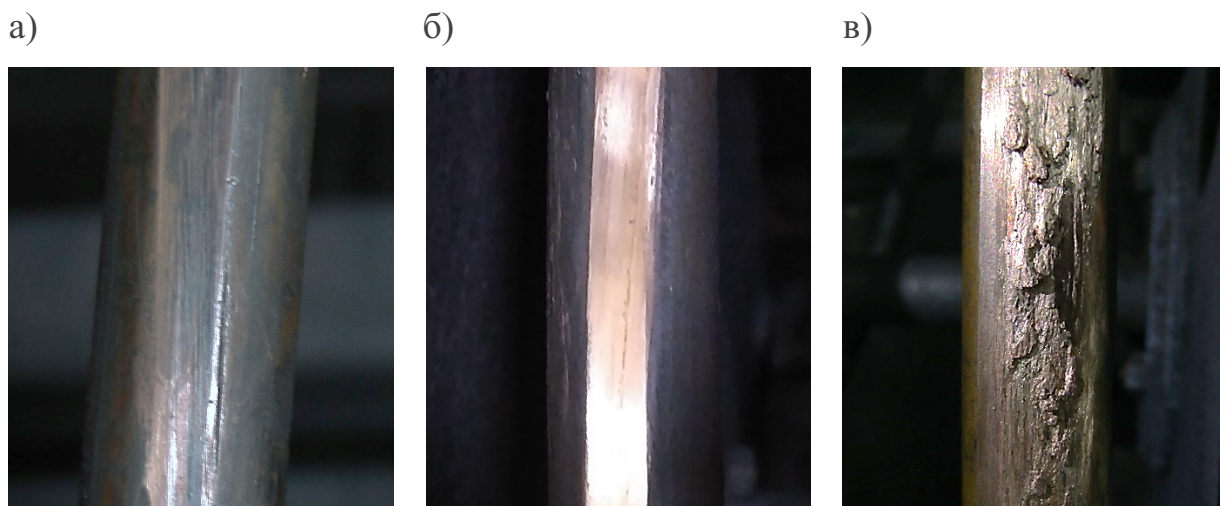


Рисунок 2.39 – Поверхня тертя контактного проводу:

а) після взаємодії з графітовими вставками при сухому терті; б) після взаємодії з графітовими вставками та з подачею вологи в контакт; в) після взаємодії з мідними пластинами

Сумісна робота на одному контактному проводі мідних пластин та графітових вставок призводить до підвищеного (в 6 разів) зношування останніх (рис. 2.40).

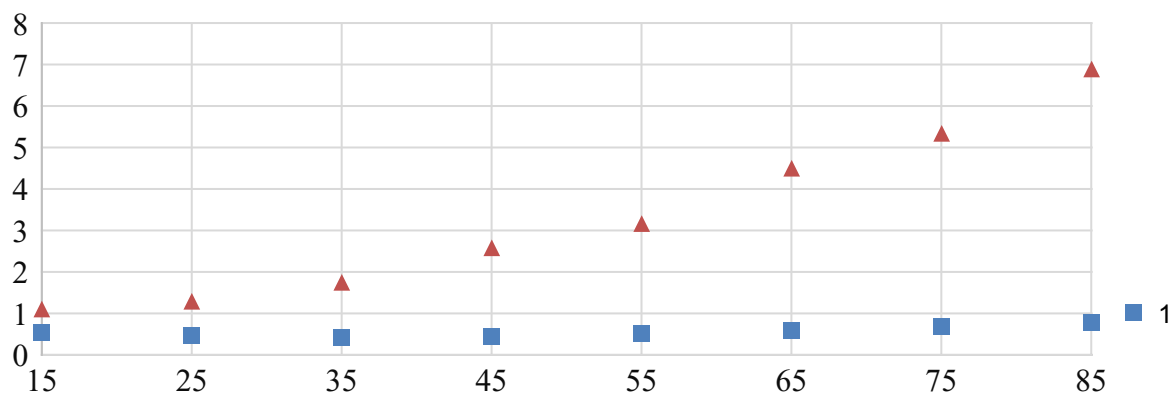


Рисунок 2.40 – Криві зношування струмознімальної вставки типу «Б»:

1 – до взаємодії контактного проводу з мідною пластиною; 2 – після взаємодії з мідною пластиною

Результати досліджень [6, 9] підтверджують отримані результати і свідчать про неможливість використання на одних ділянках мідних пластин та графітових вставок – це призводить до різкого скорочення фактичного ресурсу останніх та інтенсивного зношування контактного проводу через постійне протікання процесу припрацювання поверхонь.

2.3.5 Дослідження інтенсивності зношування пар тертя при зміні вологості в зоні тертя

Подача вологи в ковзний контакт призводить до зникнення графітизації контактного проводу, однак його поверхня залишається відполірованою (див. рис. 2.39, б). Через це, при відсутності протікання струму через ковзний контакт, зношування контактного проводу дещо зменшується, подібне явище характерне тільки в тому випадку коли відбулося попереднє припрацювання поверхонь.

Результати дослідження зношування контактних проводів та струмознімальних елементів при різній вологості повітря, відсутності та

наявності струму в контакті приведені на рис. 2.41 – 2.46.

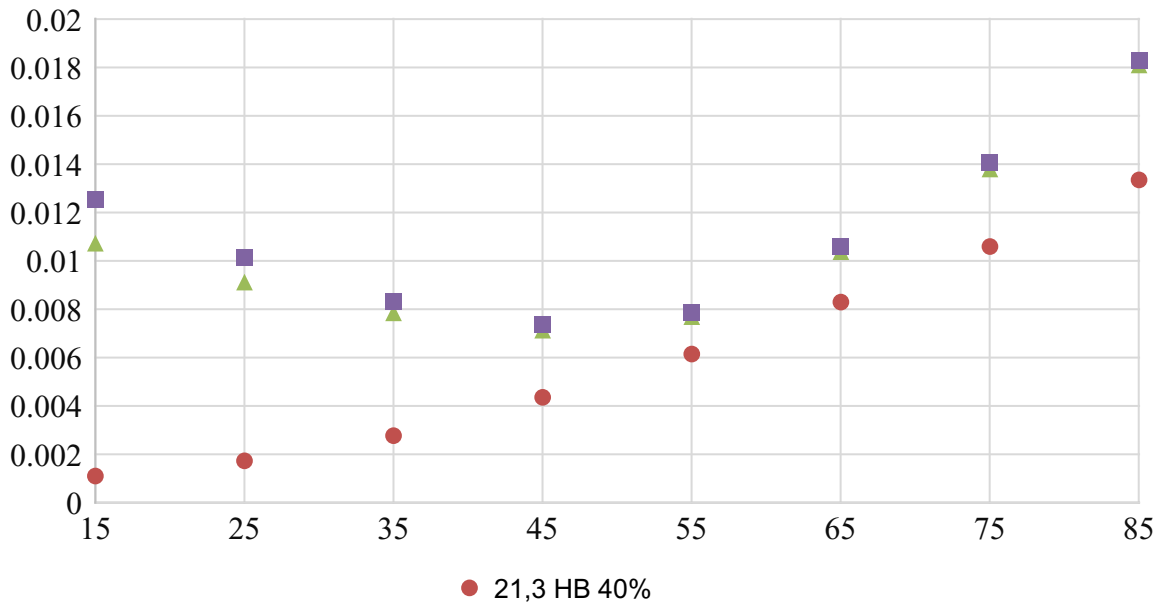


Рисунок 2.41 – Криві зношування контактного проводу при взаємодії зі вставками типу «А» та вологою і струмом в контакті

Також необхідно відмітити, що знос струмознімальних елементів при появі вологи в контакті дещо збільшується. Це характерно як для струмознімальних елементів типу «А» так і типу «Б».

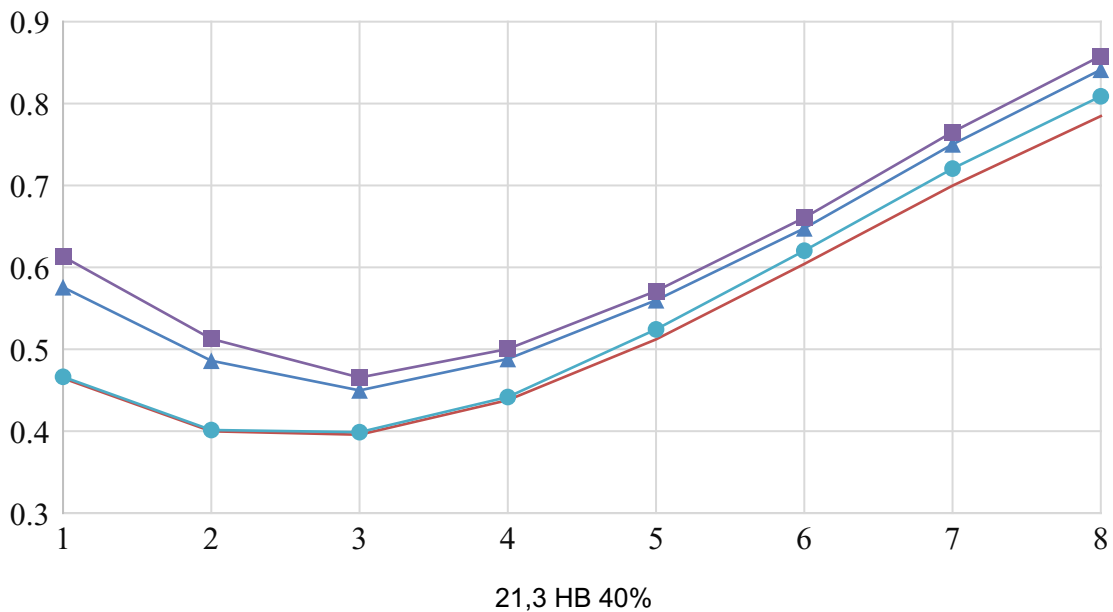


Рисунок 2.42 – Криві зношування струмознімальних вставок типу «А» при взаємодії з контактним проводом та вологою і струмом в контакті

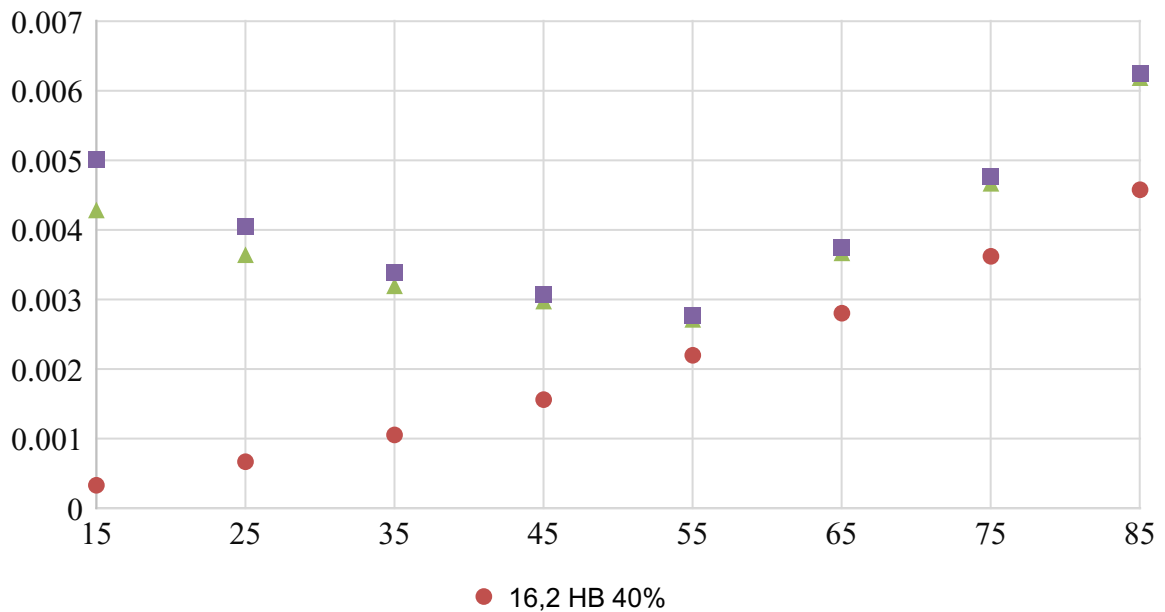


Рисунок 2.43 – Криві зношування контактної проводу при взаємодії зі вставками типу «Б» та вологою і струмом в контактї

Протікання струму через ковзний контакт різко збільшує зношування контактної проводу при низькому натиску, в цій зоні електроерозійне зношування контактної проводу превалює над механічним.

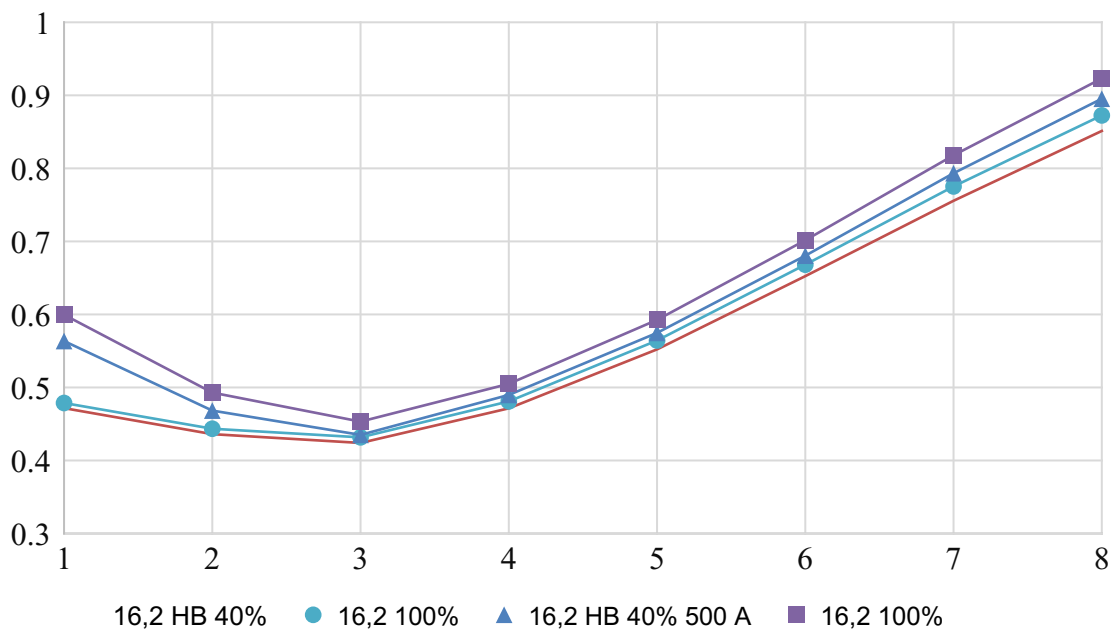


Рисунок 2.44 – Криві зношування струмознімальних вставок типу «Б» при взаємодії з контактним провідом та вологою і струмом в контактї

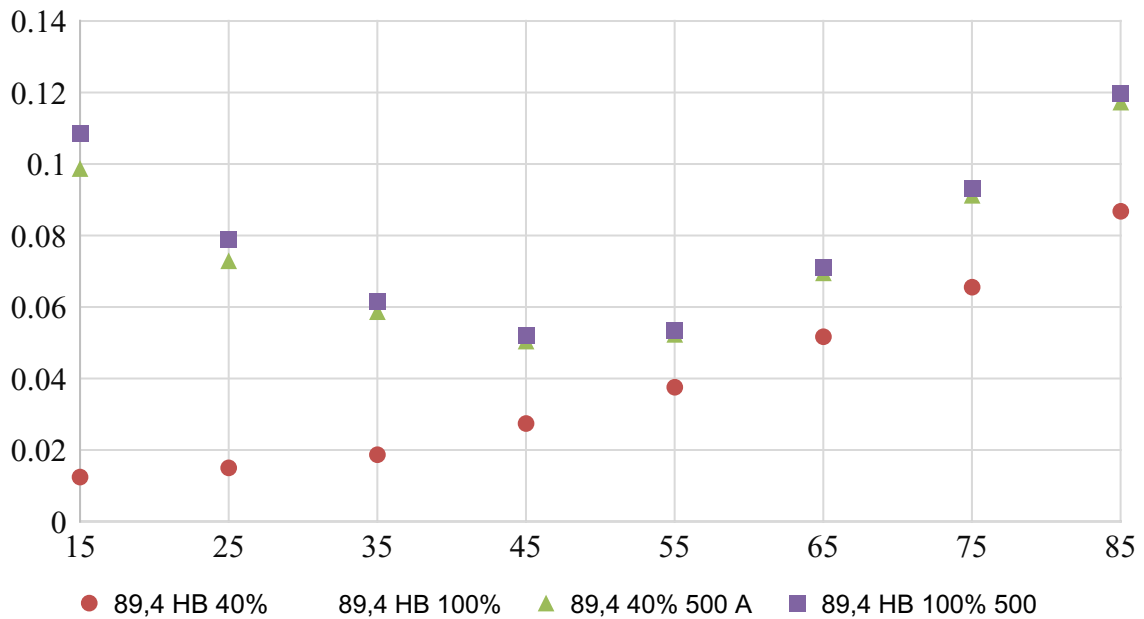


Рисунок 2.45– Криві зношування контактної провуду при взаємодії мідними пластинами та вологою і струмом в контактї

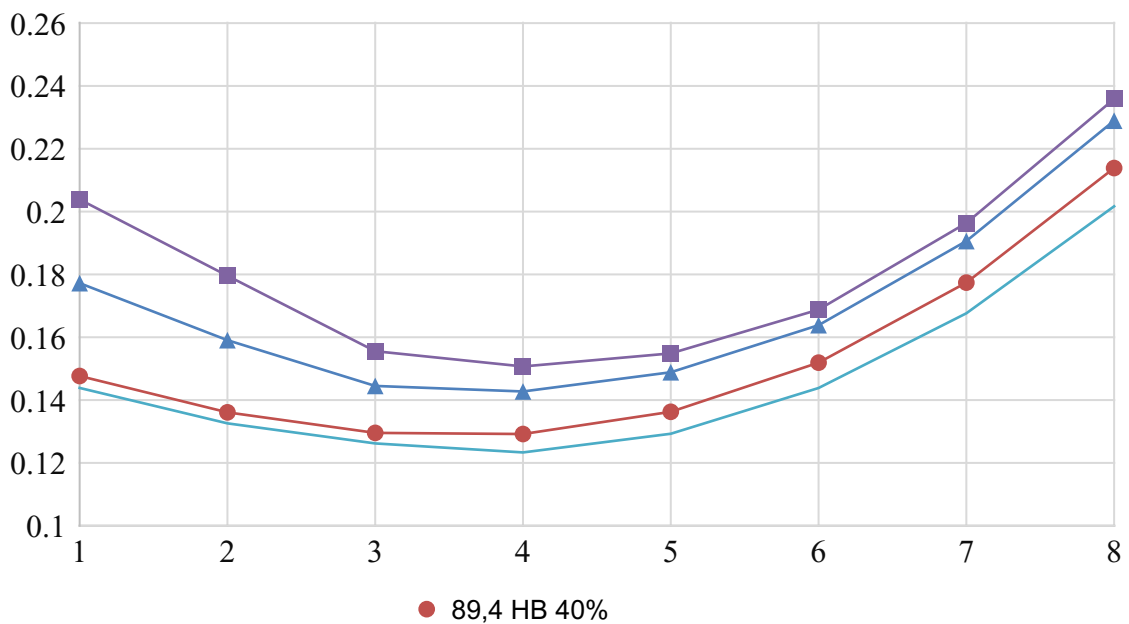


Рисунок 2.46– Криві зношування мідних пластин при взаємодії з контактним провудом та вологою і струмом в контактї

Як свідчить автор [1], на величину електричної ерозії елементів ковзного контакту значним чином впливає електродне середовище, так

розряд чи вибух контактної містки в рідині викликає в ній дуже сильні ударні хвилі і тим самим інтенсивно руйнує пару тертя. Стійкість матеріалу струмознімальних елементів до електричної ерозії визначається температурою його плавлення чи сублімації, цей параметр обумовлює високу дугостійкість вугільних вставок, чого не можна сказати про мідні пластини.

В ході проведених досліджень без протікання через елементи пари тертя струму та при вологості повітря 100% інтенсивність зношування контактних проводів, на відміну від вугільних струмознімальних елементів, дещо зменшувалась. При аналогічних умовах та з протіканням електричного струму в зоні контакту інтенсивність зношування як контактної проводу так і струмознімальних елементів значно збільшилась (див. рис. 2.41 – 2.46).

В реальних умовах експлуатації підвищення вологи навколишнього середовища супроводжується різким погіршенням якості струмознімання – з’являється інтенсивне іскріння, а при ожеледоутворенні і тривалих відривах електрична дуга, що призводить до різкого скорочення ресурсу струмознімальних елементів та пошкодження поверхні тертя контактної проводу, інколи до перепалів останнього.

В ході дослідження зношування пари «контактний провід – вуглецевмісна вставка» іскріння мало жовто-червоний колір (рис. 2.47, а, б), а при використанні мідних пластин в якості струмознімальних елементів – біло-блакитний (рис. 2.47, в), що свідчить про появу безконтактної електродугової ерозії як проводу так і мідних пластин. По довжині контактної проводу з’являлися характерні сліди підпалів.

а)



б)



в)



Рисунок 2.47 – Іскріння в зоні контакту при протіканні струму 500 А:

- а) вставка типу «А» – жовто-червоне іскріння; б) вставка типу «Б» – жовто-червоне іскріння; в) мідна пластина – біло-блакитне іскріння

Приведені результати свідчать, що величина зношування контактного проводу при взаємодії з мідними струмознімальними пластинами на порядок більше ніж з вугільними, що викликано несумісністю роботи пари «мідь – мідь». Найменший рівень зношування контактного проводу отримано при використанні графітових вставок типу «Б».

Аналіз приведених залежностей показує, що для всіх типів досліджуваних матеріалів прослідковується збільшення зношування при підвищенні рівня відносної вологості в контакті.

При подачі вологи в контакт з протіканням струму суттєво пришвидшуються корозійні процеси на поверхні контактного проводу, поява в точці контакту плівки вологи збільшує контактний опір «контактний провід – струмознімальний елемент» шляхом зменшення кількості електропровідних плям в точці контакту, відповідно підвищується електроерозійне зношування контактуючих поверхонь.

Результати експериментальних досліджень на зношування струмознімальних елементів типу «А», «Б» та мідних накладок приведено в табличному вигляді в додатках Б – Г.

Висновки до розділу 2

1. Проведений аналіз нормативної документації на струмознімальні елементи свідчить про занадто широкий розкид мінімального і максимального значення твердості для вуглецевих струмознімальних елементів. Для вставок типу «А» він становить 30%, а для вставок типу «Б» 37%.

Обґрунтований негативний вплив розкиду основних фізико-механічних параметрів вугільних струмознімальних елементів на інтенсивність

зношування пар тертя струмоznімання в умовах експлуатації. Встановлено, що їх вплив при однакових умовах взаємодії елементів сильнострумового контакту неоднаковий.

Розроблені рекомендації щодо зменшення впливу перехідного опору «вставка – полоз» на величину втрат електричної енергії при струмоznіманні.

2. Під час експериментальних досліджень встановлений статистичний взаємозв'язок, описаний аналітичним виразом лінійної регресії, між твердістю та питомим електричним опором вуглецевих струмоznімальних елементів з врахуванням їх конструктивних особливостей, при більш точному співвідношенні вимірюваних величин та з врахуванням вимог щодо приймання їх в експлуатацію.

3. Результати повного факторного експерименту проведеного на даних, отриманих експериментальним шляхом, чисельно підтверджують важливість врахування на процес зносу сильнострумової пари тертя «контактний провід – струмоznімальний елемент» таких факторів як: сила натиску, сила струму в контакті, твердість струмоznімальних елементів та вологість навколишнього середовища. Основним впливаючим фактором на процес зносу контактних проводів та струмоznімальних елементів можна вважати натиск струмоприймача.

4. Розроблена експериментальна установка для дослідження процесу струмоznімання дозволяє, в умовах, наближених до експлуатаційних, проводити порівняльні дослідження на зношування різних типів струмоznімальних елементів та контактних проводів.

Розроблено методики для визначення параметрів струмоznімальних елементів та проведення експериментальних досліджень на зношування пар тертя струмоznімання.

5. На основі експериментальних досліджень зношування елементів пари тертя сильнострумового контакту отримані залежності зносу контактного проводу та струмоznімальних елементів від сукупності впливаючих факторів.

При подачі вологи в контакт з протіканням струму суттєво пришвидшуються корозійні процеси на поверхні контактного проводу, поява в точці контакту плівки вологи збільшує контактний опір «контактний провід – струмознімальний елемент» шляхом зменшення кількості електропровідних плям в точці контакту, відповідно підвищується електроерозійне зношування контактуючих поверхонь.

Встановлені оптимальні умови взаємодії елементів пари тертя струмознімання, збільшення інтенсивності зносу яких в області зменшеного натиску обумовлюється електричною складовою зносу, а в області збільшеного натиску – механічною.

Досягти найвищої економічності та надійності струмознімання можливо шляхом стабілізації динамічних параметрів взаємодіючих в процесі струмознімання систем, а також забезпечивши відповідність параметрів струмознімальних елементів конкретним експлуатаційним умовам.

6. Отримані результати зношування пар тертя свідчать про трибонесумісність мідних струмознімальних пластин (в режимі роботи без додаткового змащування) з мідними контактними проводами – при їх взаємодії на поверхні тертя контактного проводу з'являються задири, схоплювання. Експлуатація на одних ділянках мідних пластин і графітових струмознімальних вставок призводить до підвищеного (до 6 разів) зношування останніх.

Отримані в третьому розділі результати експериментальних досліджень параметрів та процесу зношування ковзного сильнострумового контакту опубліковано в роботах [35, 51, 97, 108, 119].

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОГО АПАРАТУ ПРОГНОЗУВАННЯ ЗНОШУВАННЯ ПАР ТЕРТЯ ПРИ СТРУМОЗНІМАННІ

Одним з перспективних напрямків зменшення матеріальних витрат та витрат часу на проведення експериментальних досліджень є розробка прогнозних математичних моделей [120], які використовують набори отриманих при стендових випробуваннях характеристик для прогнозування цільових значень [121]. Такою моделлю є штучна нейронна мережа, що представляє собою сучасний, гнучкий і ефективний інструмент, призначений для інтелектуального аналізу залежностей в складних системах [122]. Найбільш важливою перевагою нейронних мереж є здатність до самонавчання, ця властивість дозволяє нейронним мережам вирішувати складні та масштабні завдання. Але самі по собі нейронні мережі не можуть забезпечити готове рішення, їх необхідно інтегрувати в складні інтелектуальні системи.

Нейронні мережі володіють рядом суттєвих переваг перед класичними методами:

- Використовуючи здатність навчання на безлічі прикладів, нейронна мережа здатна вирішувати завдання, в яких невідомі закономірності розвитку ситуації і залежності між вхідними та вихідними даними. Традиційні математичні методи та експертні системи в таких випадках пасують.

- Можливість роботи при наявності великого числа неінформативних, шумових вхідних сигналів. Немає необхідності робити їх попередній відсів, нейронна мережа сама визначить їх малоприслужними для вирішення завдання і відкине їх.

- Нейронні мережі володіють надвисокою швидкістю обробки інформації за рахунок використання паралелізму обробки інформації.

- Висока відмовостійкість, яка не знижується при несприятливих умовах, наприклад якщо пошкоджений якийсь нейрон.

3.1 Аспекти створення прогнозних нейромережових моделей

Штучні нейронні мережі представляють собою технологію, яка пов'язана з математикою, фізикою, комп'ютерними науками та технікою. Вони знаходять застосування в моделюванні, аналізі часових рядів, розпізнаванні образів, обробленні сигналів та керуванні технічними системами, за рахунок однієї важливої властивості – спроможності навчатися на основі даних при участі вчителя чи без його втручання [123].

Історія нейромережових алгоритмів черпає свій початок з моменту висунування ідеї про те, що нейрон є структурною одиницею мозку людини, яку висунув Рамон-Кайал [124]. Надалі Розенблатт формулює модель нейрону та обумовлює можливість його навчання [125].

Початковим етапом створення математичного базису нейромережової теорії необхідно рахувати роботи виконані Стоуном [126], Колмогоровим [127] та Арнольдом [128]. Основний результат, який отриманий в даному циклі робіт, полягає в тому, що кожна безперервна функція n змінних задана на одиничному кубі n -мірного простору і представляється в вигляді:

(3.1)

де функція f безперервна, а функція g залежить від вибору функції σ .

Вираз (4.1) по відношенню до теорії нейронних мереж можна трактувати як твердження про універсальність апроксимаційних властивостей будь-якої нелінійності: за допомогою лінійних операцій та каскадного з'єднання можна з довільних нелінійних елементів отримати будь-який необхідний результат з попередньо заданою точністю [126, 129].

Появі сучасного інтересу до розв'язання прикладних задач за допомогою нейромережових концепцій сприяла розробка Румелхартом, Хінтоном та Вільямсом нового алгоритму навчання багат шарових нейронних мереж, який отримав назву алгоритму зворотнього поширення [130].

Вирішальне значення для затвердження методики зворотнього розповсюдження в якості найбільш популярної процедури навчання багат шарового перцептронну зіграло видання праці Румелхарта та МакКлелланда [131]

Проблема стійкості рекурентних нейронних мереж тривалий час являлась предметом інтенсивного дослідження і була вирішена Коеном та Гроссбергом [132]. В цій роботі їм вдалося сформулювати та довести теорему, що визначила клас нейронних мереж зі зворотними зв'язками, виходи яких досягають в динамічному процесі стійкого стану. Подібні результати були також отримані Хопфілдом в роботах [133], в яких представлені розроблені нейронні мережі даного класу. Ці відкриття поклали основу подальших досліджень поведінки та можливостей цих нейронних мереж.

В роботах сучасників [134–146] розглядаються основні парадигми штучних нейронних мереж, представлене математичне обґрунтування всіх нейромережових парадигм, проаналізована роль нейронних мереж при вирішенні задач розпізнавання образів, управління і обробки сигналів.

Аналіз приведених робіт показує, що нейромережовий підхід має переваги перед традиційними математичними методами: по-перше, коли розглядувана задача в силу конкретних особливостей не піддається адекватній формалізації, через те, що містить елементи невизначеності, які не формалізуються традиційними математичними методами. По-друге, коли розглядувана задача може формалізуватися, але відсутній апарат для її рішення. По-третє, коли для розглядуваної, добре формалізованої задачі існує відповідний математичний апарат, але реалізація розрахунків за його допомогою на базі розрахункових систем не відповідає вимогам отримання

рішень. В подібних ситуаціях використання нейромережевого підходу дозволяє забезпечити необхідну якість вирішення задачі без погіршення точності результату.

Нейронна мережа представляє собою розподілений паралельний процесор, який складається з елементарних одиниць обробки інформації, які акумулюють експериментальні знання та представляють їх для наступної обробки, такі елементарні одиниці називають нейронами.

Нейрон являється з'єднаною частиною нейронної мережі, його структура приведена на рис. 3.1. Він складається з таких елементів: помножувачів (синапсів), суматора та нелінійного перетворювача.

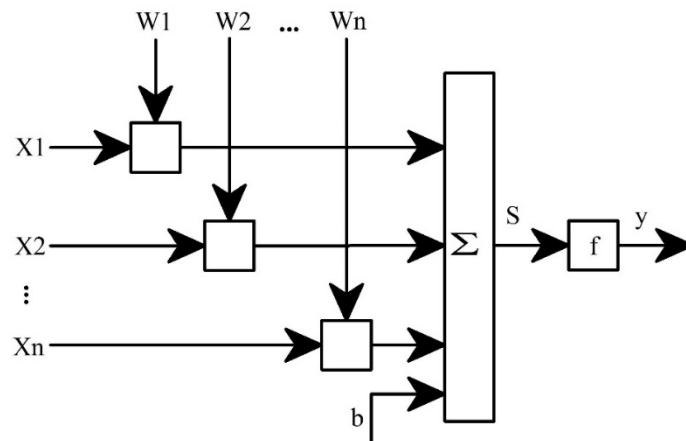


Рисунок 3.1 – Структура нейрона

Синапси забезпечують зв'язок між нейронами, перемножують вхідний сигнал на число, яке характеризує силу зв'язку (вагу синапсу). Суматор виконує складування сигналів, які поступають синаптичними зв'язками від інших нейронів та зворотних вхідних синапсів.

Нелінійний перетворювач реалізує нелінійну функцію одного аргументу – виходу суматора. Ця функція називається функцією активації чи передаточною функцією нейрону.

В загальному випадку нейрон реалізує скалярну функцію векторного аргументу. Математична модель нейрону має вигляд:

(3.2)

(3.3)

- де w_{ij} – вага синапсу, $i=1 \dots n$;
 x_i – значення зміщення;
 z – результат сумування;
 x_i – компонент вхідного вектору, $i=1 \dots n$;
 y – вихідний сигнал нейрона;
 n – число входів нейрону;
 f – нелінійне перетворення (функція активації).

В загальному випадку вхідний сигнал, вагові коефіцієнти та зміщення можуть приймати дійсне значення, а в багатьох практичних задачах – тільки деякі фіксовані значення.

Вихід визначається видом функції активації та може бути як дійсним так і цілим. Статистичні зв'язки з позитивними вагами називають збуджуючими, а з негативними – гальмуючими.

Приведений розрахунковий елемент можна рахувати спрощеною математичної моделлю біологічних нейронів.

На вхідний сигнал нелінійний перетворювач відповідає вихідним сигналом y , який представляє собою вихід нейрону.

Нейронна мережа представляє собою сукупність нейронів, які певним чином з'єднані один з одним і з зовнішнім середовищем за допомогою зв'язків, що визначаються ваговими коефіцієнтами в залежності від функцій, які виконуються нейронами в мережі. Можна виділити три типи нейронів:

- вхідні нейрони, на які подається вектор, кодуєчий вплив чи образ зовнішнього середовища (в них в загальному випадку не відбуваються

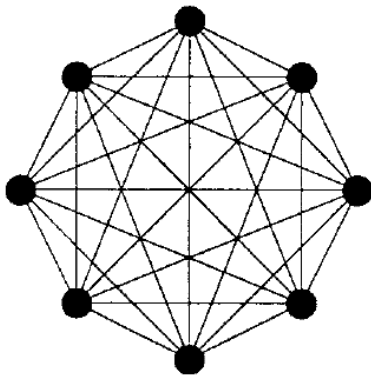
розрахункові процедури, а інформація передається зі входу на вихід шляхом зміни їх активації);

- вихідні нейрони, вхідні значення яких представляють виходи нейронної мережі, перетворення в них відбуваються за виразом (3.2) та (3.3);
- проміжні нейрони, складають основу нейронних мереж перетворення в них також відбуваються за виразом (3.2) та (3.3);

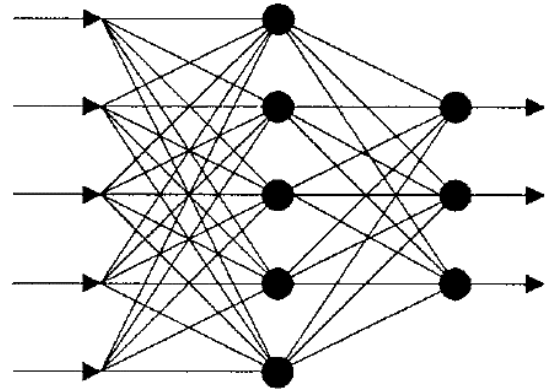
З точки зору топології можна виділити три основні типи нейронних мереж:

- одношарові мережі прямого розповсюдження (рис. 3.2, а);
- багатшарові мережі прямого розповсюдження (рис. 3.2, б);
- рекурентні мережі (з локальними зв'язками) (рис. 4.3, в, г).

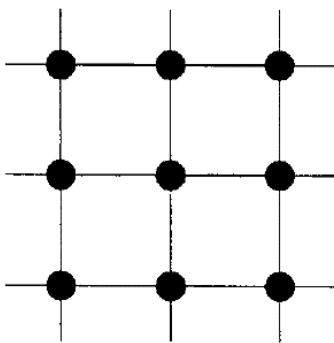
а)



б)



в)



г)

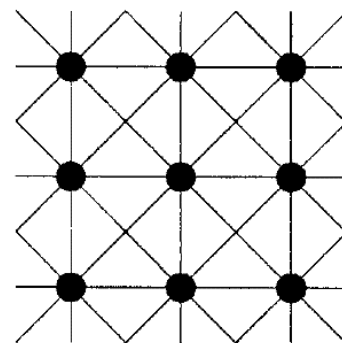


Рисунок 3.2 – Типи нейронних мереж:

- а) одношарова мережа прямого розповсюдження; б) багатшарова мережа прямого розповсюдження; в, г) рекурентні мережі з локальними зв'язками

В процесі функціонування мережі відбувається перетворення вхідного вектору в вихідний. Конкретний вигляд виконуваного мережею перетворення

даних обумовлюється не тільки характеристикою нейроподібних елементів, але і особливостями її архітектури, а саме топологією міжнейронних зв'язків, вибором визначених підмножин нейроподібних елементів для вводу та виводу інформації, способами навчання мережі, наявністю чи відсутністю конкуренції між нейронами, напрямками та способами керування та синхронізації передачі інформації між нейронами.

Найголовнішою перевагою нейронних мереж є здатність самонавчання, яка дозволяє нейронним мережам вирішувати масштабні та складні задачі. Але на практиці, сама по собі нейронна мережа неспроможна забезпечувати готові рішення – її необхідно інтегрувати в складні системи.

Нейронні мережі володіють такими корисними властивостями [123]:

- нелінійність;
- відображення вхідної інформації у вихідну;
- адаптивність;
- очевидність відповіді;
- контекстна інформація;
- стійкість до відмов.

Архітектура нейронних мереж тісно пов'язана з використовуваними алгоритмами навчання.

Найважливішою властивістю нейронних мереж є їх здатність до навчання на основі вхідних даних, що дозволяє підвищувати продуктивність мережі.

Навчанням нейронної мережі називають процес, при якому вільні параметри нейронної мережі налаштовуються шляхом моделювання середовища, в яку ця мережа вбудовується.

Як вже було вказано, основною корисною властивістю нейронної мережі є можливість навчання з вчителем. На рис. 3.3 представлена схема, яка характеризує цю форму навчання.

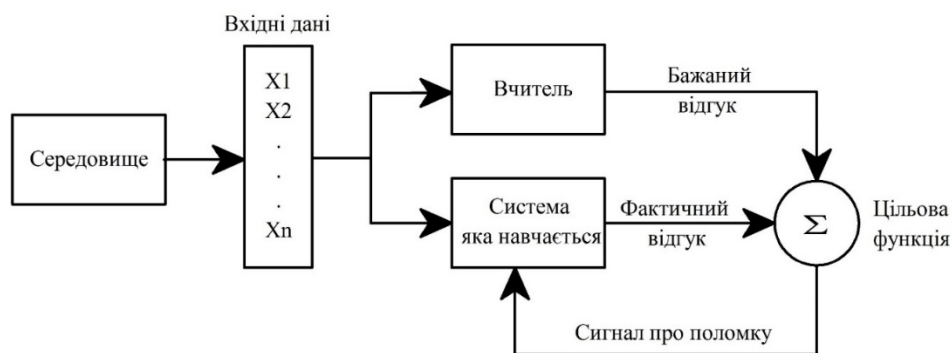


Рисунок 3.3 – Процес навчання

Участь вчителя представляє собою знання про досліджуване середовище чи процес, яке виражене в наборі вхідних та вихідних даних, при цьому, сама нейронна мережа не має ніякої інформації відносно досліджуваного процесу. Вчитель виконує роль керуючого апарату під час навчання мережі, в тому випадку коли від зовнішнього середовища поступає інформація до нейронної мережі, що навчається, модель продукує вихідні дані. Якщо значення цих даних відрізняється на величину заданої похибки від бажаного цільового значення, в нейронну мережу надсилається сигнал про помилку, так поетапно відбувається навчання з учителем.

Приведений опис навчання є нічим іншим, як навчання на основі продукованих нейронною мережею похибок. Це замкнута мережа зі зворотними зв'язками, що не включає в себе досліджуваний процес.

Продуктивність таких мереж можна оцінювати за середньоквадратичною похибкою чи сумою квадратів похибок на навчальній вибірці [123].

Для представлених задач моделювання процесів зношування краще всього підходять багат шарові мережі прямого розповсюдження, а саме багат шаровий персептрон.

Такі мережі мають три відмінні риси:

- кожен нейрон мережі має нелінійну функцію активації (логістична, експоненціальна, синусоїдальна, тотожна, гіперболічна);

- мережа має один або декілька шарів схованих нейронів, які не являються ні частиною входу ні частиною виходу мережі;
- мережа володіє високим ступенем зв'язності.

На рис. 3.4 приведений структурний граф багатозарового перцептронну з двома схованими шарами та одним вхідним шаром [123].

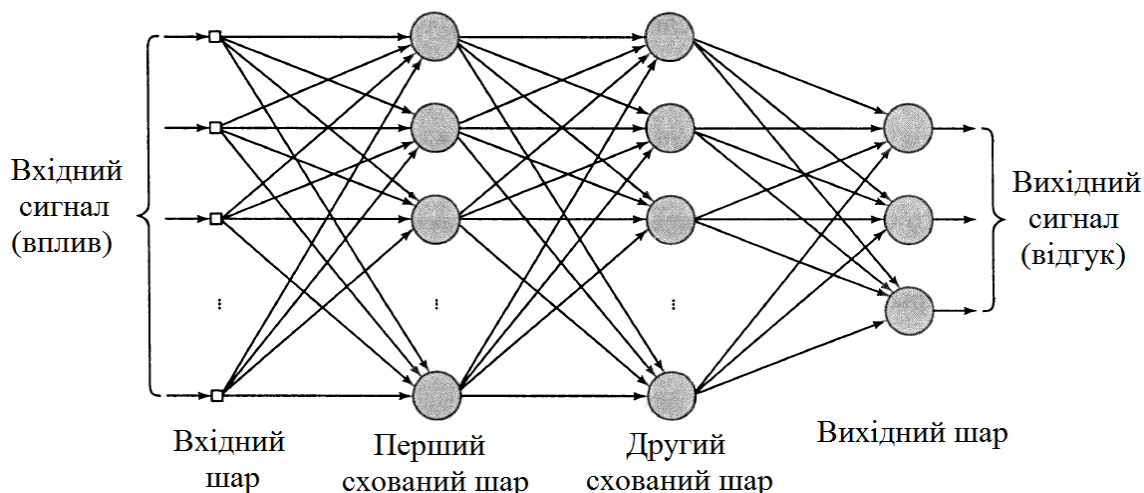


Рисунок 3.4 Структурний граф багатозарового перцептронну

Приведена схема являється повнозв'язною, що характерно для багатозарового перцептронну загального вигляду. Сигнал передається мережею виключно в прямому напрямку – зліва на право, від шару до шару.

Сховані нейрони грають значну роль в роботі багатозарового перцептронну, який навчається методом зворотного поширення [130, 147], в зв'язку з тим, що вони виступають в ролі детекторів ознак. В ході навчання сховані нейрони постійно виявляють характерні риси даних навчання.

Метод зворотного поширення похибки являється специфічною реалізацією методу градієнтного спуску в багатозарових мережах прямого поширення [147]. При навчання методом зворотного поширення до мережі подається навчальна вибірка та відбувається розрахунок синаптичних ваг багатозарового перцептронну. При цьому, вважається, що мережа володіє високою узагальнюючою властивістю, якщо відображення результату на виході моделі, при подачі на вхід даних які мережа «не бачила», є

адекватним.

Процес навчання нейронної мережі можна розглядати як задачу апроксимації кривої. Сама нейронна мережа при цьому виступає як один нелінійний оператор [148]. Мережа забезпечує коректну інтерполяцію в основному за рахунок того, що безперервність окремих функцій активації багатошарового перцептрону забезпечує безперервність загальної вихідної функції.

Нейронна мережа, яка спроектована з врахуванням гарного узагальнення, буде створювати коректне відображення входу, навіть в тому випадку, коли вхідний сигнал трохи відрізняється від прикладів, що використовувались для її навчання. Але, якщо мережа навчається на дуже великій вибірці, може відбутися надлишкове навчання. При подібній ситуації відображення втрачає свою гладкість через те, шум сприймається як основні дані. Гладкість відображення входу на вихід безпосередньо зв'язана з критерієм моделювання, який отримав назву бритви Оккама. Сутність цього критерія полягає в виборі найпростішої функції при відсутності будь-яких додаткових апріорних знань. Таким чином, для погано обумовлених відношень важливо шукати гладке нелінійне відображення [149].

Властивість до узагальнення визначається трьома факторами: розміром навчаючої вибірки, архітектурою нейронної мережі та фізичною складністю розглядуваної задачі. Питання узагальнення можна розглядати з двох різних точок зору [123, 150]:

- архітектура нейронної мережі фіксована і задача зводиться до визначення розміру навчаючої вибірки, що необхідна для гарного узагальнення;

- розмір навчаючої вибірки фіксований і задача зводиться до визначення найкращої архітектури мережі, яка дозволяє досягнути гарного узагальнення.

Багатошаровий перцептрон, який навчається відповідно алгоритму зворотнього розповсюдження, можна розглядати як практичний механізм

реалізації нелінійного відображення «вхід – вихід» загального виду. Але в такому випадку з'являється питання визначення мінімальної кількості схованих шарів багатошарового перцептронну, які забезпечать якісну апроксимацію деякого безперервного відображення. Для вирішення якого можна використати теорему про універсальність апроксимації, яку в свою чергу можна розглядати як розширення теореми Вейерштрасса [148]. Ця теорема стверджує про те, що будь-яка безперервна функція в замкнутому інтервалі дійсної осі може бути представлена рядом поліномів, які абсолютно та рівномірно сходяться.

Сутність навчання методом зворотнього розповсюдження полягає в кодуванні відображення входу на вихід в синаптичних вагах та порогових значеннях багатошарового перцептронну. Передбачається, що на попередніх прикладах мережа навчена настільки добре, що може узагальнити їх на майбутнє. З такої точки зору процес навчання забезпечує налаштування параметрів мережі для заданої множини даних. Проблему налаштування мережі можна розглядати як задачу вибору найкращої моделі з множини мереж-кандидатів з врахуванням певного критерія.

Основою для рішення такої задачі може стати стандартний статистичний підхід, який отримав назву перехресної перевірки [151]. В рамках цього підходу, данні спочатку розбиваються випадковим чином на навчальну підмножину та тестову підмножину. Ідея такого підходу полягає в перевірці якості моделі на даних, що відрізняються від тих на яких вона навчалася.

Таким чином, тестову підмножину можна використовувати для перевірки ефективності роботи мереж-кандидатів.

Подібна перевірка дуже ефективна, якщо необхідно створити нейромережу, яка володіє гарною здатністю до узагальнення та знаходження найбільш підходящої архітектури нейронної мережі.

3.2 Алгоритм вибору якісних нейронних мереж

Принцип вибору кращої нейромережевої моделі на основі перехресної перевірки аналогічна методології мінімізації структурного ризику [123]. Розглянемо наступну структуру класів булевих функцій:

(3.4)

Мається на увазі, що \mathcal{F}_k -й клас функцій охоплює комплекс багат шарових персептронів з однаковою архітектурою та вектором ваг \mathbf{w} , який належить багатомірному простору вагових коефіцієнтів \mathcal{W} . Функція-член цього класу, що характеризується функцією σ , відображає вхідний вектор \mathbf{x} в вибірку \mathbf{y} , де \mathbf{x} належить вхідному простору \mathcal{X} з деякою невідомою вірогідністю P . Кожен багат шаровий персептрон в описаній структурі навчається за алгоритмом зворотного розповсюдження, у відповідності з яким налаштовуються параметри персептрону. Задача вибору моделі полягає в виборі персептрону, який має найкраще значення W , яке визначає кількість вільних параметрів (тобто синаптичних ваг та порогів). Більш точно, знаючи скалярний відгук для вхідного сигналу \mathbf{x} , можна визначити похибку узагальнення:

для

Припустимо що \mathcal{D} є множина промаркованих прикладів навчання:

Необхідно обрати таку гіпотезу H_0 , яка мінімізує похибку узагальнення на всій вибірці прикладів навчання.

В подальшому будемо вважати, що описана співвідношенням (3.4) структура володіє наступною властивістю: для будь-якого розміру навчальної вибірки N завжди знайдеться багатосаровий персептрон з достатньо великою кількістю вільних параметрів M , яке адекватно представляє навчальну множину \mathcal{X} .

Будемо називати M числом запам'ятовування, а значення його величини полягає в тому, що розумна процедура вибору моделі повинна знайти таку гіпотезу H_0 , яка задовольнить умові ϵ . В протилежному випадку складність мережі повинна збільшуватись.

Нехай параметр ϵ , який належить інтервалу від нуля до одиниці, визначає розбиття навчаючої вибірки на підвибірці оцінювання та перевірки.

Нехай T містить N прикладів, тоді після розбиття T прикладів буде належати підвибірці оцінювання, а n прикладів – підвибірці перевірки.

Підвибірку оцінювання позначимо \mathcal{X}_1 . Воно буде використовуватись для послідовності багатосарових персептронів, які представлені гіпотезами

H_0, H_1, \dots, H_{M-1} з наростаючою складністю. Так вибірка \mathcal{X}_1 складається з n прикладів, будемо розглядати значення W , яке не перевищує відповідне число згладжування λ .

Використовуючи результати перехресної перевірки при виборі:

(4.5)

де відповідає ϵ , а δ – похибка класифікації, яка забезпечується гіпотезою H_0 при тестуванні на перевірочній вибірці S , що складається з n прикладів.

Ключовим питанням є визначення значення параметру ϵ , що задає розбиття навчаючої вибірки S на підвибірці оцінки $\hat{\epsilon}$ та перевірки $\hat{\delta}$. В [152] при аналітичному дослідженні цього питання з використанням VC-виміру та комп'ютерного моделювання були визначені деякі кількісні властивості оптимального значення ϵ .

- Якщо складність цільової функції, яка визначає бажаний відгук в термінах вхідного вектору x , мала в зрівнянні з розміром n навчальної вибірки, то ефективність перехресної перевірки мало залежить від вибору ϵ .
- Якщо ж цільова функція стає більш складною у зрівнянні з розміром n навчаючої вибірки, то вибір оптимального значення ϵ чинить суттєвий вплив на ефективність перехресної перевірки, причому це значення зменшується.

- Одне і те ж фіксоване значення ϵ майже оптимально підходить для широкого діапазону цільових функцій.

По мірі переходу від одного багат шарового перцептрон до наступного збільшується відповідна кількість вільних параметрів n . Процедура вибору моделі, яка базується на перехресній перевірці, забезпечує принциповий підхід до визначення необхідної кількості схованих нейронів багат шарового перцептрон.

3.3 Створення та перевірка адекватності нейронних мереж

Для розробки штучної нейронної мережі використовувався програмний пакет для статистичного аналізу STATISTICA Automated Neural Networks. В якості архітектури нейронної мережі було вирішено використовувати мережі прямого розповсюдження, а саме багат шаровий перцептрон, який зарекомендував себе як нейронні мережі з досить простою структурою і, в

той же час, як універсальний апарат [153]. Зовнішній вигляд вікна програмного забезпечення приведений на рис. 3.5.

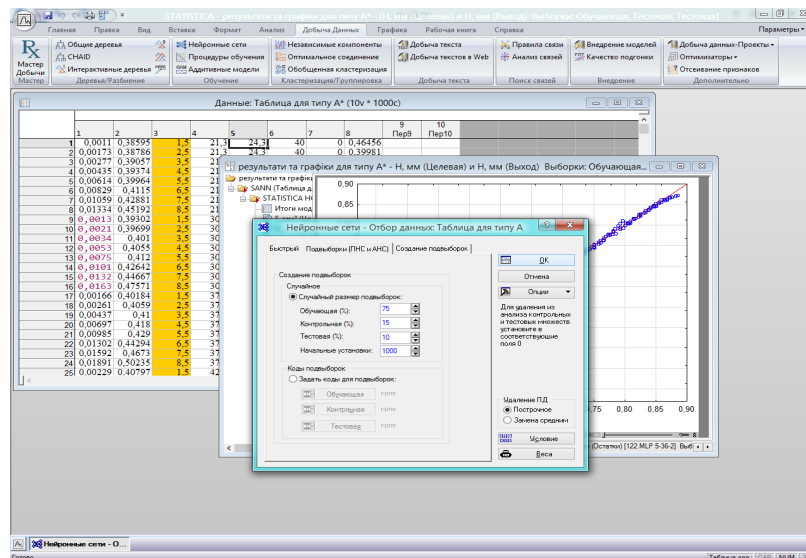


Рисунок 3.5– Зовнішній вигляд вікна програмного забезпечення

Навчання нейронних мереж відбувалося на масиві експериментальних даних, які були отримані та аналізувалися в розділі 2. Для досягнення найкращих результатів використовували усі три типи вбудованих функцій для створення нейронних мереж: автоматизована нейронна мережа, нейронна мережа користувача та метод багатократних підвбірок. При створенні нейронної мережі варіювали розміри навчальної, контрольної та тестової вибірки для знаходження оптимального варіанта їх комбінації, були встановлені для всіх типів нейронних мереж такі співвідношення: навчальна – 75%, контрольна 15% та тестова – 10%. Значення в підвбірках обиралися випадковим чином. Визначення найбільш підходящого типу функції активації визначався за допомогою методу перебору, варіювалися від 1 до 50 кількість схованих нейронів, перебирали алгоритми навчання та змінювали кількість епох навчання. Визначення найкращого типу нейронної мережі проводилося за допомогою підходу нарощування та перехресної перевірки [153].

Схема узагальненої нейромережевої моделі приведена на рис. 3.6

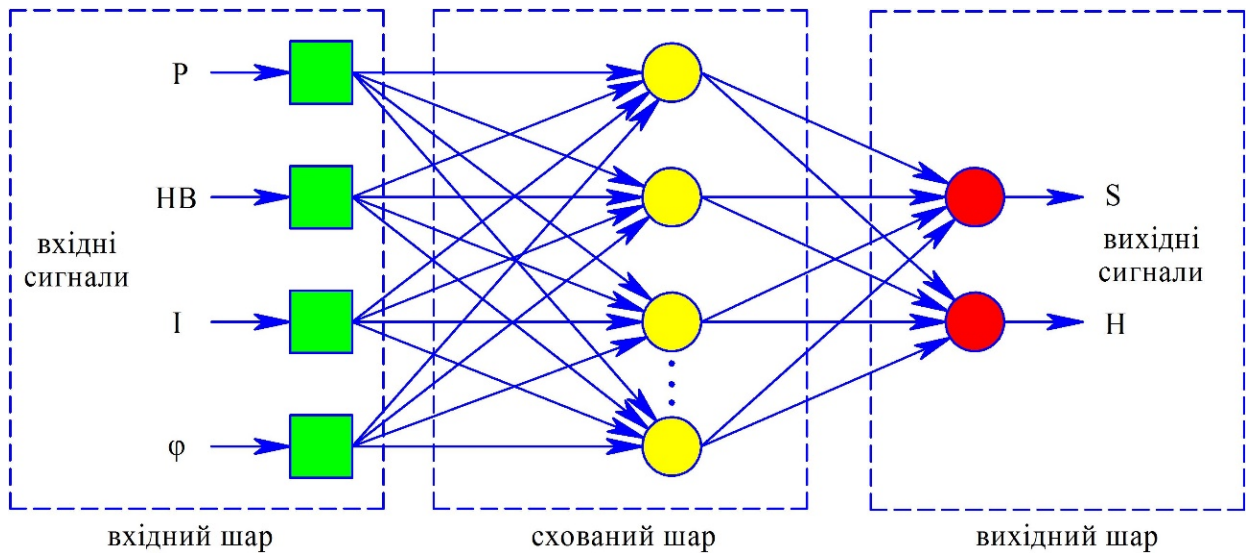


Рисунок 3.6 – Схема нейромережевої моделі

На вхідний шар багатозарового персептрону при навчанні подавалися величини вхідних сигналів, відповідних отриманим при випробуванні цільовим значенням.

Хід навчання нейронних мереж для струмознімального елемента типу «А» приведений на рис. 3.7.

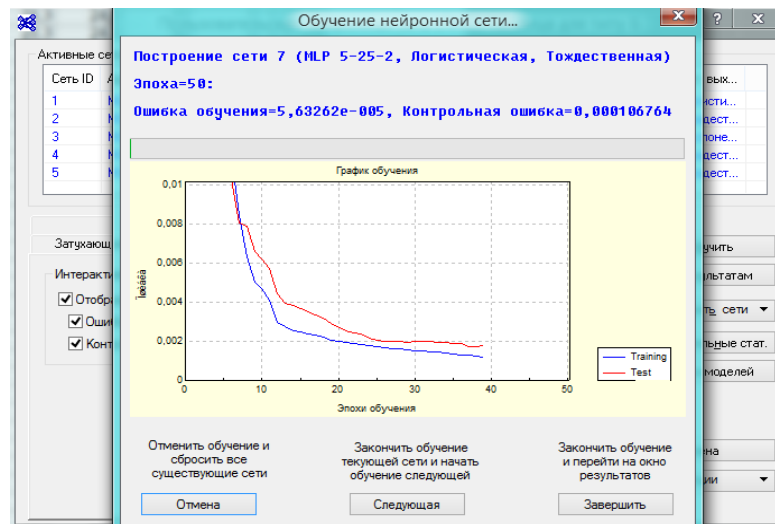


Рисунок 3.7– Зовнішній вигляд вікна програми з ходом навчання нейронних мереж для струмознімальних елементів типу «А»

Аналізуючи результати отриманих нейронних мереж були відібрані кращі з них, виходячи з продуктивностей вибірок, а також на підставі помилок навчання. Параметри відібраних моделей для струмознімальних елементів типу «А» наведені в табл. 3.1.

Аналізуючи гістограми залишків і діаграми розсіювання цільових і вихідних значень для кожної мережі, параметри котрих приведені в табл. 4.1 та на основі найкращої продуктивності та найменшої похибки для подальшого використання була обрана мережа з архітектурою MLP 5-26-2.

Діаграми розсіювання вхідних та вихідних значень для нейронної мережі MLP 5-26-2 приведені на рис. 3.8.

Двомірні діаграми розсіювання призначені для візуалізації залежностей між двома змінними. Дані зображуються точками в двовимірному просторі, де осі відповідають змінним. Дві координати визначають положення кожної точки та відповідають значенням двох змінних для цієї точки. Якщо дві змінні сильно пов'язані, то безліч точок даних приймає певну форму – в даному випадку форму прямої лінії. Накладання точок в двомірному просторі на пряму свідчить про високу продуктивність мережі.

Таблиця 3.1 – Параметри відібраних моделей для струмознімального елемента типу «А»

№ моделі	Архітектура	Продуктивності вибірок			Похибки вибірок			Алгоритм навчання	Функція активації	Функція активації	
		Навчальна	Контрольна	Тестова	Навчальна	Контрольна	Тестова			Схованіх нейронів	Вихідних нейронів
59	MLP 5-29-2	0,997978	0,998260	0,995101	0,000005	0,000013	0,000011	BFGS 357	Сум.квдр.	Гіперболічна	Логістична
77	MLP 5-30-2	0,997898	0,997868	0,995048	0,000009	0,000020	0,000023	BFGS 309	Сум.квдр.	Гіперболічна	Логістична
122	MLP 5-26-2	0,998202	0,998294	0,995340	0,000005	0,000016	0,000012	BFGS 380	Сум.квдр.	Гіперболічна	Логістична

128	MLP 5-39-2	0,998256	0,997856	0,995582	0,000008	0,000018	0,000017	BFGS 374	Сум. квадр.	Гіперболічна	Логістична
130	MLP 5-39-2	0,998020	0,998003	0,995136	0,000007	0,000019	0,000015	BFGS 304	Сум. квадр.	Гіперболічна	Логістична

Діаграми розсіювання зазвичай використовуються для дослідження або встановлення типу взаємозв'язку двох змінних, оскільки вони надають більше інформації, ніж просте значення коефіцієнта кореляції.

Іншою важливою перевагою застосованих діаграм розсіювання є те, що вони дозволяють знаходити викиди, які штучно збільшують або зменшують коефіцієнт кореляції. Навіть один викид може дуже значно збільшити коефіцієнт кореляції між двома змінними, що вплине на якість отриманого результату. Відсутність викидів, які б могли вплинути на подальші розрахунки свідчить про гарну якість обраної моделі.

Гістограми залишків для нейронної мережі MLP 5-26-2 приведені на рис. 3.9

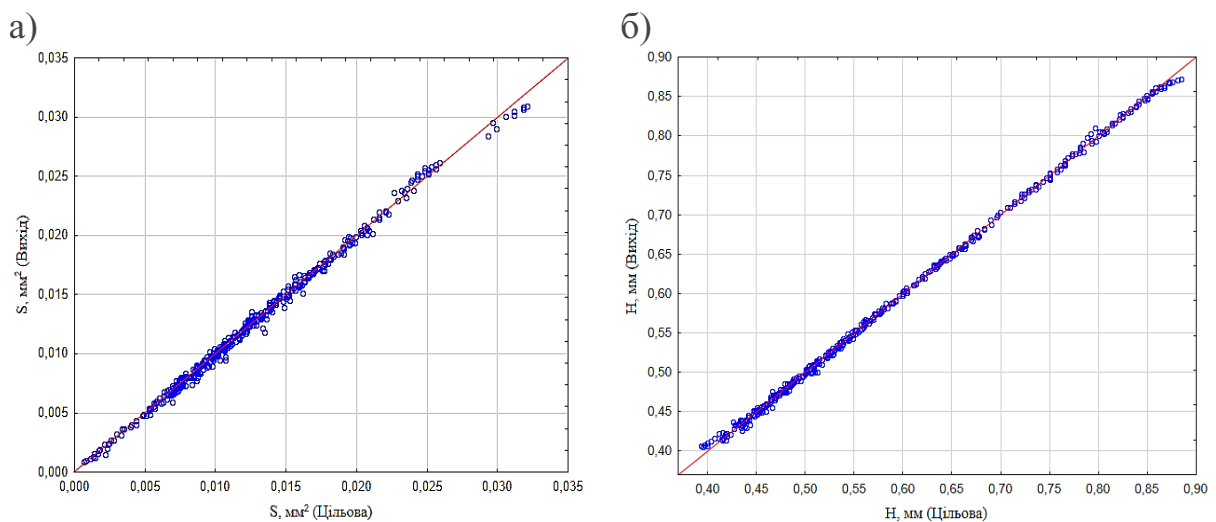


Рисунок 3.8 – Діаграми розсіювання вихідних та цільових значень зносу контактного проводу (а) та струмознімальних елементів типу «А» (б) для мережі MLP 5-26-2

а)

б)

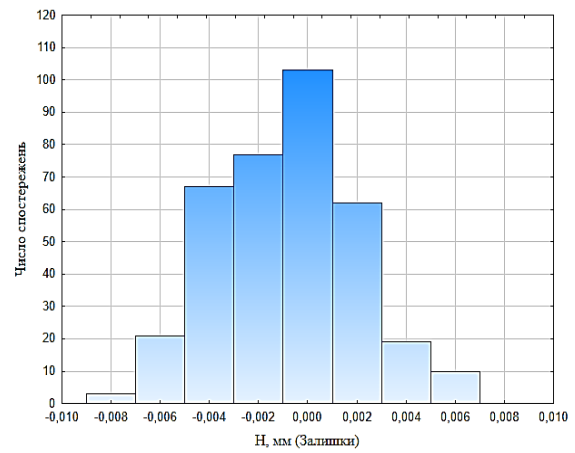
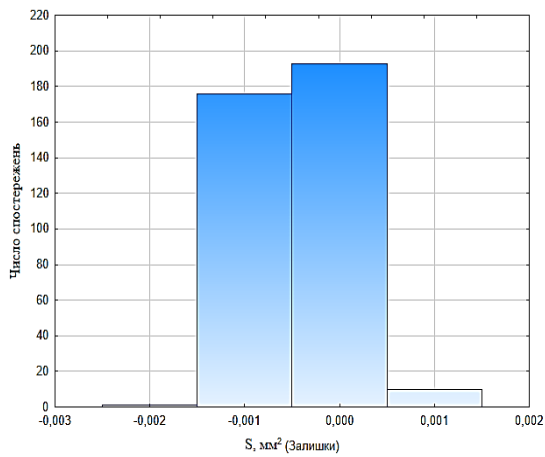


Рисунок 3.9 – Гістограми залишків для зносу контактного проводу (а) та струмознімальних елементів типу «А» (б) для мережі MLP 5-26-2

З приведених гістограм залишків можна побачити, що основна частина залишків зосереджена в середній частині інтервалу, а їх значення несуттєво впливає на точність прогнозування моделей.

На рис. 3.10 представлені результати прогнозування зносу контактного проводу та струмознімальних елементів для моделі MLP 5-26-2 на масиві вхідних даних.

Як можна побачити, отримані поверхні зношування контактуючих елементів пари тертя «контактний провід – струмознімальний елемент» при прогнозуванні практично ідентичні з вхідними даними.

Якість обраної моделі перевірялася на тестовій вибірці. Було встановлено, що середнє значення відносної похибки при прогнозуванні зношування струмознімальних елементів типу «А» складає 0,51%, а при прогнозуванні зношування контактного проводу – 1,12%.

а)

б)

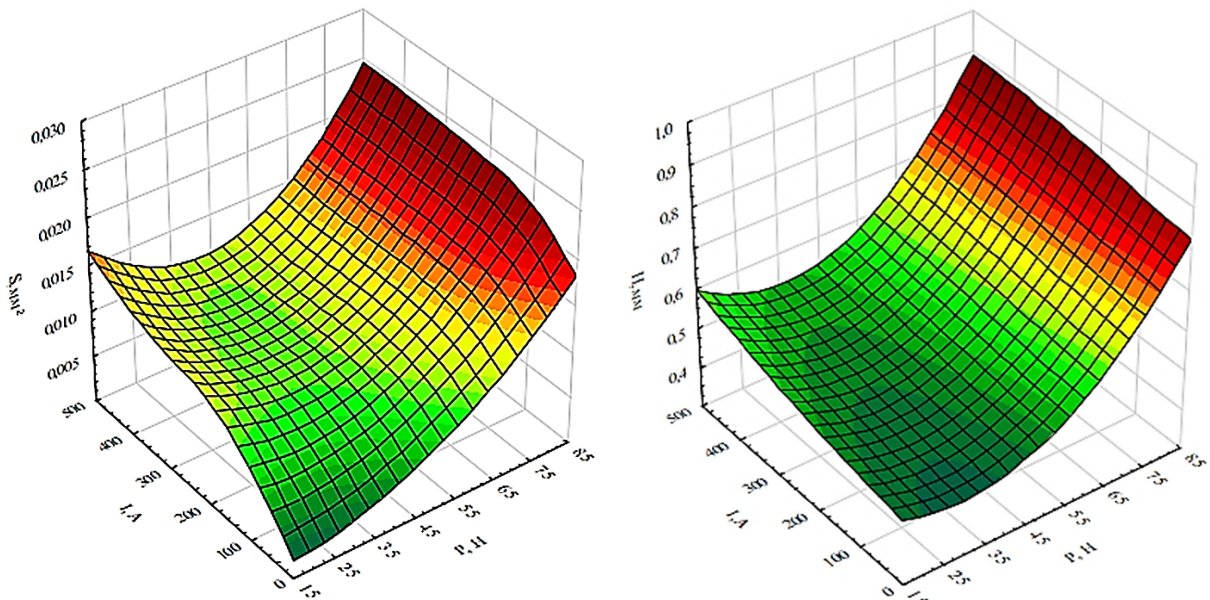


Рисунок 3.10 – Поверхні зносу контактному проводу (а) та струмознімальних елементів типу «А» (б) для мережі MLP 5-26-2

Хід навчання нейронних мереж для струмознімального елемента типу «Б» приведений на рис. 3.11.

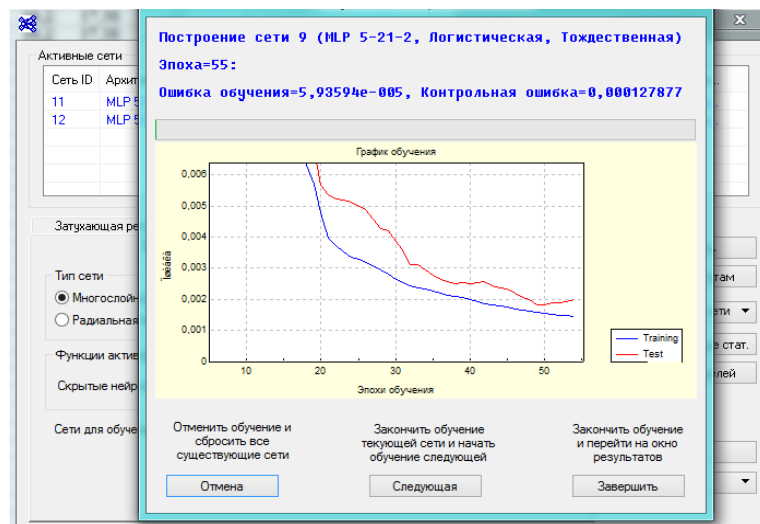


Рисунок 3.11 – Зовнішній вигляд вікна програми з ходом навчання нейронних мереж для струмознімальних елементів типу «Б»

Параметри відібраних моделей для струмознімальних елементів типу «Б» наведені в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Параметри відібраних моделей для струмознімального елемента типу «Б»

Продуктивності вибірок	Похибки вибірок	Функція активації
------------------------	-----------------	-------------------

№ моделі	Архітектура	Навчальна	Контрольна	Тестова	Навчальної	Контрольна	Тестова	Алгоритм навчання	Функція активації	Схованих нейронів	Вихідних нейронів
12	MLP 5-33-2	0,997180	0,997058	0,992793	0,00012	0,00022	0,00015	BFGS 252	Сум.кв.кв.	Гіперболічна	Логістична
14	MLP 5-21-2	0,996743	0,996972	0,993121	0,00012	0,00018	0,00014	BFGS 266	Сум.кв.кв.	Логістична	Логістична
36	MLP 5-36-2	0,996840	0,997356	0,993230	0,00011	0,00018	0,00017	BFGS 269	Сум.кв.кв.	Гіперболічна	Логістична
72	MLP 5-22-2	0,997291	0,997723	0,992939	0,00017	0,00027	0,00036	BFGS 423	Сум.кв.кв.	Гіперболічна	Логістична
90	MLP 5-45-2	0,996569	0,996685	0,991954	0,00015	0,00021	0,00022	BFGS 235	Сум.кв.кв.	Гіперболічна	Логістична

Аналізуючи гістограми залишків і діаграми розсіювання цільових і вихідних значень для кожної мережі та на основі найкращої продуктивності та найменшої похибки для подальшого використання була обрана мережа з архітектурою MLP 5-26-2.

Гістограми залишків та діаграми розсіювання для якої приведені на рис. 3.12 – 3.14.

а)

б)

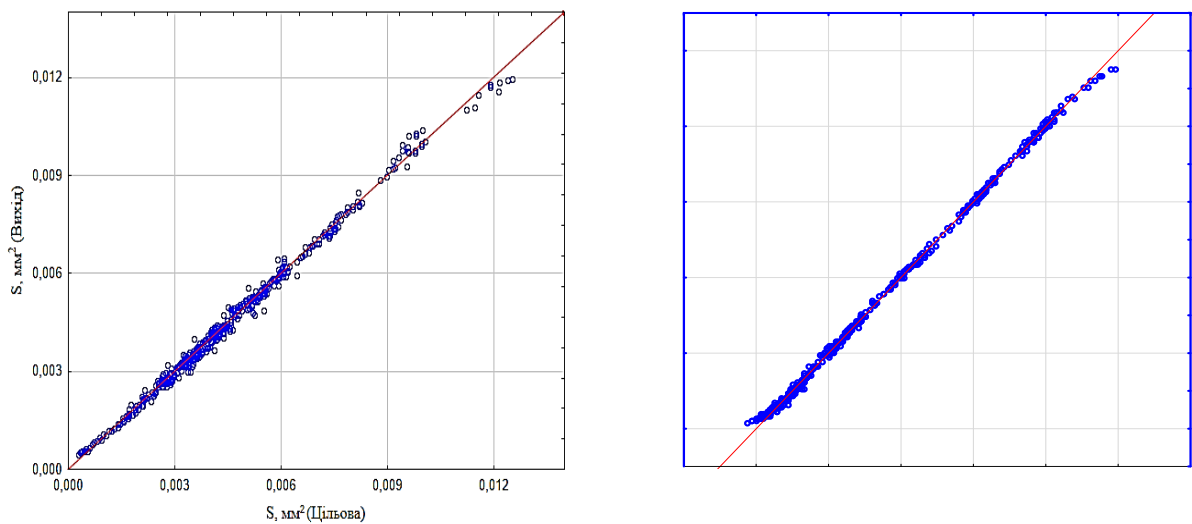


Рисунок 3.12 – Діаграми розсіювання вихідних та цільових значень зносу контактного проводу (а) та струмознімальних елементів типу «Б» (б) для мережі MLP 5-36-2

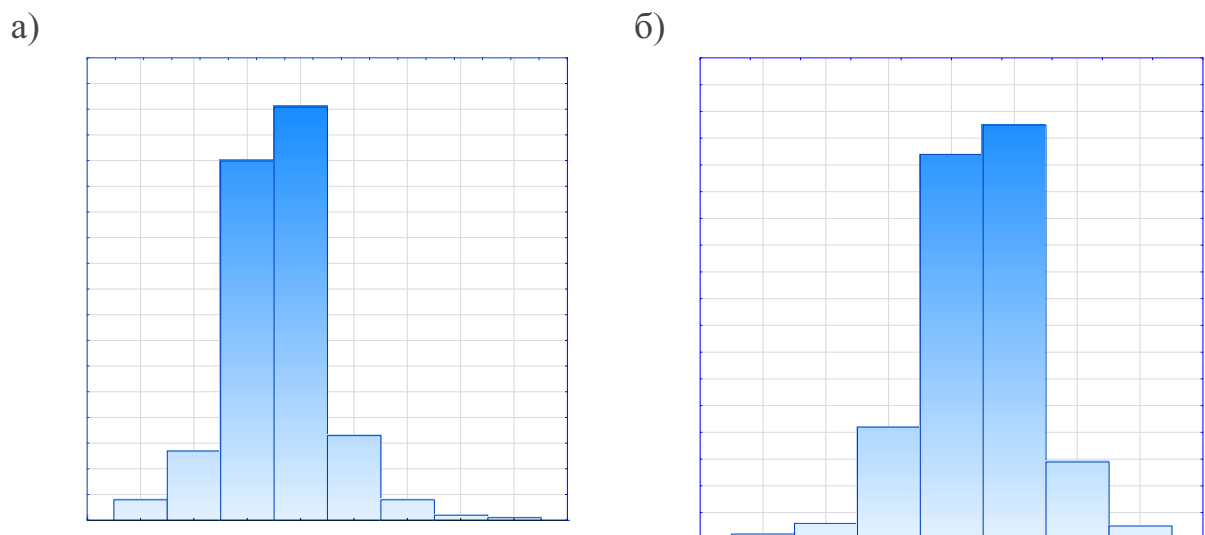


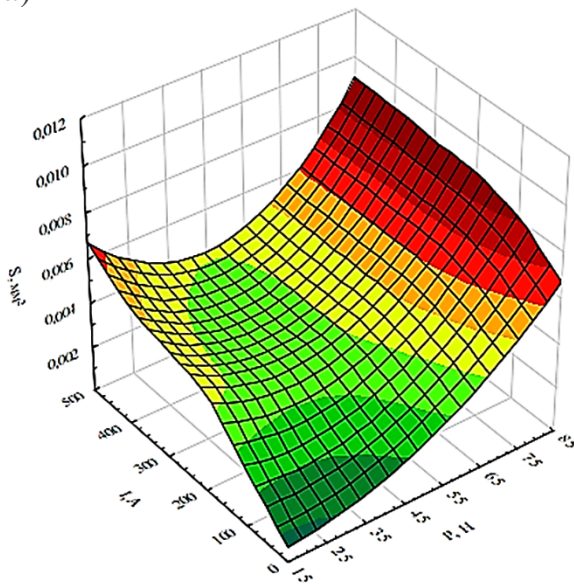
Рисунок 3.13 – Гістограми залишків для зносу контактного проводу (а) та зносу струмознімальних елементів типу «Б» (б) мережі MLP 5-36-2

Якість обраної моделі перевірялася на тестовій вибірці. Було встановлено, що середнє значення відносної похибки при прогнозуванні зношування струмознімальних елементів типу «Б» складає 0,63%, а при прогнозуванні зношування контактного проводу – 1,19%.

На рис. 3.14 представлені результати прогнозування зношування контактного проводу та струмознімальних елементів для моделі MLP 5-36-2

на масиві вхідних даних.

а)



б)

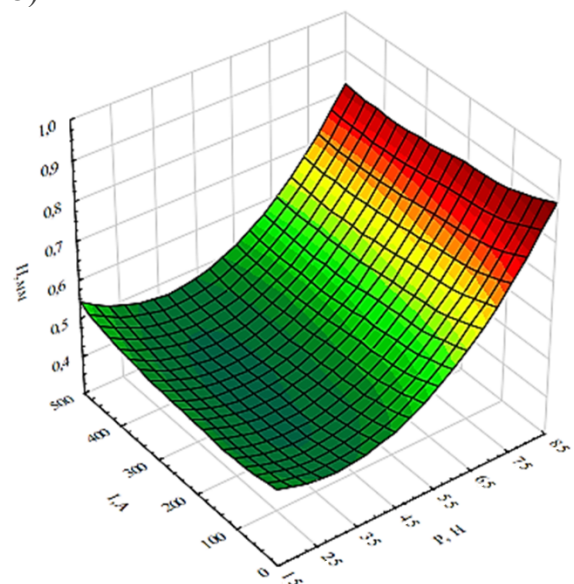


Рисунок 3.14– Поверхні зносу контактного проводу (а) та струмознімального елемента типу «Б» (б) отримані в результаті прогнозування моделі MLP 5-36-2

Хід навчання нейронних мереж для мідних струмознімальних елементів приведений на рис. 3.15.

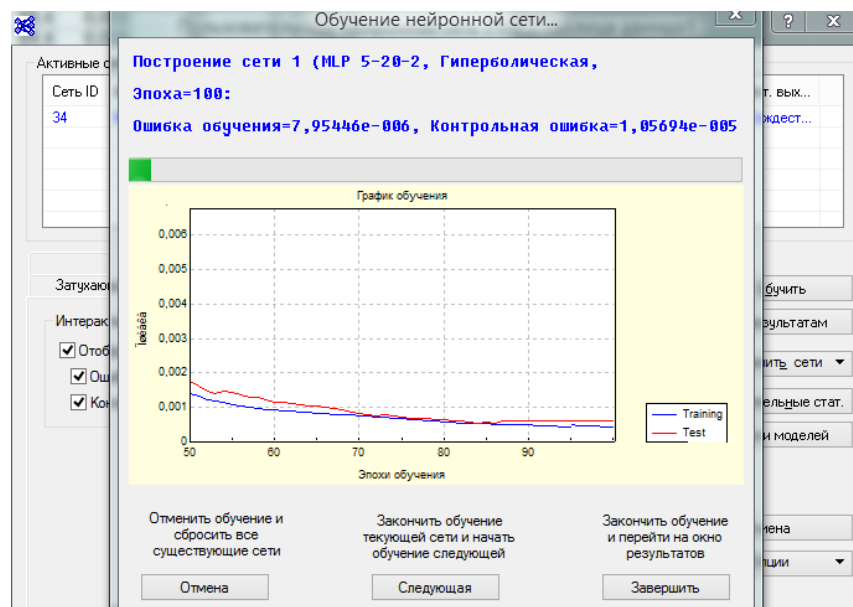


Рисунок 3.15 — Зовнішній вигляд вікна програми з ходом навчання нейронних мереж для мідних пластин

Найкращі моделі визначалися виходячи з продуктивності вибірок, а також на підставі помилок навчання. Параметри відібраних моделей наведені в табл. 3.3

Аналізуючи гістограми залишків і діаграми розсіювання цільових і вихідних значень для кожної мережі та на основі найкращої продуктивності та найменшої похибки для подальшого використання була обрана мережа з архітектурою MLP 5-20-2.

Таблиця 3.3 – Параметри відібраних моделей для мідних пластин

№ моделі	Архітектура	Продуктивності вибірок			Похибки вибірок			Алгоритм навчання	Функція активації	Функція активації	
		Навчальна	Контрольна	Тестова	Навчальна	Контрольна	Тестова			Схованих нейронів	Вихідних нейронів
3	MLP 5-12-2	0,998757	0,998986	0,998354	0,000002	0,000003	0,000004	BFGS 401	Сум.квандр.	Логістична	Тотожна
11	MLP 5-27-2	0,999212	0,999145	0,998469	0,000001	0,000002	0,000004	BFGS 439	Сум.квандр.	Логістична	Тотожна
22	MLP 5-23-2	0,998634	0,998631	0,997938	0,000003	0,000004	0,000005	BFGS 333	Сум.квандр.	Гіперболічна	Тотожна
26	MLP 5-20-2	0,999236	0,999302	0,999050	0,000001	0,000002	0,000002	BFGS 401	Сум.квандр.	Гіперболічна	Тотожна
27	MLP 5-20-2	0,999358	0,999376	0,999109	0,000001	0,000002	0,000002	BFGS 425	Сум.квандр.	Гіперболічна	Тотожна

Гістограми залишків та діаграми розсіювання для якої приведені на рис. 3.16 – 3.18.

а)

б)

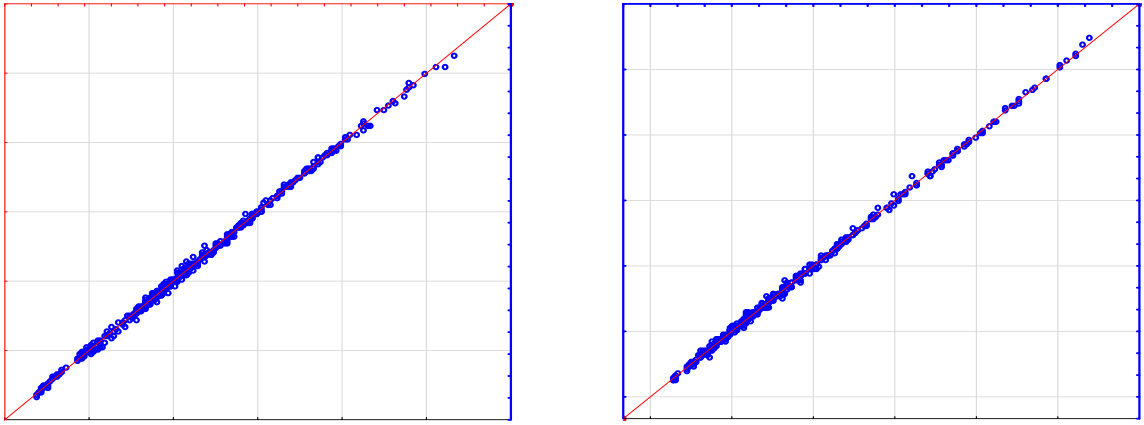


Рисунок 3.16 – Гістограма залишків для зносу контактного проводу (а) та зносу мідних пластин (б) мережі MLP 5-20-2

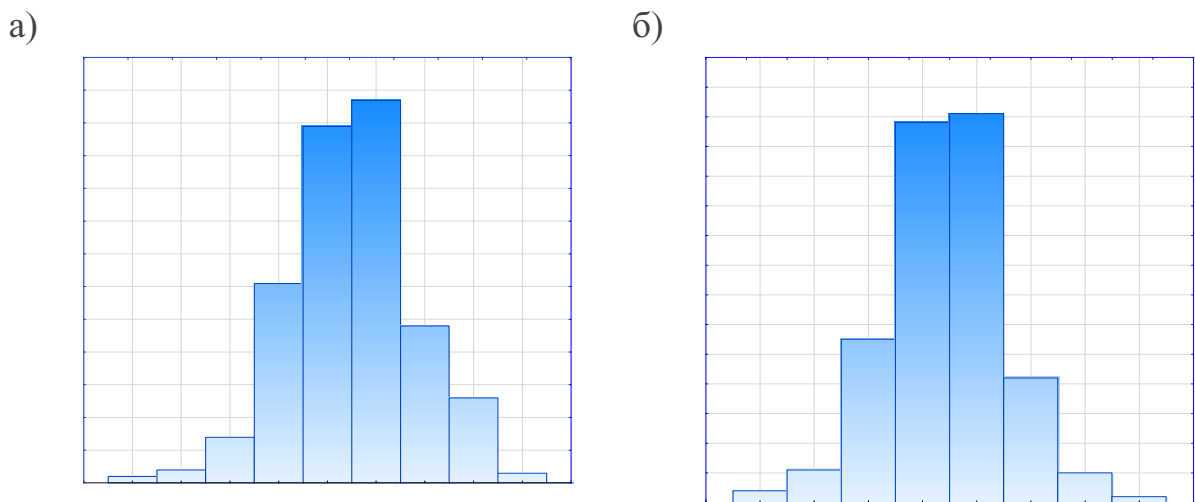


Рисунок 3.17 – Гістограма залишків для зносу контактного проводу (а) та зносу мідних пластин (б) мережі MLP 5-20-2

Якість обраної моделі перевірялася на тестовій вибірці. Було встановлено, що середнє значення відносної похибки при прогнозуванні зношування мідних пластин складає 0,49%, а при прогнозуванні зношування контактного проводу – 1,83%.

На рис. 3.18 представлені результати прогнозування зношування контактного проводу та струмознімальних елементів для моделі MLP 5-20-2 на масиві вхідних даних.

а) б)

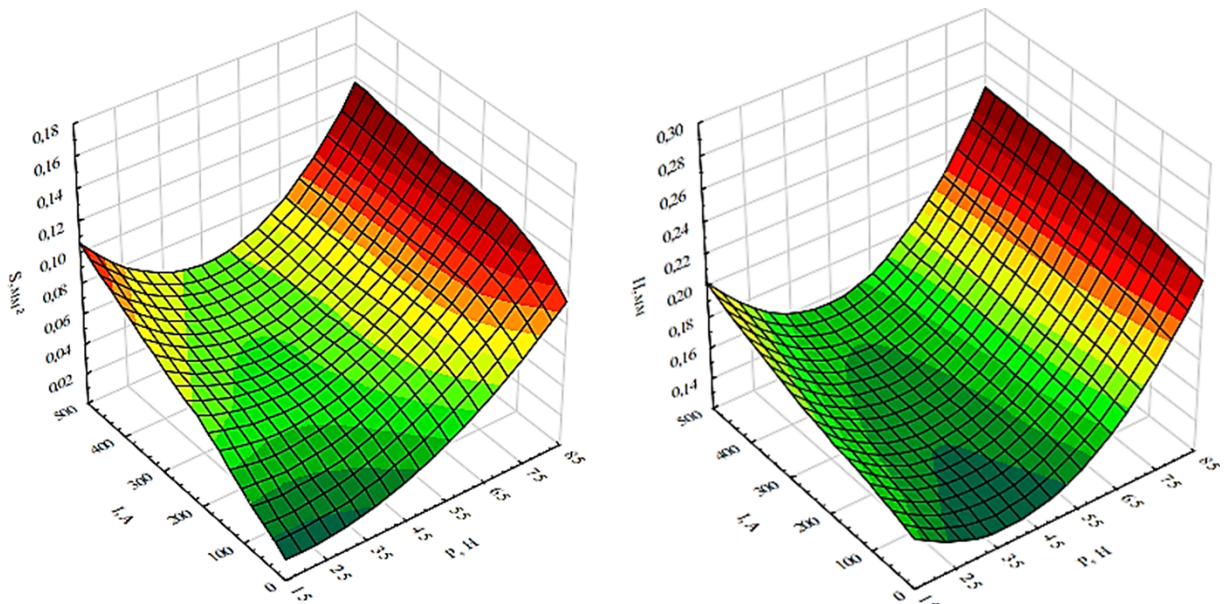


Рисунок 3.18 – Поверхні зносу контактного проводу (а) та зносу мідних пластин (б) отримані в результаті прогнозування моделі MLP 5-20-2

Отримані прогнозні нейронні моделі зношування контактної ланки та струмознімальних елементів (див. табл. 3.1 – 3.3) показали високу точність прогнозування на тестовій вибірці (відносна похибка становила менше 0,63%). Співпадіння отриманих експериментальних даних з результатами прогнозування свідчать, що обрані моделі можна застосовувати в якості бази розрахункового апарату запропонованого методу прогнозування зношування пар тертя.

3.4 Розробка методу прогнозування зносу ковзного сильнострумовевого контакту

Наразі, як на ділянках змінного так і постійного струму існує проблема демонтажу полозів струмоприймачів через появу пошкоджень струмознімальних елементів. Як було вказано в розділі 1, близько 30% усіх полозів струмоприймачів демонтуються через нерівномірний знос струмознімальних елементів, а через появу пропилів та підпалів 25%, це призводить до нераціонального використання технічного ресурсу струмознімальних елементів, передчасного демонтажу полоза струмоприймача, який не відпрацював свій

нормований термін експлуатації та залучення технічного персоналу для усунення несправностей.

Автором [73] були запропоновані заходи з мінімізації витрат на заміну струмознімальних елементів, які полягали в повторному використанні струмознімальних елементів з запилюванням пошкоджених частин та підгонкою їх один до одного по довжині полозу струмоприймача. Подібні дії можуть мати місце при появі місцевих пошкоджень: сколи, тріщини, підпали, незначні пропили, що викликані неякісним регулюванням контактних підвісок і не залежать від параметрів струмознімальних елементів.

Поява локальних пошкоджень, а саме наявність великої кількості пропилів, нерівномірне зношування струмознімальних елементів по довжині полозу призводить до необхідності повного перебирання полозу струмоприймача. Наявна ситуація вимагає створення засобів, які покликані мінімізувати появу подібних пошкоджень полозів струмоприймачів, що викликані нестабільністю міцнісних характеристик струмознімальних елементів.

Мінімізувати появу пошкоджень полозів струмоприймачів та досягти збільшення технічного ресурсу струмознімальних елементів можливо запровадивши в експлуатації пристрій для визначення параметрів вугільних струмознімальних елементів [154] (рис. 3.19, Додаток Д), робота якого побудована на методі прогнозування зношування ковзного сильнострумового контакту. Суть методу полягає в визначенні раціонального розташування струмознімальних елементів на полозі струмоприймача, шляхом визначення їх фізико-механічних характеристик та прогнозування зношування пар тертя струмознімання при конкретних розглядуваних параметрах ділянки. Метод направлений на підвищення показників надійності роботи вуглецевмісних струмознімальних елементів та контактних проводів і економічності струмознімання.

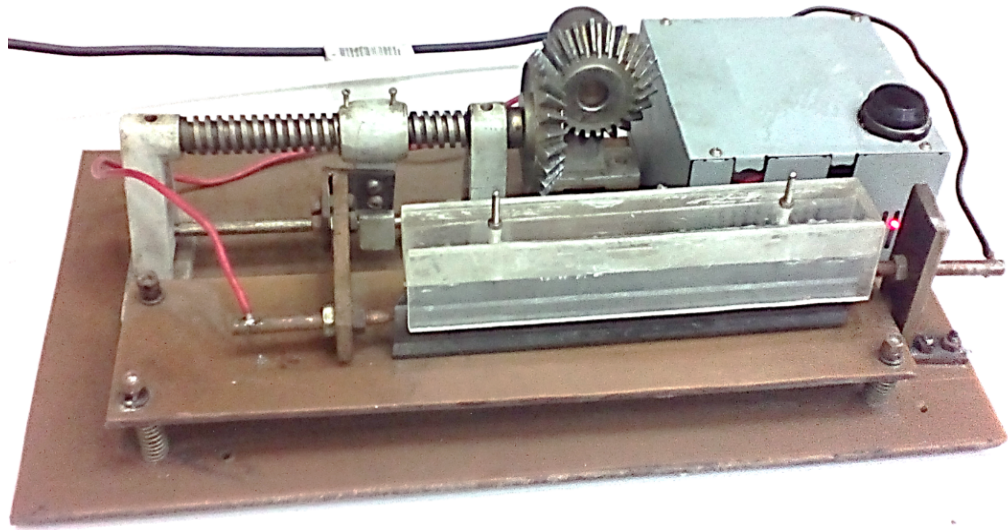
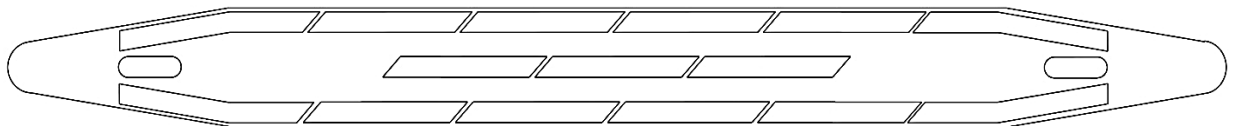


Рисунок 3.19 – Зовнішній вигляд дослідного зразку пристрою для визначення параметрів вугільних струмознімальних елементів

Застосування запропонованого методу розповсюджується на струмознімальні елементи на вуглецевій основі, які можуть встановлюватись на дворядні та трирядні полози струмоприймачів, що встановлюються на електрорухомому складі змінного та постійного струму. Схеми полозів струмоприймачів для встановлення струмознімальних елементів на вуглецевій основі приведена рис. 3.20.

а)



б)

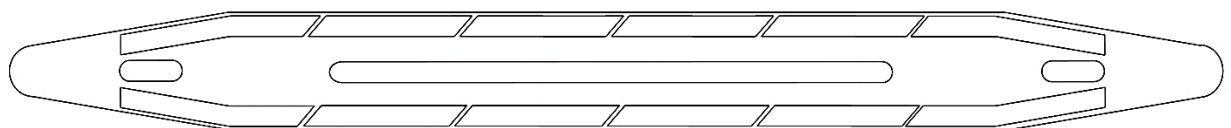


Рис. 3.20 – Схеми полозів струмоприймачів:

а) полоз струмоприймача постійного струму; б) полоз струмоприймача змінного струму

Відомо, що на процес зношування пар тертя струмознімання впливає цілий ряд факторів: типи контактних підвісок і струмоприймачів, якість їх регулювання та обслуговування, матеріали з яких виготовлені елементи пари

тертя, вплив параметрів навколишнього середовища, величина струму, що знімається, кількість пар поїздів, швидкість руху. На підставі перерахованих факторів пропонується обґрунтувати новий підхід для визначення на етапі проектування, модернізації чи експлуатації величину зношування пари тертя «контактний провід – струмознімальний елемент», котра являється найінформативнішим критерієм якості струмознімання [3].

Для досягнення поставленої мети на стендовій установці для моделювання процесу струмознімання [108] проводились експериментальні дослідження на зношування пар тертя при змінних зовнішніх впливаючих параметрах, результати яких слугували в якості масиву даних для навчання нейромережових моделей.

Параметри експериментальної установки приведені в додатку А, а умови дослідження процесу зношування пари тертя при струмозніманні приведені в другому розділі.

Вхідними даними для навчання прогнозної нейромережової моделі слугували сила натиску, сила струму, питомий електричний опір струмознімальних елементів, їх твердість, вологість повітря, а в якості цільових функцій були обрані величина зносу контактного проводу та струмознімальних елементів.

Для прогнозування зношування контактних проводів та струмознімальних елементів полозів струмоприймачів метод прогнозування зношування ковзного сильнострумового контакту використовує додаткові параметри, такі як: тип контактної підвіски, крива натиску струмоприймача вздовж прогону, графік споживання струму на ділянці та інше. Алгоритм прогнозування зношування пар тертя приведений на рис. 3.21 – 3.30.



Рисунок 3.21 – Експериментальний блок алгоритму прогнозування зношування ковзного сильнострумового контакту

В експериментальному блоці алгоритму прогнозування зношування пар тертя визначаються параметри пар тертя струмознімання та межі впливаючих на процес їх зношування параметрів для постановки повного факторного експерименту, адекватність отриманих моделей перевіряється за критерієм Фішера. Якщо модель адекватна, проводяться експериментальні дослідження на зношування пар тертя струмознімання «контактний провід – струмознімальний елемент» та будуються поверхні їх зношування в залежності від сукупності впливаючих факторів, які змінюються в заданих межах.

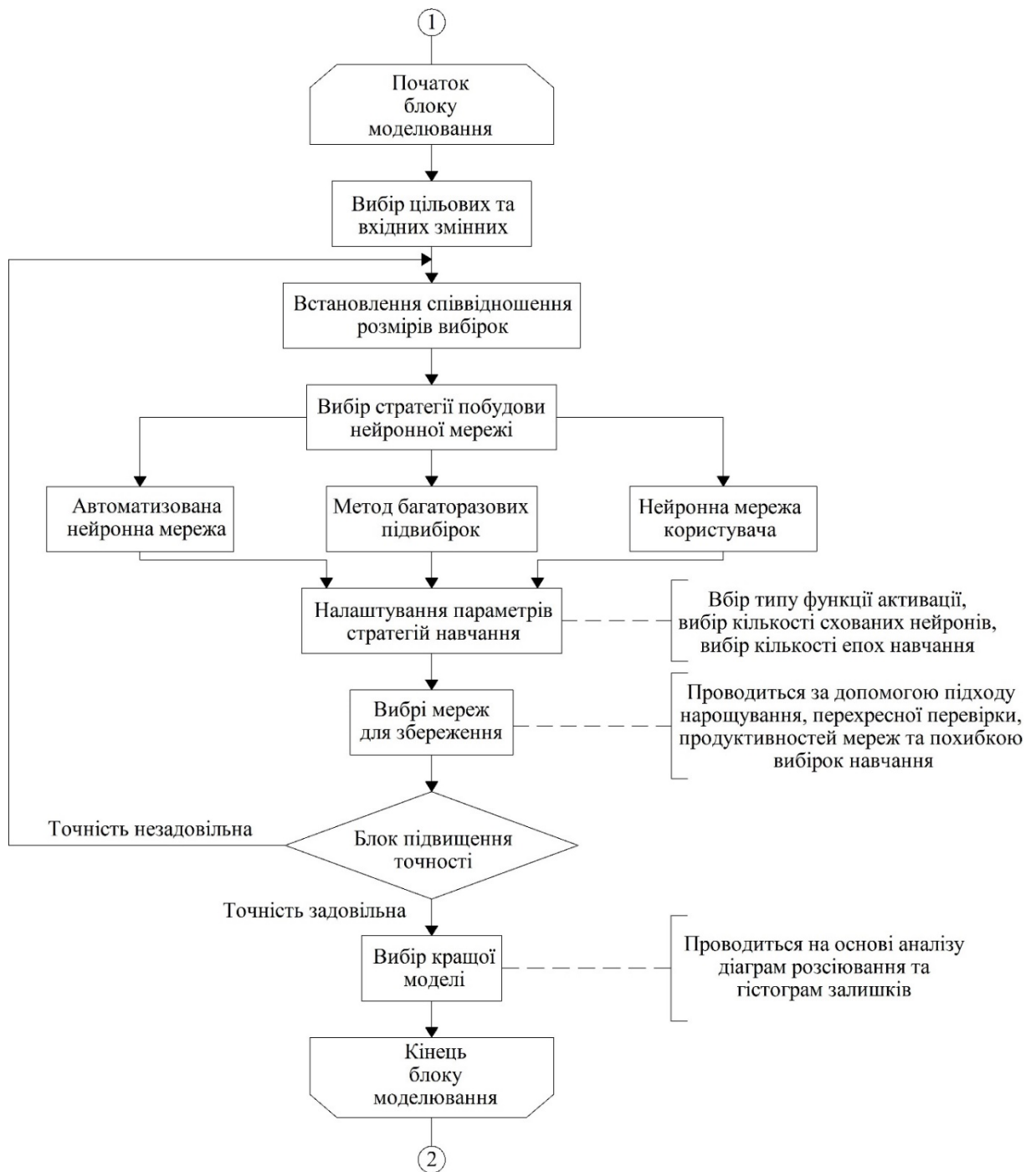


Рисунок 3.22 – Блок моделювання алгоритму прогнозування зношування ковзного сильнострумового контакту

Блок моделювання (див. рис. 3.22) алгоритму прогнозування зношування ковзного сильнострумового контакту призначений для побудови сукупності прогнозних нейронних мереж з вибором кращої на основі аналізу діаграм розсіювання залишків. Підвищення точності нейронних мереж відбувається за допомогою блоку підвищення точності, який повторює

алгоритм побудови моделей до тих пір, поки їх похибка прогнозування на контрольній вибірці не стане меншою за 2%, але кількість ітерацій після досягнення цього значення буде не меншим ніж 100, а значення похибки кожної наступної моделі повинно бути меншим ніж попередньої.

Алгоритм роботи блоку сортування вставок за твердістю приведений на рис. 3.23.

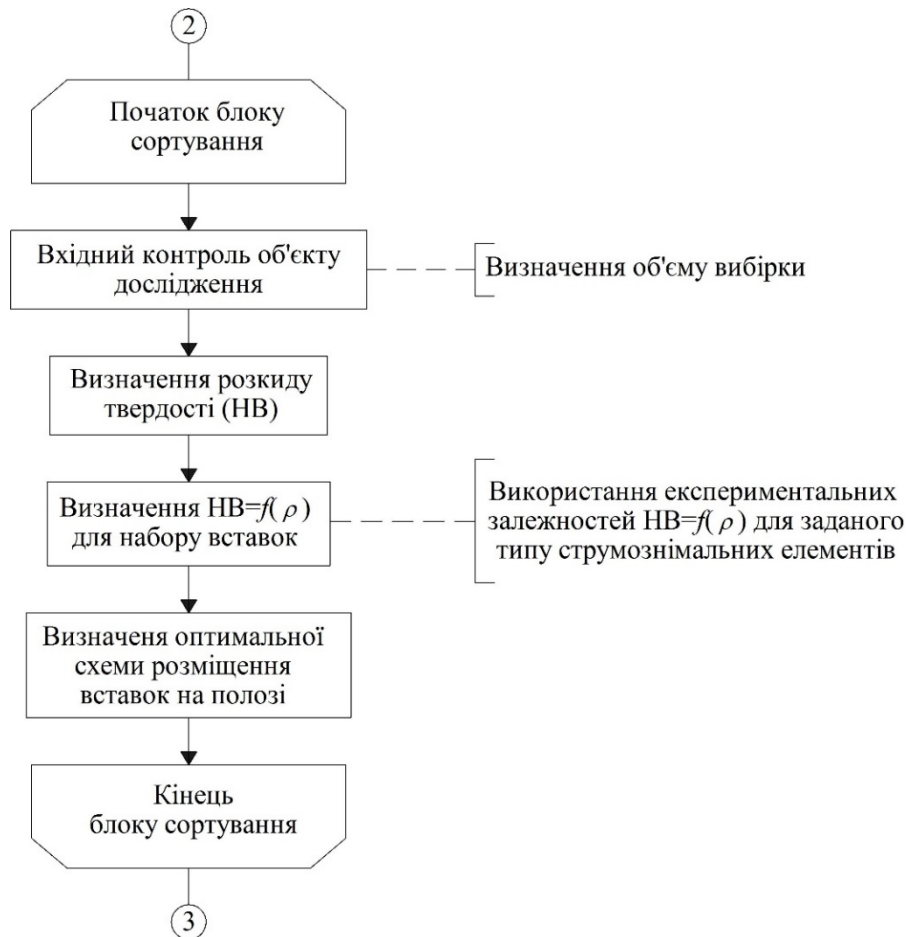


Рисунок 3.23 – Блок сортування вставок за твердістю

В блоці сортування, на першому етапі відбувається визначення твердості струмознімальних елементів під час вхідного контролю, об'єм вибірки для котрого нормується міждержавним стандартом [REF _Ref499196417 \r \h * MERGEFORMAT 23] та становить 0,1 % від партії, але не менше 5 шт. Надалі, визначаються межі розкиду твердості струмознімальних елементів та з врахуванням типу полозу струмоприймача відбувається визначення кількості вставок для встановлення на полоз. Наступним етапом є проведення

непрямого вимірювання твердості кожного окремого зразка струмознімального елемента з партії для подальшого встановлення на полоз [154], для чого використовуються експериментальні залежності для струмознімальних елементів типу «А» та «Б», що приведені в розділі 2.

Розрахунковий блок (рис. 3.24) алгоритму прогнозування зношування ковзного сильнотривового контакту призначений для прогнозування можливого зношування контактної частини та струмознімальних елементів, що розташовані на полозі струмоприймача в залежності від параметрів елементів пари тертя та параметрів досліджуваної ділянки і підтвердження найбільш підходящої схеми розташування вставок на полозі струмоприймача.

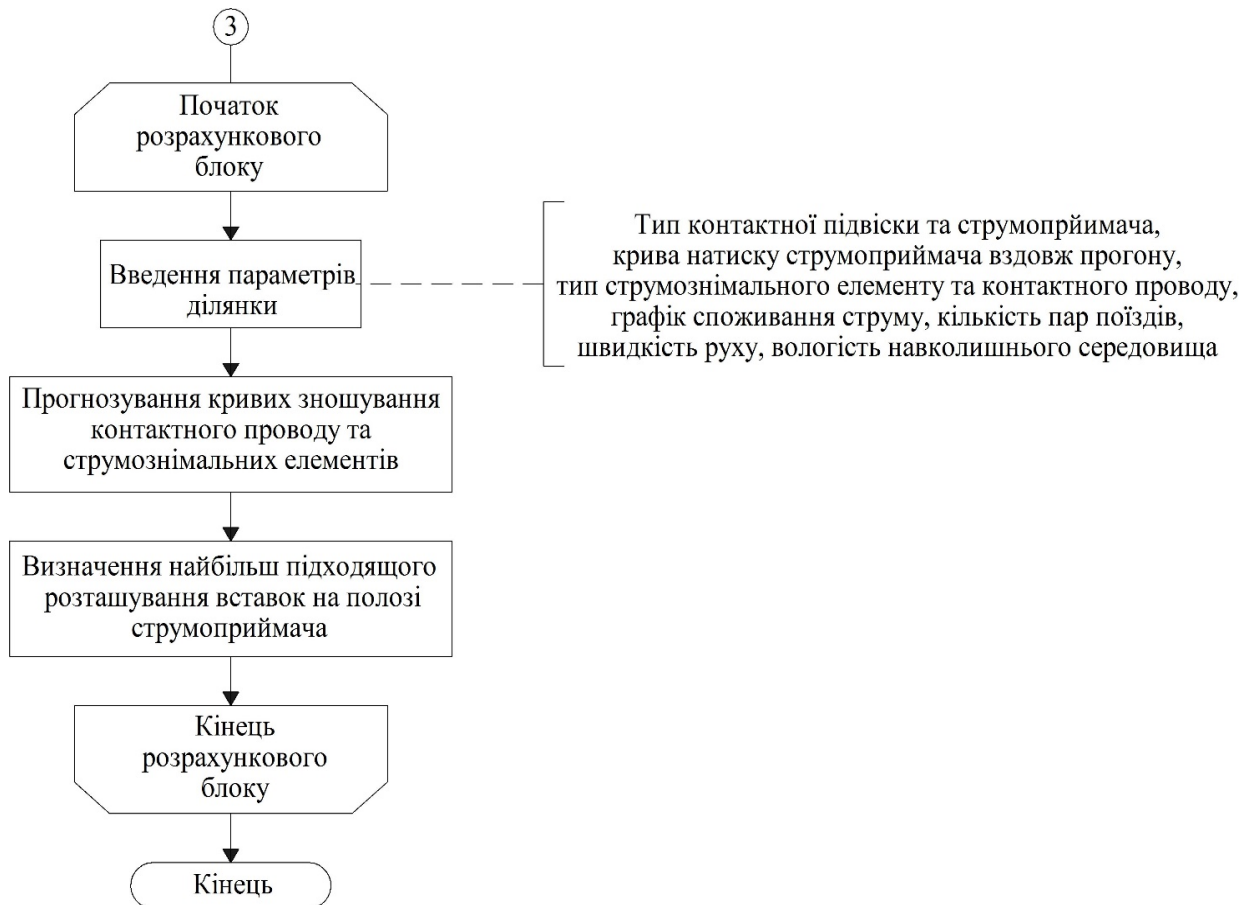


Рисунок 3.24 – Розрахунковий блок алгоритму прогнозування зношування ковзного сильнотривового контакту

Кінцевим етапом розрахункового блоку алгоритму прогнозування зношування ковзного сильнотривового контакту є підтвердження найбільш

підходящої схеми розташування вставок на полозі струмоприймача у відповідності до ранжування вставок за твердістю, де 1 – вставка з найбільшою твердістю, а 8 (чи 11 для трирядного полозу) – з найменшою.

На основі отриманих в результаті проведення експериментальних досліджень даних, визначено силу впливу твердості струмознімальних елементів на зношування пари тертя, на основі чого запропоновано схему розміщення струмознімальних елементів на полозах струмоприймачів рис. 3.25.

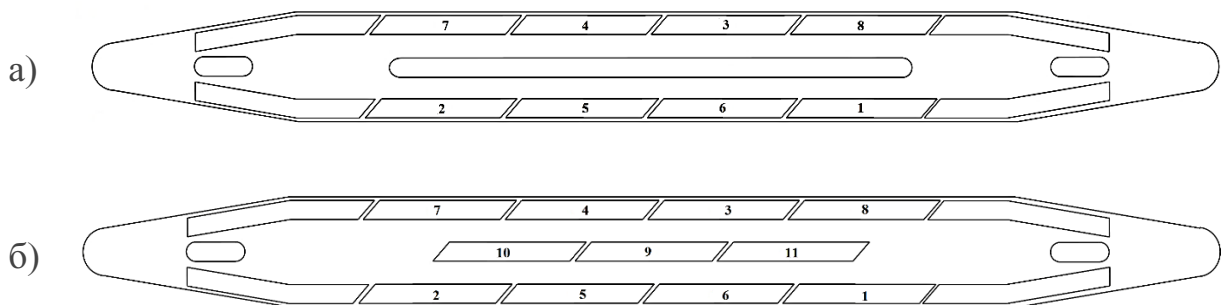


Рисунок 3.25 – Схеми полозів струмоприймачів для встановлення струмознімальних вставок за твердістю для дворядного (а) та трирядного полозу (б)

Запропоновані схеми розміщення струмознімальних елементів на полозах струмоприймачів з ранжуванням за твердістю направлені на зменшення кількості сколів на набігаючій частині вставок першого ряду, зменшення електроерозійного впливу на крайні вставки третього ряду, зменшення кількості пропилив та збільшення технічного ресурсу полозу струмоприймача.

Висновки до розділу 3

1. Проведений аналіз існуючих напрямків створення прогнозних математичних моделей показує, що нейромережевий підхід має беззаперечні переваги перед традиційними математичними методами: дозволяє формалізувати розглядувану задачу з елементами невизначеності коли

відсутній апарат для її вирішення чи існуючий математичний апарат не дозволяє забезпечити необхідну точність рішень.

2. Розроблена прогнозна нейромережева модель зношування пари тертя струмознімання «контактний провід – струмознімальний елемент», яка дозволяє прогнозувати зношування пари тертя в залежності від змінних впливаючих факторів та параметрів, а також дозволяє враховувати невизначеності в процесі електромеханічного зношування сильнострумових контактів, які не формалізуються традиційними методами..

Адекватність розробленої нейромережевої моделі прогнозування зношування пар тертя струмознімання обґрунтована, шляхом порівняння прогнозованих даних з експериментальними, похибка прогнозування становить менше 2%.

3. Розроблені рекомендації щодо підвищення ефективності використання ресурсу пари тертя струмознімання, шляхом раціонального розміщення струмознімальних елементів за значенням твердості на полозі струмоприймача.

4. Удосконалено метод прогнозування зносу ковзного сильнострумового контакту, який відрізняється від існуючих можливістю врахування сукупності впливаючих на процес струмознімання статичних та змінних динамічних параметрів контактних підвісок і струмоприймачів, графіку споживаного струму, швидкості електрорухомого складу, параметрів струмознімальних елементів та на основі їх фізико-механічних параметрів дозволяє визначати раціональне розташування струмознімальних елементів на полозі струмоприймача для досягнення зменшення зносу як самих струмознімальних елементів, так і контактних проводів.

5. З урахуванням недоліків існуючих пристроїв та особливостей експлуатаційних умов, розроблено пристрій для визначення параметрів вуглецевих струмознімальних елементів, який дозволяє визначати місце для їх встановлення на полозі струмоприймача, завдяки реалізації в його електричній частині алгоритму методу прогнозування зносу ковзного

сильнострумового контакту.

Отримані в четвертому розділі результати розробки математичного апарату прогнозування зношування пар тертя при струмозніманні опубліковано в роботах [153, 154].

РОЗДІЛ 4

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ КОВЗНОГО СИЛЬНОСТРУМОВОГО КОНТАКТУ

4.1 Оцінка ефективності методу прогнозування зношування ковзного сильнострумового контакту

Підвищення ефективності функціонування ковзного сильнострумового контакту при використанні розробленого методу досягається шляхом зменшення зношування контактного проводу по довжині прогону, вирівнювання його зносу по висоті вздовж прогону і досягнення більш рівномірного зношування струмознімальних елементів по довжині полозу струмоприймача, що досягається розміщенням струмознімальних елементів за значенням твердості на полозі струмоприймача.

Для оцінки адекватності розробленого методу прогнозування зношування ковзного сильнострумового контакту проведено прогнозування зношування пар тертя «контактний провід – струмознімальний елемент» при використанні дворядного полозу струмоприймача, який екіпірований струмознімальними вставками типу «А» та трирядного полозу зі струмознімальними вставками типу «Б», а також дослідження на експериментальній установці для підтвердження якості прогнозування.

У відповідності до вищеописаного в розділі 3 алгоритму, було проведено прогнозування зношування струмознімальних вставок типу «А» встановлених на дворядному полозі струмоприймача, а також струмознімальних вставок типу «Б», що були розміщені на трирядному полозі. Струмознімальні вставки обралися довільно з однієї партії та розміщувалися на полозі у відповідності до схеми встановлення з ранжуванням вставок за значенням твердості (див. рис. 3.25).

Прогнозування зношування струмознімальних вставок та контактних проводів проводилися при вихідних параметрах, які приведені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Вихідні параметри системи струмознімання

Параметри	Дворядний полоз (змінний струм)	Трирядний полоз (постійний струм)
Сила натиску струмоприймача P , Н.	80	140
Сила струму в контакті I , А	200	1200
Швидкість руху електрорухомого складу V , м/с	10	10
Вологість повітря навколишнього середовища, φ , °С	50	60

При моделюванні задавалися умовою, що струмопровід закріплений жорстко, оцінку зносу контактного проводу проводили по закінченню 10 тис. проходів по ньому струмоприймачів, а оцінку зносу струмознімальних елементів при їх пробігу в 20 тис. км.

Нижче приведені зрівняльні результати прогнозування зношування контактних проводів та струмознімальних елементів типу «А» при розташуванні вставок на полозі за схемою (рис. 4.1, а) та довільно (рис. 4.1, б).

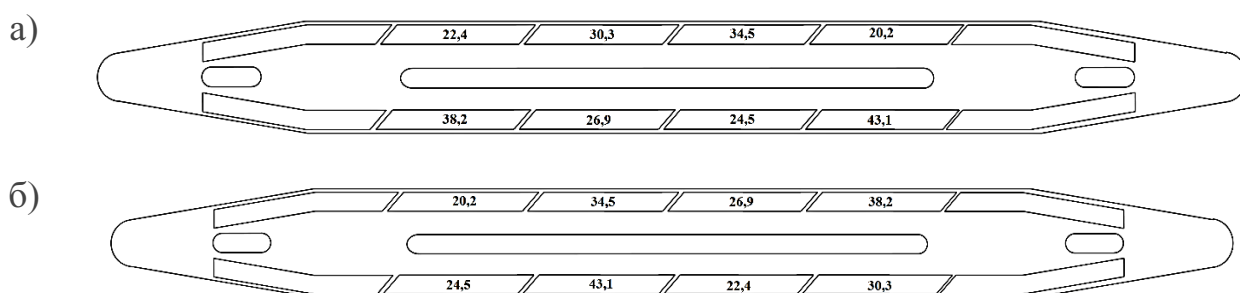


Рисунок 4.1 – Схеми полозів струмоприймачів при розміщенні вставок типу «А» за схемою (а) та довільно (б)

Параметри струмознімальних елементів типу «А», при встановленні яких на полоз струмоприймача проводилось прогнозування зношування, приведено в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Параметри струмознімальних елементів типу «А» з сортуванням за твердістю

№	Параметри струмознімальних елементів	
	<i>HВ</i>	ρ , мкОм·м
1	43,1	32,5
2	38,2	30,1
3	34,5	28,4
4	30,3	26,6
5	26,9	25,2
6	24,5	24,3
7	22,4	23,5
8	20,2	22,7

Графічне відображення результатів прогнозування зношування струмознімальних елементів типу «А» та контактних проводів приведене на рис. 4.2 – 4.4.

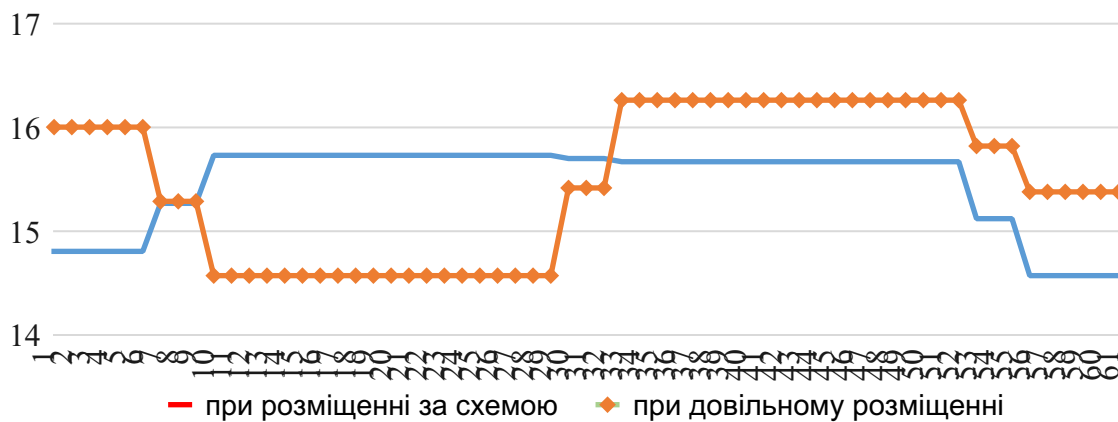


Рисунок 4.2 – Залишковий переріз вугільних вставок типу «А» першого ряду по довжині дворядного полозу струмоприймача

При прогнозуванні зношування струмознімальних елементів задавалися значенням зигзагу контактного проводу ± 300 м, що викликано необхідністю адекватного зіставлення прогнозованого зносу зі зносом контактного проводу та струмознімальних елементів в експлуатації.

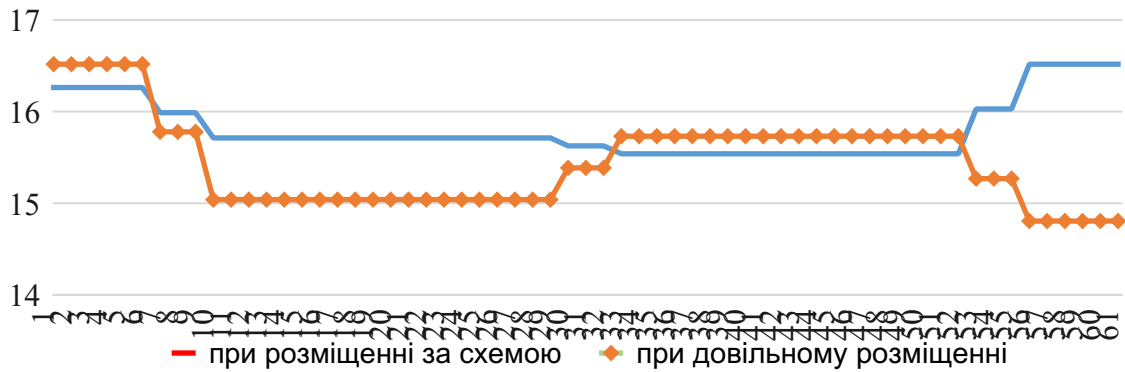


Рисунок 4.3 – Залишковий переріз вставок типу «А» другого ряду по довжині дворядного полозу струмоприймача

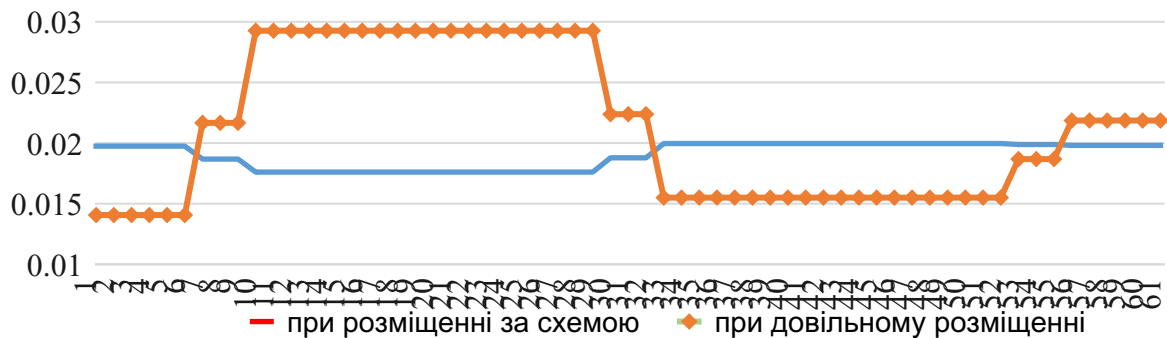


Рисунок 4.4 – Залишковий переріз контактного проводу при взаємодії з полозом струмоприймача, обладнаним вставками типу «А»

Нижче приведені зрівняльні результати прогнозування зношування контактних проводів та струмознімальних елементів типу «Б» при розташуванні вставок на полозі за схемою (рис. 4.5, а) та довільно (рис. 4.5, б).

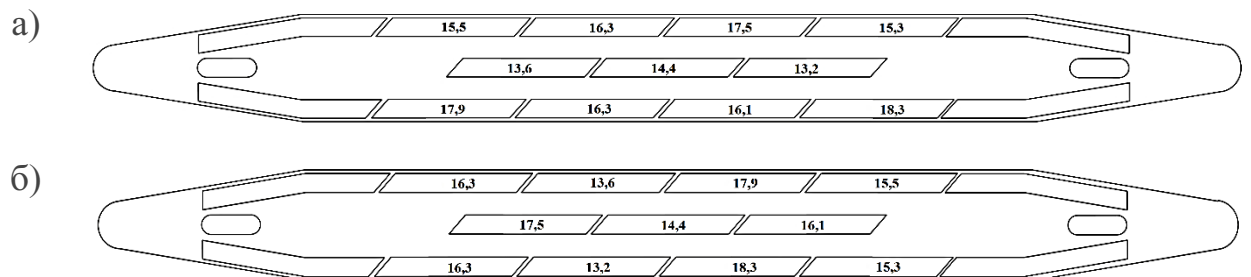


Рисунок 4.5 – Схеми полозів струмоприймачів при розміщенні вставок типу «Б»

за схемою (а) та довільно (б)

Параметри струмознімальних елементів типу «Б», при встановленні яких на полоз струмоприймача проводилось прогнозування зношування приведено в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Параметри струмознімальних елементів типу «Б» з сортуванням за твердістю

№	Параметри струмознімальних елементів	
	<i>HV</i>	ρ , мкОм·м
1	18,3	24,7
2	17,9	23,6
3	17,5	22,3
4	16,3	19,3
5	16,3	19,3
6	16,1	18,8
7	15,5	17,5
8	15,3	17
9	14,4	15,2
10	13,6	13,8
11	13,2	13,1

Графічне відображення результатів прогнозування зношування струмознімальних елементів типу «Б» та контактних проводів приведене на рис. 4.6 – 4.9.

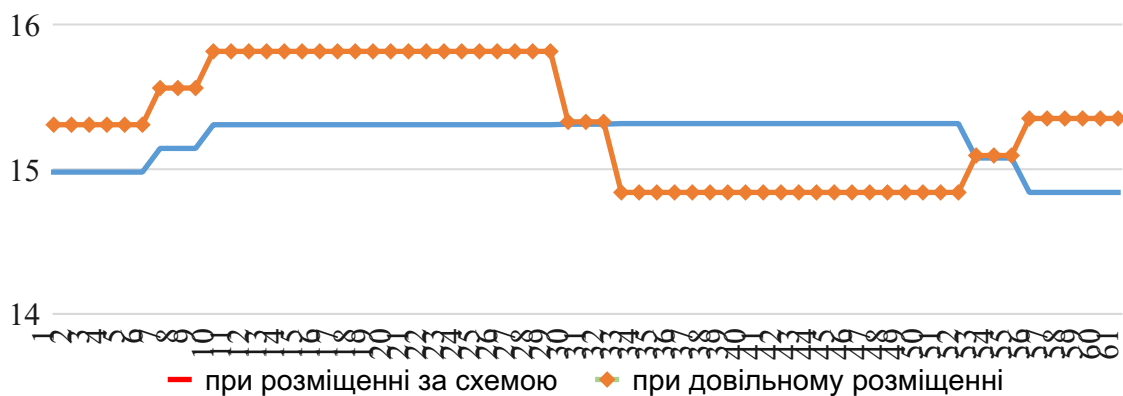


Рисунок 4.6 – Залишковий переріз вугільних вставок типу «Б» першого ряду по довжині дворядного полозу струмоприймача

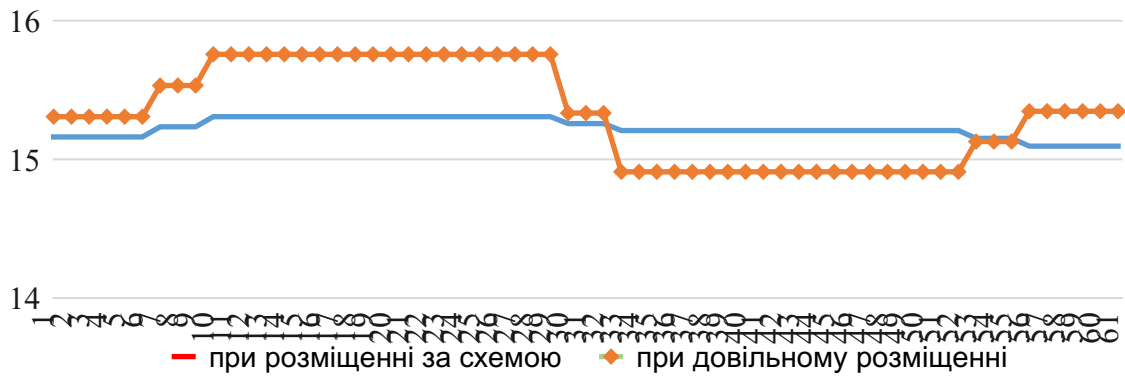


Рисунок 4.7 – Залишковий переріз вугільних вставок типу «Б» другого ряду по довжині дворядного полозу струмоприймача

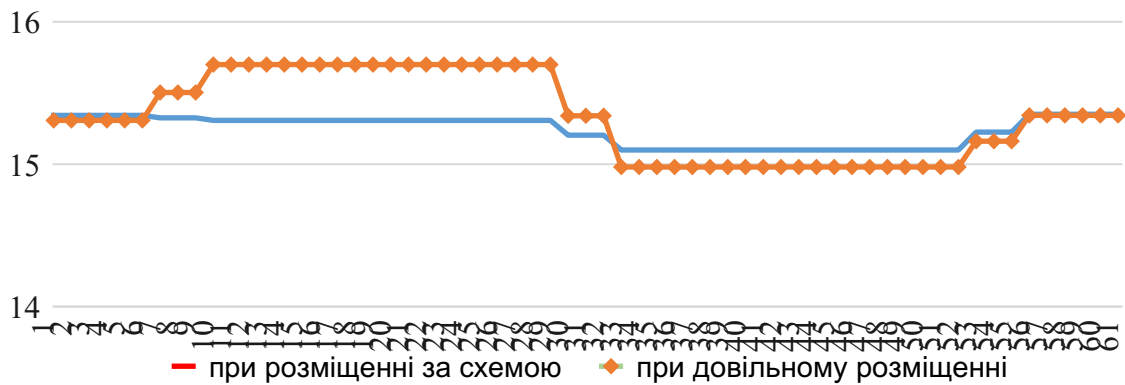


Рисунок 4.8 – Залишковий переріз вугільних вставок типу «Б» третього ряду по довжині дворядного полозу струмоприймача

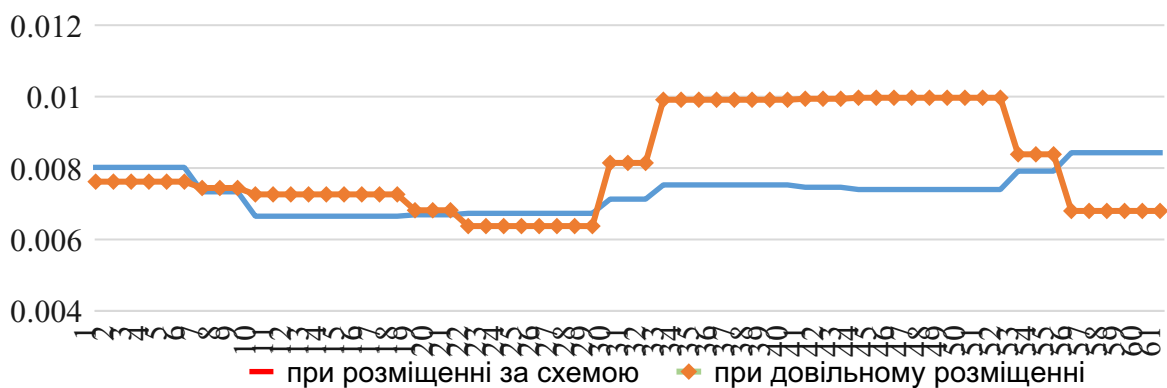


Рисунок 4.9 – Залишковий переріз контактної провід при взаємодії з полозом струмоприймача, обладнаним вставками типу «Б»

Як можна побачити з приведеного вище графічного відображення результатів прогнозування (рис. 4.2 – 4.4, рис. 4.6 – 4.9), запропонований

метод оцінки впливу параметрів системи струмознімання на процес зношування елементів пар тертя струмознімання дозволяє досягнути більш рівномірного зношування контактних проводів та струмознімальних елементів при розміщенні останніх за схемою (див. рис. 3.25), в зрівнянні з результатами прогнозування при довільному розміщенні.

Відсутність пропилив вставок на полозах струмоприймачів дозволить підвищити їх пробіг завдяки відсутності необхідності перебирання полозів з метою усунення пропилив, що позитивним чином вплине на зменшення кількості необхідних людино-годин на обслуговування одного полозу струмоприймача.

Вирівнювання по довжині прогону величини зносу контактного проводу дозволить уникнути необхідності виконання вставок контактного проводу по довжині анкерної ділянки в місцях його підвищеного зношування, кількість яких регламентуються [31] і становить для головних колій станцій і перегонів не більше дев'яти, а на ділянках зі швидкістю руху понад 160 км/год не більше чотирьох. Аналіз отриманих результатів свідчить про можливість збільшення ресурсу контактного проводу завдяки використанню методу оцінки впливу параметрів системи струмознімання на процес зношування елементів пар тертя струмознімання на 10,7% при його взаємодії зі вставками типу «А» та на 9,16% при взаємодії зі вставками типу «Б».

Запропонований метод дозволить досягти зменшення капітальних та експлуатаційних витрат на заміну і ремонт контактних проводів та полозів струмоприймачів.

Для підтвердження адекватності даних, які були отримані за допомогою використання методу прогнозування зношування ковзного сильнострумовевого контакту, на кафедрі «Інтелектуальні системи електропостачання» була розроблена експериментальна установка, що дозволяє досліджувати процес взаємодії контактних проводів зі струмознімальними елементами, які встановлені на струмоприймач ТЛ-13У, рис. 4.10.



Рисунок 4.10 – Зовнішній вигляд експериментальної установки для дослідження процесу струмознімання

Особливістю експериментальної установки для дослідження процесу струмознімання є можливість протікання постійного струму до 1500 А, зміна геометрії контактного проводу (імітація різних типів контактних підвісок), зміна сили натиску струмоприймача та імітація зустрічного повітряного потоку.

Траєкторія розташування контактного проводу на установці була визначена за методикою [155] для напівкосої контактної підвіски.

Для напівкосої контактної підвіски характерне зигзагоподібне розташування контактного проводу (рис. 4.11), яке аналітично в загальному вигляді можна описати рівнянням:

(4.1)

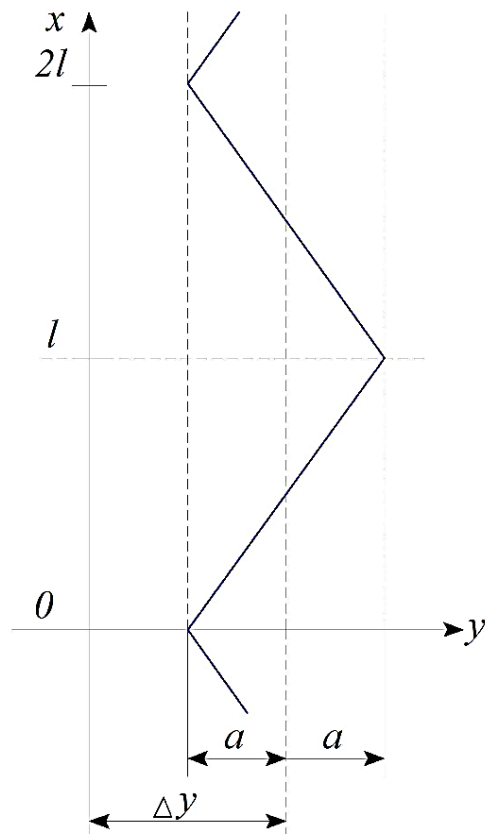


Рисунок 4.11 – Схема розташування контактної провуду напівкосої підвіски в прогоні

Інтервал періодичності в даному випадку складатиме подвоєну довжину прогону, де l – довжина прогону.

Розглянемо граничні умови розташування контактної провуду та отримаємо рівняння в загальному вигляді з використанням параметрів: l – зміщення вісі струмоприймача відносно осі обертання кільцевого ственду; a – зигзаг контактної провуду. Для першого рівняння у виразі (4.1) матимемо:

$$\begin{cases} \cos \alpha = \frac{a}{l} \\ \sin \alpha = \frac{\Delta y}{l} \end{cases}$$

Застосуємо граничні умови для другого рівняння системи (4.1):

$$\begin{aligned} &: \quad , \quad , \\ &: \quad , \end{aligned}$$

Знайдемо різницю останніх двох рівнянь, отримаємо:

$$,$$

Підставляючи отриманий коефіцієнт в одне з попередніх рівнянь, знайдемо:

Або, що теж саме:

Таким чином, рівняння (4.1) з врахуванням вищезазначеного матиме вигляд:

(4.2)

Застосуємо до рівняння (4.2) запропоноване перетворення та враховуючи, що матимемо:

спрощуючи який, отримаємо:

(4.3)

Аналізуючи отримані рівняння траєкторії в полярних координатах, можна побачити, що до жодного з них не входить такий параметр, як довжина прогону L , яка безпосередньо визначає необхідну довжину контактного проводу для монтування на кільцевому стенді. Цю довжину можливо визначити на підставі відомої формули визначення довжини кривої в полярних координатах:

(4.4)

Довжина контактного проводу для напівкосої підвіски буде визначатись за виразом:

(4.5)

(4.6)

де – відповідно, зовнішній та внутрішній діаметр кола, в яке вписується контактний провід.

Схема закріплення контактного проводу приведена на рис. 4.12.

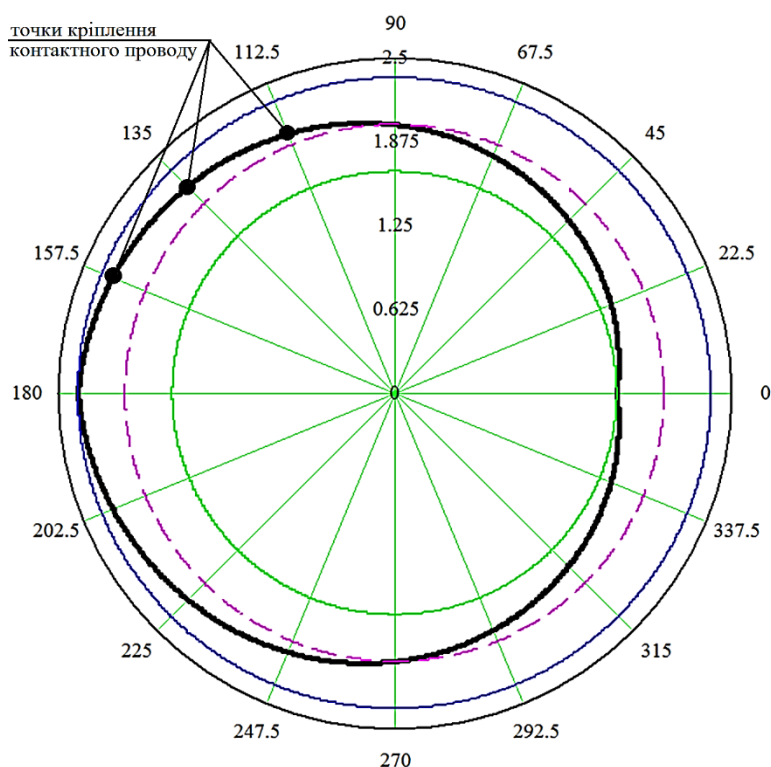


Рисунок 4.12 – Схема закріплення контактного проводу

Швидкість руху електрорухомого складу імітується обертанням колеса навколо своєї осі, а також шляхом збільшення статичного натиску струмоприймача та аеродинамічного потоку, що відповідає необхідній швидкості імітації.

Для перевірки адекватності спрогнозованих нейромережевою моделлю даних та підтвердження адекватності методу оцінки впливу параметрів системи струмознімання на процес зношування елементів пар тертя струмознімання додатково були проведені експериментальні дослідження на

зношування вставок полозів струмоприймачів та контактних проводів.

Через складність та протяжність експериментальних досліджень на установці рис. 4.10, дослідження на зношування пар тертя проводились тільки при використанні струмознімальних вставок типу «А». Висоту зносу контактного проводу, закріпленого на експериментальній установці вимірювали в п'ятидесяти п'яти точках, розміщених рівномірно по його в довжині.

При експериментальних дослідженнях струмопровід був закріплений жорстко, оцінку зносу контактного проводу проводили по закінченню 10 тис. проходів по ньому струмоприймача, а оцінку зносу струмознімальних елементів при їх пробігу в 120 км. Швидкість обертання установки становила 10 м/с, натиск струмоприймача 80 Н, вологість повітря 50%, сила струму в контакті 200 А.

При проведенні досліджень на зношування використовувались струмознімальні елементи вказані на рис. 4.1, а (розміщення за схемою). Перед дослідженням поверхню тертя контактного проводу та струмознімальних елементів зачищали, для забезпечення чистоти експерименту.

Результати експериментальних досліджень зносу струмознімальних елементів типу «А» та контактного проводу з накладеними результатами прогнозування їх зношування при відповідних умовах наведено на рис. 4.13 – 4.15.

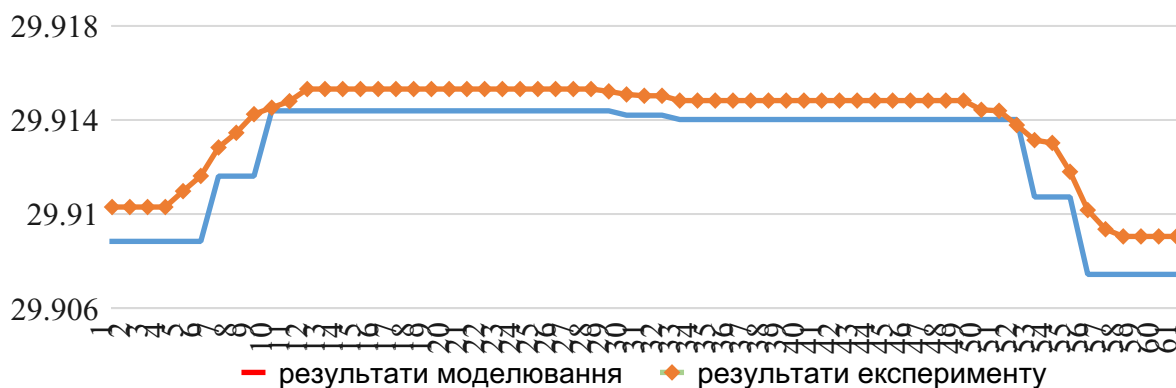


Рисунок 4.13 – Залишковий переріз вугільних вставок типу «А» першого ряду по довжині дворядного полозу струмоприймача

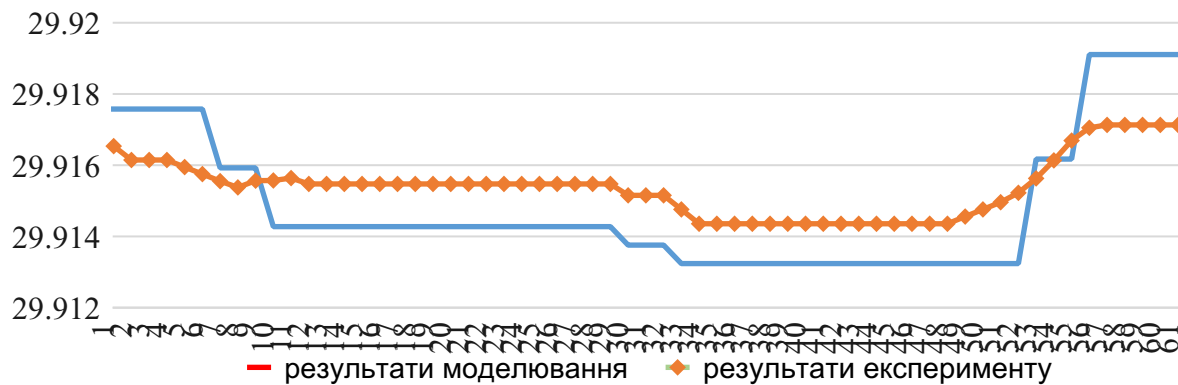


Рисунок 4.14 – Залишковий переріз вугільних вставок типу «А» першого ряду по довжині дворядного полозу струмоприймача

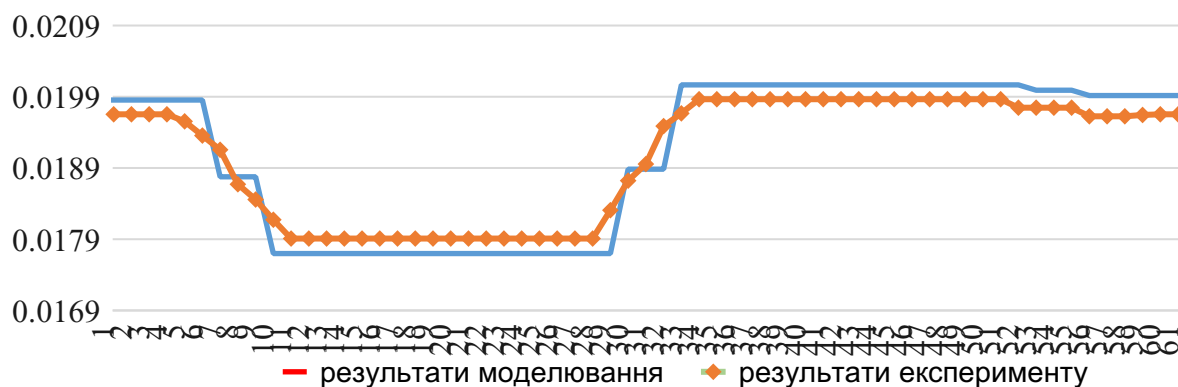


Рисунок 4.15 – Залишковий переріз контактного проводу при взаємодії з полозом струмоприймача, обладнаним вставками типу «А»

Результати представлені на рисунках 4.13 – 4.15 свідчать про якісне прогнозування зношування пар тертя струмознімання за допомогою методу прогнозування зношування ковзного сильнострумового контакту [156, 157]. Можна прослідкувати незначне відхилення результату прогнозування з експериментом, відносна похибка для яких становить: для струмознімальних вставок першого ряду 2,21%, для струмознімальних вставок другого ряду 1,31%, для контактної проводу – 1,28%.

4.2 Розрахунок економічної ефективності

В умовах реформування залізничної галузі та становлення ринкової економіки в державі стає актуальною маркетингова система управління виробництвом, котра направлена на ефективне виробництво товарів та послуг з метою отримання максимального прибутку. В таких умовах, головною метою підприємства є досягнення максимального прибутку та підвищення рентабельності роботи. Рентабельність, в свою чергу, характеризує економічну ефективність виробництва, за якої підприємство за рахунок прибутку повністю відшкодовує витрати на виробництво та отримує прибуток.

Відомо, що основною статтею витрат на залізничному транспорті є витрати на експлуатацію залізничних магістралей та рухомого складу.

Запропоновані в даній роботі заходи та методи направлені на зменшення капітальних та експлуатаційних витрат пов'язаних з сильнострумовим ковзним контактом «контактний провід – струмознімальний елемент».

Для досягнення поставленої мети були розроблені експериментальні установки, на котрих проводились дослідження та засоби математичного моделювання.

Проведені в 4 розділі розрахунки підтверджують адекватність запропонованого методу прогнозування зношування ковзного сильнострумового контакту, який дозволяє шляхом найбільш доцільного розташування струмознімальних елементів на полозі струмоприймача за твердістю досягти підвищення технічного ресурсу контактного проводу на 9-11% без втрати працездатності струмознімальних елементів та виключити появу їх пошкоджень (пропилів), які викликані нестабільністю їх міцнісних характеристик.

Використання запропонованого методу, окрім вказаних кількісних, полягають в зменшенні витрат на оплату праці обслуговуючого персоналу, за рахунок збільшення пробігів полозів струмоприймачів та інтелектуалізації процесу їх обслуговування.

Для визначення економічного ефекту від запропонованих технічних рішень та застосування запропонованого методу, в цьому розділі проведено розрахунок вартості впроваджуваних заходів та методу і розрахунок вартісної оцінки результатів від їх впровадження.

Розрахунок економічної ефективності проводився на основі співвідношення отриманого результату від запропонованих заходів та витрат на їх впровадження [158–160].

4.2.1 Визначення вартості проведення експериментальних досліджень та створення технічних засобів

До складу витрат на проведені дослідження включають витрати на обладнання та матеріали, проведення експериментів, аналіз отриманих даних та розроблення прогнозних математичних моделей.

Витрати на розробку та створення технічних засобів, програм та методик проведення експериментальних досліджень можна розділити за наступними статтями витрат:

- обладнання;
- витратні матеріали;
- амортизаційні відрахування;
- оплата електроенергії;
- заробітна плата персоналу;
- нарахування на заробітну плату;
- інші витрати.

Витрати на обладнання полягають в витратах на стендову установку, додаткове обладнання для неї та придбання ПЕОМ зі спеціалізованим програмним забезпеченням для розробки прогнозних математичних моделей. Витрати на матеріали полягають в придбанні струмознімальних елементів та контактного проводу проведення досліджень на зношування пар тертя струмознімання.

Витрати на обладнання та матеріали зведені до табл. 4.4.

Таблиця 4.4 – Вартість витрат на обладнання та матеріали

Обладнання та матеріали	Одиниця виміру	Кількість	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Експериментальна установка з додатковим обладнанням	шт	1	53000	53000
ПЕОМ	шт	1	11000	11000
Програмне забезпечення (Statistica)	шт	1	3400	3400
Струмознімальні вставки типу «А»	кг	15	360	5400
Струмознімальні вставки типу «Б»	кг	15	380	5700
Мідні струмознімальні пластини	кг	5	540	2700
Всього:				81200

Амортизаційні витрати пов'язані зі станом обладнання, його зносом та залежать від терміну його корисного використання, який був прийнятий 15 років для експериментальної установки та 10 років для ПЕОМ.

Амортизаційні відрахування розраховувались за формулою:

(4.7)

де – вартість обладнання, що використовується, грн;

– річна норма амортизації, %.

Річна норма амортизації визначалася у відповідності до терміну експлуатації обладнання, для стендової установки вона становить 7%, а для ПЕОМ – 10%.

Розрахуємо річні амортизаційні відрахування, з врахуванням різної норми амортизації для стендової установки та ПЕОМ:

грн/рік

Електрична енергія використовувалась для роботи системи освітлення приміщень, ПЕОМ та експериментальної установки. Витрати на електричну енергію розраховувались за формулою:

(4.8)

- де
- встановлена потужність, кВт;
 - кількість годин експлуатації обладнання;
 - вартість електричної енергії за кВт·год (1,68 грн);
 - коефіцієнт завантаження обладнання (прийнято).

Розрахуємо вартість спожитої обладнанням електричної енергії:

грн

Розрахунок заробітної плати працівників при проведенні досліджень та створенні прогнозної математичної моделі проводився у відповідності до існуючих середньостатистичних тарифних ставок.

Витрати часу на проведення досліджень та створення прогнозної математичної моделі були визначені на основі практичних даних.

Встановлено, що для проведення експериментальних досліджень та

створення прогнозної математичної моделі необхідний керівник робіт та інженер.

Витрати на заробітну плату розраховувались за формулою:

(4.9)

- де
- трудомісткість робіт керівника, год;
 - погодинна тарифна ставка керівника, грн (прийнято 31,64 грн);
-);
- трудомісткість робіт інженера, год;
 - погодинна тарифна ставка інженера, грн (прийнято 26,31 грн);
 - позапланові роботи, год (складає 12% від трудомісткості робіт);
 - коефіцієнт премії (прийнято 10%);
 - коефіцієнт, що враховує вислугу років (прийнято 10%).

Розрахуємо витрати на заробітну плату персоналу:

грн

Нарахування на заробітну плату складає 37,5% від загальної ЗП робітникам, за виконану роботу згідно діючого законодавства.

Нарахування на заробітну плату розраховується за формулою:

% (4.10)

Розрахуємо нарахування на заробітну плату:

грн

Експлуатаційні витрати, тобто витрати пов'язані з підтриманням в працездатному стані використовуваних систем (на протязі 5 місяців досліджень), розраховуються за формулою:

(4.11)

де – витрати на заробітну плату, грн.;

- нарахування на заробітну плату, % (становить 37,5%);
- амортизаційні відрахування, грн.;
- витрати на електроенергію, грн.;
- величина інших (позапланових) витрат (прийнята в розмірі 10% від величини витрат на матеріали та обладнання), грн.

Розрахуємо експлуатаційні витрати за час досліджень:

грн

4.2.2 Визначення вартісної оцінки результату від впровадження запропонованих заходів

Отримання економічного ефекту від впровадження запропонованих заходів досягається шляхом зменшення витрат часу та матеріальних витрат на проведення експериментальних досліджень зношування пар тертя струмознімання, підвищення ресурсу контактного проводу, збільшення пробігу полозів струмоприймачів, зменшення витрат на обслуговування струмоприймачів та контактної мережі.

На сучасних підприємствах функціонують відділи управління виробництвом, основною метою яких є забезпечення конкурентоздатності продуктованих товарів та послуг на ринку. Відділ управління виробництвом займається побудовою виробничих та організаційних

структур, вибором організаційно-правової форми управління виробництвом, збуту товарів та послуг.

В умовах локомотивних депо, в коло обов'язків таких відділів також входить вхідний контроль якості струмоznімальних елементів нормативно-технічній документації. Подібні дослідження проводяться, в середньому, чотири рази на рік. Але вищезазначені дослідження не надають якісної інформації про застосовувані вироби і не можуть охарактеризувати подальший процес взаємодії контактного проводу зі струмоznімальними елементами.

Проведення експлуатаційних досліджень на зношування пари тертя «контактний провід – струмоznімальний елемент» вимагає значних витрат часу (подекуди до року) та являються занадто затратними, іншим напрямком дослідження взаємодії пар тертя є використання спеціалізованих експериментальних установок, але їх застосування також вимагає певних капітальних та експлуатаційних витрат, альтернативою чого є застосування методу прогнозування зношування ковзного сильнострумового контакту, використання котрого дозволяє оперативно отримати об'єктивну та якісну інформацію про досліджувані елементи пари тертя.

В даному пункті проведена зрівняльна оцінка використання експериментальних установок та запропонованого методу, при умові дослідження зношування одного типу струмоznімальних елементів з врахуванням всього спектру впливаючих параметрів, як то було проведено в розділі 2.

Розрахунок зрівняльної оцінки капітальних та експлуатаційних витрат на обладнання та матеріали для створення експериментальної установки та нейромережевої моделі проведений у відповідності до формул (4.7) – (4.11) та зведений до табл. 4.5.

Таблиця 4.5 – Зрівняльні розрахунки капітальних та експлуатаційних витрат

Результати розрахунку для експериментальної установки		Результати розрахунку для нейромережових моделей	
Капітальні витрати на обладнання та матеріали:			
Витрати на обладнання та матеріали	Вартість, грн	Витрати на обладнання та матеріали	Вартість, грн
Експериментальна установка з додатковим обладнанням	53000	ПЕОМ	11000
Струмознімальні вставки	270	Спеціалізоване програмне забезпечення	3400
Всього:	52270	Всього:	14400
Річні амортизаційні відрахування, грн:			
3710		770	
Витрати на заробітну плату, грн:			
2471,948		70,72	
Нарахування на заробітну плату, грн:			
926,981		26,52	
Вартість спожитої електричної енергії, грн:			
483,538		1,008	
Експлуатаційні витрати, грн:			
12892,467		1968,248	

Розрахунок економічного ефекту від запропонованого методу прогнозування зношування пар тертя при струмозніманні визначається за формулою:

(4.12)

де – вартісна оцінка результатів від провадження заходу, грн;

– вартісна оцінка витрат на впровадження заходу, грн.

Вартісна оцінка результату від впровадження заходу визначається, як різниця вартісних оцінок на впровадження заходу і розраховується за формулою:

(4.13)

де $C_{\text{вп}}^{\text{н}}$ та $C_{\text{вп}}^{\text{з}}$ – вартісна оцінка витрат на впровадження експериментальної установки та запропонованого методу, відповідно, в грн.

Вартісна оцінка на впровадження заходу розраховується за формулою:

(4.14)

де $C_{\text{м}}^{\text{н}}$ – вартість матеріалів та обладнання для окремого заходу, грн.

Коефіцієнт економічної ефективності визначається як відношення суми приведенного результату від впроваджуваного заходу до розмірів капітальних вкладень. При $K_{\text{е}} > 1$ впроваджуваний захід можна рахувати економічно-ефективним, а в іншому випадку – неефективним. Коефіцієнт економічної ефективності розраховується за формулою:

(4.15)

Розрахунок терміну окупності запропонованого заходу відбувається за формулою:

- де – капітальні витрати на впровадження заходу, грн;
 – вартісна оцінка результатів від провадження заходу, грн.

Термін окупності представляє собою період часу від початку реалізації проекту до моменту, коли інвестиційні вливання покриваються коштами отриманими в результаті впроваджуваного заходу. Його визначення приводиться до проміжку часу, за межами котрого інтегральний ефект стане невід’ємним.

Результати розрахунку вартісної оцінки результатів від впровадження заходу, вартісної оцінки витрат на його впровадження, економічного ефекту, коефіцієнта економічної ефективності та терміну окупності зведено в табл. 4.6.

Таблиця 4.6– Результати розрахунку економічних показників

Впроваджуваний захід	, грн	, грн	, грн		, років
Нейромережеві моделі	49794,22	16368,25	33425,97	3,04	0,29

4.2.3 Розрахунок зменшення витрат від використання запропонованого методу

Існуюча проблема нерівномірного зношування струмознімальних елементів по довжині полозу струмоприймача та появи пропилів призводить до нераціонального використання струмознімальних елементів та нерівномірного зношування контактного проводу по довжині прогону – скорочується їх технічний ресурс роботи.

Під поняттям технічного ресурсу необхідно розуміти наробіток об’єкту від початку експлуатації до настання граничного стану. В якості міри тривалості експлуатації об’єкту обираються параметри, які характеризують тривалість експлуатації. Для контактних проводів таким параметром є

кількість проходів струмоприймача, а для струмознімальних елементів – пробіг в кілометрах. А в якості міри для визначення величини зносу контактних проводів та струмознімальних елементів – площа поперечного перерізу та висота, відповідно.

В зв'язку з тим, що при появі пропилів струмознімальних елементів полозу струмоприймача та їх нерівномірного зношування необхідно демонтувати полоз струмоприймача та замінювати надмірно зношені вставки, суттєво збільшуються витрати на обслуговування полозів струмоприймачів, а демонтовані вставки повторно не використовуються.

Подібна ситуація характерна для тих струмознімальних елементів, які розташовані в центральній частині полозу. При дворядному полозі і появі пропилю демонтуються щонайменше 2 вставки, при трирядному – 3, недовикористання ресурсу полозу становить 25% і 27,7% відповідно, прийємо такі ж значення і для прояви нерівномірного зношування.

Якщо повернутися до визначення технічного ресурсу, залишковий технічний ресурс можна визначити за виразом:

(4.17)

де α – залишковий ресурс, %;

β – знос в момент контролю, %.

Знос в момент контролю можна розрахувати за формулою:

(4.18)

де L_0 – міра, що характеризує розміри нового елемента;

L – міра, що характеризує знос елемента;

- міра, що характеризує мінімальні розміри елемента;
- додаткове значення, яке присвоюється за значні пошкодження, %.

Тоді, знос виробу в момент контролю, при деякому пробігу (максимальний залишковий переріз становить 20 мм) буде рівний:

Залишковий технічний ресурс, в свою чергу, буде становити:

Застосування запропонованого в 4 розділі методу прогнозування зношування ковзного сильнострумовевого контакту дозволить мінімізувати появу пропилів та нерівномірного зношування, викликану нестабільністю міцнісних характеристик струмознімальних елементів, що дозволить підвищити ресурс полозу струмоприймача на 25%.

Для визначення ефекту від застосування запропонованого методу необхідно задатися деякими вихідними показниками. Витрати часу на екіпірування полозу струмоприймача з його повним перебиранням займає слюсаря близько однієї години, приймемо погодинну тарифну ставку для оплати його праці рівну 22,6 грн. Приймемо середньорічну кількість замінених полізів рівну 500 шт, також необхідно встановити кількість часу, необхідного для перевірки якості виготовлення струмознімальних елементів та розташування їх за схемою, приймемо це значення рівним 100 годин.

Необхідно зауважити, що поява вказаних пошкоджень характерна для половини усіх полізів, що встановлюються (250 шт). Якщо пробіг полізів струмоприймача буде збільшено на 25%, то кількість часу на обслуговування полізів струмоприймачів за той самий період експлуатації скоротиться також на 25% так само як і кількість необхідних для заміни струмознімальних

елементів (500 струмознімальних вставок, проти 375 при застосуванні запропонованого методу).

Задаємося умовою, що кількість годин використання допоміжного обладнання для проведення ремонту становить 250 годин, а встановлена потужність електричного обладнання становить 1,5 кВт.

Встановлена потужність пристрою для визначення параметрів вугільних струмознімальних елементів становить 50 Вт, а час його експлуатації становить 100 год (у відповідності до часу, необхідного для перевірки якості виготовлення струмознімальних елементів).

Зрівняльні розрахунки капітальних та експлуатаційних витрат на екіпірування 250 полозів струмоприймачів вугільними струмознімальними елементами зведені до табл. 4.7.

Таблиця 4.7 – Зрівняльні розрахунки капітальних та експлуатаційних витрат на обслуговування полозів та заміну вставок

Результати розрахунку при наявних умовах		Результати розрахунку з використанням запропонованого методу	
Капітальні витрати на обладнання та матеріали:			
Витрати на обладнання та матеріали	Вартість, грн	Витрати на обладнання та матеріали	Вартість, грн
Струмознімальні вставки типу «А» для заміни пошкоджених на 250 полозах струмоприймачів (з розрахунку 2 вставки на полоз)	126000	Витрати на заміну пошкоджених струмознімальних вставок відсутні	-
		Пристрій для визначення параметрів вугільних струмознімальних елементів	5000
Всього:	126000	Всього:	5000
Річні амортизаційні відрахування, грн:			
-		350	
Витрати на заробітну плату, грн:			
7656,88		3062,752	
Нарахування на заробітну плату, грн:			
2871,33		1148,532	
Вартість спожитої електричної енергії, грн:			
378		5,04	
Експлуатаційні витрати, грн:			

23506,21	4566,324
----------	----------

Результати розрахунку вартісної оцінки результатів від впровадження заходу, вартісної оцінки витрат на його впровадження, економічного ефекту, коефіцієнта економічної ефективності та терміну окупності зведено в табл.4.8.

Таблиця 4.8– Результати розрахунку економічних показників

Впроваджуваний захід	,грн	,грн	, грн		, років
Метод прогнозування зношування ковзного сильнотривового контакту	139939,89	9566,32	130373,56	14,63	0,1

Як було показано в 4 розділі, застосування методу прогнозування зношування ковзного сильнотривового контакту може підвищити ресурс контактного проводу на 9–11%, але оцінити результат від цього віддаленого ефекту, в експлуатації досить складно.

Проведені техніко-економічні розрахунки показали, що запропоновані в даній роботі заходи, котрі направлені на зменшення капітальних та експлуатаційних витрат пов'язаних зі сильнотривовим контактом «контактний провід – струмознімальний елемент» являються економічно-доцільними.

Висновки до розділу 4

1. Проведені експериментальні дослідження на зношування вставок полозів струмоприймачів та контактних проводів свідчать про адекватність методу прогнозування зношування ковзного сильнотривового контакту. Відносна похибка прогнозування становить: для струмознімальних вставок першого ряду 2,21%, для струмознімальних вставок другого ряду 1,31%, для контактного проводу – 1,28%. Незначні розходження результатів прогнозування та експерименту пояснюється неможливістю врахування

усього спектру впливаючих факторів на процес зношування.

2. Запропонований метод прогнозування зношування ковзного сильнострумowego контакту дозволяє досягнути більш рівномірного зношування контактних проводів та струмознімальних елементів при розміщенні останніх за схемою, в зрівнянні з результатами прогнозування при довільному розміщенні.

Мінімізація появи пропилів вставок по довжині полозу струмоприймача дозволить підвищити їх пробіг завдяки відсутності необхідності перебирання полозів з метою усунення пропилів, що позитивним чином вплине на зменшення кількості необхідних людино-годин на обслуговування одного полозу струмоприймача.

Вирівнювання по довжині прогону величини зносу контактного проводу дозволить уникнути необхідності виконання вставок контактного проводу по довжині анкерної ділянки в місцях його підвищеного зношування

Аналіз отриманих результатів свідчить про можливість збільшення ресурсу контактного проводу завдяки використанню методу прогнозування зношування ковзного сильнострумowego контакту на 10,7% при його взаємодії зі вставками типу «А» та на 9,16% при взаємодії зі вставками типу «Б». Та дозволить мінімізувати появу пропилів та нерівномірного зношування струмознімальних елементів полозу струмоприймача, викликану нестабільністю їх міцнісних характеристик, що дозволить підвищити ресурс полозу струмоприймача на 25%.

3. Обґрунтована доцільність застосування прогнозних нейромережових моделей замість проведення тривалих в часі експериментальних досліджень, економічний ефект для чого становить 33,4 тис. грн при виконанні приведеного в роботі об'єму досліджень.

Виконані в даному розділі розрахунки показують, що економічний ефект від використання методу прогнозування зношування пар тертя струмознімання в умовах одного локомотивного депо може становити

130 тис. грн/рік, а орієнтовний термін окупності складає менше одного року. Запропонований метод є ефективним та гнучким апаратом, котрий забезпечує можливість адекватного реагування на зміни параметрів системи струмознімання.

Отримані в четвертому розділі результати опубліковано в роботах [153, 154, 156].

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на основі викладених теоретичних та експериментальних досліджень вирішена актуальна науково-прикладна задача удосконалення взаємодії елементів сильнострумового контакту електротранспорту шляхом врахування фізико-механічних параметрів струмознімальних елементів.

Основні наукові результати, висновки та практичні рекомендації полягають в наступному.

1. Аналіз стану якості струмознімання на електрифікованому транспорті показав, що найбільша кількість відмов проводів та тросів контактної мережі електрифікованого залізничного транспорту приходить на контактні проводи і складає 49,8 % від загальної. Питома пошкоджуваність контактної мережі в порівнянні з 2004 роком збільшилась на 20,5 %, а бальна оцінка її стану погіршилась в 2 рази. Розгорнута довжина ділянок контактної мережі, що знаходиться в експлуатації понад 40 років станом на 2020 рік становитиме більше 80% від загального. Аналіз роботи полозів струмоприймачів показує, що їх заміна за граничним зносом струмознімальних елементів проводиться тільки у 18 % випадків. Основні причини виходів з ладу пов'язані з нерівномірним зносом струмознімальних елементів (28 %) та пропилами з підпалами (24 %).

2. Розроблено методики для визначення параметрів струмознімальних елементів та проведення експериментальних досліджень на знос пари тертя струмознімання, експериментальні установки для дослідження процесу струмознімання. Розроблено пристрій для визначення параметрів вуглецевих струмознімальних елементів.

3. Встановлений статистичний взаємозв'язок та описаний аналітичним виразом лінійної регресії між твердістю та питомим електричним опором вуглецевих струмознімальних елементів. Розкрито негативний вплив розкиду основних фізико-механічних параметрів вуглецевих струмознімальних елементів на інтенсивність зносу пари тертя струмознімання в умовах експлуатації. Розкид

мінімального і максимального значення твердості для вуглецевих струмоznімальних елементів типу «А» становить 30%, а для типу «Б» 37%.

4. На основі експериментальних досліджень отримані залежності зносу контактного проводу та струмоznімальних елементів від сукупності впливаючих факторів. Результати повного факторного експерименту підтверджують важливість врахування на процес зносу сильнострумowego контакту таких факторів як: сила натиску, сила струму в контакті, твердість струмоznімальних елементів та вологість навколишнього середовища.

Встановлено, що досягти підвищення якості струмоznімання можливо шляхом стабілізації динамічних параметрів взаємодіючих в процесі струмоznімання систем, а також забезпечивши відповідність параметрів струмоznімальних елементів конкретним експлуатаційним умовам.

5. Розроблені прогнозні математичні моделі зносу пари тертя «контактний провід – струмоznімальний елемент», які враховують сукупність впливаючих факторів на процес зносу пари тертя струмоznімання «контактний провід – струмоznімальний елемент» та враховують невизначеності в процесі електромеханічного зносу сильнострумowych контактів, які не формалізуються традиційними методами. Адекватність прогнозних математичних моделей обґрунтована шляхом порівняння прогнозованих даних з експериментальними, похибка прогнозування становила менше 2%.

6. Удосконалений метод прогнозування зносу ковзного сильнострумowego контакту, який враховує фізико-механічні параметри струмоznімальних елементів та сукупність впливаючих на процес струмоznімання параметрів, для визначення раціонального розташування струмоznімальних елементів на полозі струмоприймача. Шляхом зрівняння даних отриманих при прогнозуванні та при експериментальних дослідженнях було встановлено, що відносна похибка прогнозування для методу прогнозування зносу ковзного сильнострумowego контакту становить менше 3%.

Аналіз отриманих результатів свідчить, що застосування запропонованого методу в експлуатації дозволить досягти зменшення зносу контактного проводу

на 9...10% та збільшити пробіг полізів струмоприймачів на 25%.

7. Обґрунтована доцільність застосування прогнозних нейромережових моделей замість проведення тривалих в часі експериментальних досліджень, економічний ефект для чого становить 33,4 тис. грн при виконанні приведенного в роботі об'єму експериментальних досліджень на знос сильнострумових ковзних контактів.

Економічний ефект від використання методу прогнозування зносу ковзного сильнострумового контакту в умовах одного локомотивного депо може становити 130 тис. грн/рік, а орієнтовний термін окупності складає менше одного року. Запропонований метод є ефективним та гнучким апаратом, котрий забезпечує можливість адекватного реагування на зміни параметрів системи струмознімання.

БІБЛІОГРАФІЯ

1. Ю. Е. Купцов, *Увеличение срока службы контактного провода*. Москва, Россия: Транспорт, 1972.
2. А. В. Фрайфельд, та Б. Г. Брод, *Проектирование контактной сети*, Москва, Россия: Транспорт, 1991.
3. Ю. Е. Купцов, *Беседы о токоъеме и его надежности, экономичности и о путях совершенствования*. Москва, Россия: Модерн – А, 2001.
4. С. М. Колесов, та И. С. Колесов, *Материалы и взаимодействие контактной подвески и токоприемника*. Днепропетровск, Украина, ДНУЖТ, 2006.
5. В. Я. Берент, *Материалы и свойства электрических контактов в устройствах железнодорожного транспорта*. Москва, Россия: Интекст, 2005.
6. И. С. Гершман, Ю. Л. Большаков, та В. Г. Сыченко, «Совместимость различных токоъемных материалов на одном участке контактного провода», *Залізничний транспорт України*, №5, с. 56 – 59, 2008.
7. Ю. Е. Купцов, «Исследование некоторых физико-технических характеристик и служебных свойств угольных вставок», *Труды ЦНИИ МПС.*, Вып. 233, с. 67 – 84, 1962.
8. F. Kiessling, R. Puschmann, A. Schmieder, and E. Schneider, *Contact Lines for Electric Railways: Planning, Design, Implementation, Maintenance*, Second Edition, Erlangen, Germany, Wiley, John & Sons, 2009.
9. G. Bucca, and A. Collina, «Procedure for the wear prediction of collector strip and contact wire in pantograph–catenary system», *Elsevier, Wear* 266, p. 46 – 59, 2009.
10. Wu. Guangning, Wei1 Wenfu, Gao1 Guoqiang, Jie Wu1, and Yue Zhou1, «Evolution of the electrical contact of dynamic pantograph–catenary system», *Transport*, № 24 (2), p. 132 – 138, 2016.

11. J. H. Lee, and T. W. Park, «Development and Verification of a Dynamic Analysis Model for the Current-Collection Performance of High-Speed Trains Using the Absolute Nodal Coordinate Formulation», *Trans. Of the KSME*, № 36(3), p. 339-346, 2012.
12. N. Zhou, and W. Zhang, «Investigation on dynamic performance and parameter optimization design of pantograph and catenary system», *Finite Elements in Analysis and Design*, №47, p. 288 – 295, 2011.
13. И. А. Беляев, та В. А. Вологин, *Взаимодействие токоприемников и контактной сети*. Москва, СССР, Транспорт, 1983.
14. В. Л. Бидерман, *Прикладная теория механических колебаний*. Москва, СССР, Высшая школа, 1972.
15. В. А. Вологин, *Взаимодействие токоприемников и контактной сети*, Москва, Россия: Интекст, 2006.
16. В. М. Павлов, А. Г. Галкин, В. Н. Финиченко и др., «Условия и предпосылки получения фактических параметров и характеристик контактных подвесок в ходе проведения линейных испытаний», *Транспорт Урала*, № 3, с. 51 – 53, 2007.
17. H. Ebeling, «Stromabnahme bei hohen Geschwindigkeiten», *Elektrische Bahnen*, №67, p. 26 – 29 und 60 – 66, 1969.
18. F. Kiessling, R. Puschmann, A. Schmieder, «*Contact lines for Electric Railways*», *Planning, Design and Implementation*, Erlangen, Germany, MCC-Verlag, 2001.
19. В. Н. Яндович, В. Г. Сыченко, и А. В Антонов, «Сравнительный анализ контактных подвесок в странах Евросоюза и Украины: организация надежного токосъема», *Електрифікація транспорту*, № 7, с. 67–77, 2014.
20. А. В. Антонов, «Підвищення ресурсу вугільних струмознімальних вставок струмоприймачів електрорухомого складу», в матеріалах VII Міжнародної науково-практичної конференції «Електрифікація транспорту» «Транселектро», Одеса, 2014, с. 62.

21. Decisions 1301/2014/EU: Technical specifications for interoperability relating to the energy subsystem of the rail system in the Union. In: *Official Journal of The European Communities*, No. Reg 1301/2014.
22. Разработано совещанием экспертов V Комиссии 29-31 мая 2001 г, *ОСЖД Р-610/7 «Общие технические требования к системам тягового электроснабжения постоянного и переменного тока скоростных и высокоскоростных линий»*.
23. П. Г. Тюрнин, и Н. В., Миронос *Обеспечение качественного токосъёма. Токосъем и тяговое электроснабжение при высокоскоростном движении на постоянном токе*, сб. науч. тр. ОАО «ВНИИЖТ», Москва, РФ, Интекст, 2010.
24. *ГОСТ 32680 – 2014 «Токосъемные элементы контактные токоприемников электроподвижного состава»*, Москва, РФ, Стандартиформ, 2015.
25. Р. Хольм, *Электрические контакты*, Москва, СССР, Издательство иностранной литературы, 1961.
26. И. Б. Крагельский, *Трение и износ*. Москва, СССР, Машиностроение, 1968.
27. Ф. П. Боуден, Д. Тейбор, *Трение и смазка твердых тел.*, Москва, СССР, Машиностроение, 1968.
28. *«Аналіз роботи господарства електрифікації та електропостачання»* (за роками 2005-2015), Київ, Україна, Укрзалізниця, 2006-2016.
29. В. О. Дьяков, А. В. Антонов, С. Ю. Малинка, *Захист нейтральних вставок контактної мережі від перепалів*, *Електрифікація транспорту*, №12, с. 64 – 70, 2016.
30. А. В. Антонов, *«Аналіз пошкоджуваності струмоприймачів швидкісних електропоїздів»*, тези доповідей *VII Міжнародної науково-практичної конференції «Безпека та електромагнітна сумісність на залізничному транспорті» (S&EMC)*, Розлуч, 2016, с. 5 – 6.

31. ЦЕ – 0023 «Правила улаштування та технічного обслуговування контактної мережі електрифікованих залізниць», Київ, Україна, Укрзалізниця, 2008.
32. № ЦТ-ЦЕ-0077 «Інструкція про порядок дій локомотивних бригад і працівників дистанцій електропостачання при пошкодженнях струмоприймачів, контактної мережі та комісійному їх розгляді», Київ, Україна, Укрзалізниця.
33. В. Д. Ногин, *Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход*. Москва, РФ, ФИЗМАТЛИТ, 2005.
34. В. В. Подиновский, и В. Д. Ногин, *Парето-оптимальные решения многокритериальных задач*. – Москва, СССР, Наука, 1982.
35. Ю. Л. Большаков, та А. В. Антонов, «Дослідження властивостей струмознімальних елементів та їх впливу на ефективність роботи трибосистеми «контактний провід – вугільна вставка», *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту*, № 6, с. 35 – 44, 2015.
36. В. А. Загорский, В. Ф. Путько, и Р. Ф. Насретдинов, «Анализ взаимодействия токоприемников подвижного состава и контактных проводов», *Вестник транспорта Поволжья*, №4. с. 24 – 27, 2012.
37. В. Я. Берент, «Изучение причин повреждений проводов электрифицированного транспорта», *Экспресс-информация. Ж.-д. транспорт за рубежом*, ЦНИИТЭМ МПС, Вып. 6. Сер. 111. с. 19 – 26.
38. М. Е. Павличенко, «Совершенствование конструкции верхнего узла токоприемника», *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту*, №24, с.78 – 79, 2008.
39. Ю. Е. Купцов, «Применение угольных вставок на токоприемниках электроподвижного состава», *Труды ЦНИИ МПС*, Вып. 337, с. 4 – 25, 1968.

40. В. Я. Берент, В. М. Рудрановский, И. Я. Сегал, «Анализ износа контактных проводов и пластин токоприемников на железных дорогах Японии (по материалам японских журналов Дэнки Тэцудо)», *Экспресс-информация. Ж.-д. транспорт за рубежом, ЦНИИТЭИ МПС*, Вып. 3, сер 111, с. 22 – 32, 1978.
41. В. Я. Берент, и В. М. Рудановский, «Опыт разработки, испытаний и эксплуатации контактных пластин из спеченного материала в Японии», *Экспресс-информация. Ж.-д. транспорт за рубежом, ЦНИИТЭИ МПС*, Вып. 3, Сер. 11, с. 13 – 32, 1978.
42. Л. И. Бершадский, *Структурная термодинамика трибосистем*, Киев, Украина, «Знание», 1990.
43. Б. И. Костецкий, И. Г. Носовский, и Л. И. Бершадский, *Поверхностная прочность материалов при трении*, Киев, СССР, Техника, 1976.
44. В. Е. Klamecki, «Energy Dissipation in Sliding», *Wear* 77 (1982), № 2, p. 115 – 128.
45. И. С. Гершман, и Н. А. Буше, «Реализация диссипативной самоорганизации поверхностей трения в трибосистемах», *Трение и износ*, т. 16, № 1, с. 61 – 70, 1995.
46. П. Гленсдорф, и И. Пригожин, *Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций*, Москва, СССР, Мир, 1973.
47. И. С. Гершман, Н. А. Буше, «Неустойчивость системы с токосъемом в процессе самоорганизации», *Трение и износ*, т. 20, № 6, с. 623 – 629, 1999.
48. И. С. Гершман, С. М. Трушевский, та А. В. Шумицкий, «Роль углерода в самоорганизации процесса изнашивания сильноточных скользящих электрических контактов», *Трение и износ*, т. 23, № 5, с. 520 – 523, 2002.
49. И. С. Гершман, и Н. В. Пенский, «Исследование закономерностей образования вторичных структур в условиях трения с токосъемом», *Трение и износ*, т. 16, № 1, с. 126 – 131, 1995.

50. И. С. Гершман, Н. А. Буше, В. Я. Берент, «Термодинамические аспекты существования устойчивых вторичных структур на поверхности сильноточных скользящих контактов», *Трение и износ*, т. 10, № 2, с. 225 – 232, 1989.
51. Ю. Л. Большаков, и А. В. Антонов, «Підвищення ресурсу вугільних струмознімальних вставок струмоприймачів швидкісного електрорухомого складу в умовах експлуатації», *Наука та прогрес трансп. Вісн. Дніпропетр. Нац. ун-ту залізн. трансп.*, № 4, с. 57 – 70, 2015.
52. S. Kubo, and H. Tsuchiya, Wear properties of metal-impregnated carbon fiber-reinforced carbon composite sliding against a copper plate under an electric current, *World Tribology Congress III*. – 2005.
53. H. Schmidt, and A. Schmieder, «Current collection for high-speed transport», *Elektrische Bahnen*, №4, p. 79 – 84, 2005.
54. Д. А. Ефимов, «Определение параметров контактной пары «токоприемник – контактный провод», *Транспорт Урала*, №4, с.72 – 75, 2014
55. А. В. Плакс, «Колебания токоприемника и контактной подвески при высоких скоростях движения на электрифицированных железных дорогах», *Электромеханика. Известия ВУЗов. СПб.*, № 3, с. 44 – 55, 1959.
56. А. В. Плакс, «Влияние параметров контактной подвески на колебания токоприемника при высоких скоростях движения», *Сборник трудов Ленинградского ин-та инж. ж.-д. транспорта. СПб.*, Трансжелдориздат, Вып. 177, с. 9 – 14, 1961.
57. Л. Паскуччи, «Колебания контактной подвески электрифицированных железных дорог при высоких скоростях движения», *Ежемес. бюл. Междунар. ассоциации ж.-д. конгрессов*, № 2, с. 44 – 54, 1969.
58. K. Tsuchiya, «The dynamic behavior of overhead centenary wire systems», *Quarterly Reports of the Railway Technical Research Institute*, v. 10, № 4, p. 207, 1969.

59. И. А. Беляев, Взаимодействие токоприемника и контактной сети при высоких скоростях движения, Москва, СССР, Транспорт, 1968.
60. Е. В. Кудряшов, *Совершенствование механических расчетов контактных подвесок на основе статических конечноэлементных моделей*, Дис. канд. техн. наук, 05.22.07, СПб., 2010.
61. П. С. Лившиц, *Справочник по щеткам электрических машин*, Москва, СССР, Энергоатомиздат, 1983.
62. S. Aoki, and F. Fukuhara, «Effect of Material Combination of Metallic Contact Strip and Contact Wire on Wear Characteristics», *Quarterly Report of RTRI*, vol. 38, No 2, p. 82 – 88, 1997.
63. S. Kubo, H. Tsuchiya, and J. Ikeuchi, «Wear Properties of Metal/Carbon Composite Pantograph Sliders for Conventional Electric», *Quarterly Report of RTRI*, vol. 38, № 1, p. 25 – 30, 1997.
64. M. Iwase, T. Saito, and J. Kokubo, «Contact strip of pantograph for the new Tokaido line – problems an laboratory tests», *Quarterly Report of RTRI*, vol. 6, №1, p. 5 – 10, 1965.
65. В. Я. Берент, С. А. Гнездилов, и А. С. Богатов, «Порошковые контактные пластины на медной основе в биметаллическом исполнении», *Вестник ВНИИЖТ*, №6, с.19 – 25, 2008.
66. Ю. Л. Большаков, В. Г. Сыченко, и С. М. Жуковин, «Современные подходы к производству углеродных контактных вставок электроподвижного состава», *Залізничний транспорт України*, № 3/2, с. 64 – 67, 2005.
67. Ю. Л. Большаков, И. С. Гершман, та В. Г. Сыченко, «Перспективные направления создания современных углеродных материалов для вставок токоприемников электротранспорта», *Електрифікація транспорту*, №5, с. 19 – 23, 2013.
68. А. В. Антонов, «Надійність системи «контактний провід – струмознімальний елемент», в матеріалах 74-тої Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного

транспорту», Дніпропетровськ, 2014, с. 147.

69. И. С. Гершман, Л. М. Бучнев, «Токоємные углеродные материалы нового поколения», *Вестник ВНИИЖТ*, №6, с. 21 – 27, 2003.

70. В. Я. Берент, «Перспективы улучшения работы сильноточного скользящего контакта «контактный провод – токоємный элемент полоза токоприемника», *Железные дороги мира*, № 10, 2002.

71. И. С. Гершман, «Токоємные углеродно-медные материалы», *Вестник ВНИИЖТ*, №5, с.15 – 20, 2002.

72. И. С. Гершман, Е. И. Гершман, и П. Г. Тюрнин, «Исследование свойств и характеристик графито-медных материалов с модифицированным графитом», *Вестник ВНИИЖТ*, №3, с.43 – 48, 2013.

73. Ю. Е. Купцов, *Опыт применения угольных вставок пантографов*, Москва, СССР, Транспорт, 1966.

74. Ю. Л. Большаков, И. С. Гершман, и В. Г. Сыченко, «К вопросу выбора рациональной формы профиля контактных вставок токоприемников электроподвижного состава», *Залізн. трансп. України*, № 3, с. 53–54, 2007.

75. С. М. Жуковин, Е. И Власов, «Токоємный элемент токоприемника электрического транспортного средства», *Пат. 2168422 РФ, МПК⁷ В 60 L 5/08, № 2229395; 27.05.2004.*

76. М. Н. Самодурова, Л. А Барков, , «Токоємный элемент электрического транспортного средства», *Пат. 2229395 РФ, МПК⁷ В 60 L 5/08 № 2002135796/282002135795/26; 27.05.2004.*

77. O. Kasperowski, «Kontaktwerkstoffe fur Stromabnehmer elektrische Fahrzeuge», *El. Bahnen*, № 8, 1963.

78. С. Н. Колесов, и Н. В. Клименко «Улучшение динамических характеристик токоприемников», *Наука та прогрес трансп. Вісн. Дніпропетр. Нац. ун-ту залізн. трансп.*, №8, с.45 – 48, 2005.

79. А. В. Антонов, «Определение направлений повышения эффективности работы системы «контактный провод – токоприемник» при

внедрении скоростного движения», *Наука и транспорт. Вестник Белорусского Государственного университета транспорта*, №1 (34), с. 14 – 17, 2017.

80. А. В. Антонов, «Підвищення надійності вставок струмоприймачів електрорухомого складу», в матеріалах *V Міжнародної науково-практичної конференції «Енергозбереження на залізничному транспорті та в промисловості»*, Воловець, 2014, с. 45.

81. *ГОСТ 23273 – 78 Металлы и сплавы. Измерение твердости методом упругого отскока бойка (по Шору)*, Москва, СССР, Государственный комитет СССР по стандартам, 1978.

82. *ГОСТ 9012 – 59 Металлы и сплавы. Измерение твердости по Бринеллю*. Москва, СССР, Издательство стандартов, 1960.

83. *ГОСТ 28840-90 Машины для испытания материалов на растяжение, сжатие и изгиб*, Москва, СССР, ИПК Издательство стандартов, 1990.

84. *ГОСТ 23776 – 79 Изделия углеродные. Методы измерения удельного электрического сопротивления*, Москва, СССР, Государственный комитет СССР по стандартам, 1986.

85. В. Н. Ли, и С. Н. Химухин «*Неразрушающий контроль элементов контактной сети и токоприемников электроподвижного состава электрифицированных железных дорог*», Хабаровск, Россия, ДВГУПС, 2007.

86. В. Н. Ли, П. В. Костюк, и С. Н. Химухин, «Разработка методов контроля угольных вставок токоприемников», *Контроль. Диагностика*, № 6 (96), с. 20 – 23, 2006.

87. А. В. Антонов, В. О. Манко, «Діагностування вугільних вставок як засіб ресурсозбереження», в матеріалах *VI Міжнародної науково-практичної конференції «Енергозбереження на залізничному транспорті та в промисловості»*, Воловець, 2015, с. 6.

88. Б. И. Костецкий, *Трение, смазка и износ в машинах*, Киев, Украина, *Техніка*, 1970.
89. И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, и В. С. Комбалов, *Основы расчетов на трение и износ*, Москва, СССР, Машиностроение, 1977.
90. В. А. Балакин, *Трение и износ при высоких скоростях скольжения*, Москва, СССР, Машиностроение, 1980.
91. И. В. Крагельский, и Михин Н. М., *Узлы трения машин. Справочник*. Москва, СССР, Машиностроение, 1984.
92. И. В. Крагельский, А. В. Чичинадзе, И. М. Любарский и др., *Исследование структуры фрикционных материалов при трении*, Москва, СССР, Наука, 1972.
93. О. А. Сидоров, *Системы контактного токосъема с жестким токопроводом*, Монография, Москва, РФ, Маршрут, 2006.
94. С. А. Ступаков, и В. М. Филиппов «Моделирование износа контактных пар устройств токосъема монорельсового электрического транспорта», *Известия Транссиба*, № 3 (7), с. 43-52, 2011.
95. И. С. Гершман, Н. В. Миронос, М. А. Мельник, и Е. И. Гершман, «Токосъемные вставки для токоприемников железнодорожного транспорта», *Вестн. ВНИИЖТа*, № 4, с. 3–10, 2012.
96. G. Auditeau, «Carbon of high destiny for current collection», *Revue Generale des Chemins de Fer*, № 200, p. 9–19, 2010.
97. Ю. Л. Большаков, та А. В. Антонов, «Діагностування вугільних струмознімальних вставок в умовах експлуатації», *Електрифікація транспорту*, №9, с. 15 – 22, 2015.
98. ГОСТ 8074-82 *Микроскопы инструментальные. Типы, основные параметры и размеры. Технические требования*. Москва, СССР, Государственный комитет СССР по стандартам, 1984.
99. А. В. Антонов, «Підвищення ефективності роботи вугільних струмознімальних вставок струмоприймачів електрорухомого складу», в матеріалах VIII Міжнародної науково-практичної конференції «Електрифікація

залізничного транспорту» «Транселектро-2015», Одеса, 2015. с. 91.

100. Богородицкого Н. П., и Пасынкова В. В., *Справочник по электротехническим материалам*, Москва, СССР, Госэнергоиздат, том II, 1960.

101. Ю. П. Адлер, *Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий*, Москва, СССР, Наука, 1976.

102. Ч. Хикс, *Основные принципы планирования эксперимента*, Москва, СССР, 1967.

103. Ю. П. Адлер, *Введение в планирование эксперимента*, Москва, СССР, Металлургия, 1968.

104. И. Г. Зедгинидзе, *Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем*, Москва, СССР, Наука, 1976.

105. В. А. Вознесенский, *Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях*, Москва, СССР, Статистика, 1974.

106. Н. С. Маркин, *Основы теории обработки результатов измерений: Учеб. пособие для средних специальных учебных заведений*, Москва, РФ, Издательство стандартов, 1991.

107. Х. Шенк, *Теория инженерного эксперимента*, Москва, СССР, Мир, 1972.

108. Антонов А. В., «Пристрій для визначення коефіцієнта тертя та інтенсивності зношування трибопар», *Пат. UA 116437, МПК: B60L 5/00, G01N 3/56, G01N 19/02, № u201610905; 25.05.2017.*

109. В. П. Михеев, О. А. Сидоров, и И. Л. Саля, «Исследование и прогнозирование износа контактных пар устройств токосъема», *Известия вузов. Электромеханика*, № 5, с. 74 – 79, 2003.

110. В. П. Михеев, и О. А. Сидоров, Новый способ прогнозирования износа, *Локомотив*, № 8, с. 41 -42, 2003.

111. *ГОСТ 2584-86 Провода контактные из меди и ее сплавов. Технические условия*, Москва, СССР, ИПК Издательство стандартов, 1986.

112. *ГОСТ 13837-79 Динамометры общего назначения. Технические условия*, Москва, СССР, Стандартиформ, 1979.
113. *ГОСТ 6507-90 Микрометры. Технические условия*, Москва, ИПК Издательство стандартов, 1990.
114. А. В. Антонов, «Дослідження взаємодії пари тертя «контактний провід – струмознімальний елемент», в лабораторних умовах» тези доповідей *I-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Енергооптимальні технології перевізного процесу»*, Моршин, 2016, с. 16-17.
115. И. И. Власов, «Совершенствование контактной сети и токосъема на электрифицированных железных дорогах», *Труды Всесоюз. науч.-исслед. ин-т ж.-д. трансп.*, Вып. 337, 174 с., 1968.
116. Ю. И. Горошков, «Контактная сеть и токосъем», *Труды Всесоюз. науч.-исслед. ин-т ж.-д. трансп.*, Вып. 558, 127 с., 1976.
117. В. В. Корниенко, и И. В. Доманский, «Критерии качества токосъема, определяющие ресурсосбережение», *Залізничний транспорт України*, №5, с. 18 – 21, 2010.
118. G. Bucca, A. Collina, R. Manigrasso, F. Mapelli, and D. Tarsitano, «Analysis of electrical interferences related to the current collection quality in pantograph–catenary interaction», *Rail and Rapid Transit*, vol. 225 Part F: J., p. 46 – 59, 2010.
119. Antonov A. V., and Sychenko V. G. «Resource Evaluation of Friction Pair «Contact Wire – Contact Strip», *Archives of Transport*, vol. 44, Issue 4, p. 7-14, 2017.
120. А. В. Антонов, «Дослідження процесу зношування елементів пари тертя «контактний провід – струмознімальний елемент», тези доповідей *VIII Міжнародної науково-практичної конференції «Безпека та електромагнітна сумісність на залізничному транспорті»*, Чернівці, 2017, с. 12-13.
121. А. В. Антонов, «Оцінка ресурсу елементів пари тертя «контактний провід – струмознімальний елемент», тези доповідей *II-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Енергооптимальні технології перевізного процесу»*,

Львів, 2017, с. 26-27.

122. А. В. Антонов, «Нейромережеві моделі, як засіб прогнозування зношування сильнострумового контакту». в матеріалах *X Міжнародної науково-практичної конференції «Електрифікація транспорту» «Транселектро-2017»*, Дніпро, 2017, с. 62 – 63.

123. С. Хайкин, *Нейронные сети. Полный курс 2-е изд.*, Москва, РФ, Издательский дом «Вильямс», 2006.

124. Ramon Cajal, *Histologie du systeme nerveux del'homme et des vertebres*, Paris, France, Edition Francaise Revue: Tome I, 1952; Tome II, 1955.

125. F. Rosenblatt, «The perceptron: A probabilistic model for information storage and organization in the brain», *Psychological Review*, vol. 65, p. 386– 408, 1958.

126. M. N. Stone, «The generalized Weierstrass approximation theorem», *Mathem. Mag*, vol. 21, p. 167–183, 237-254, 1948.

127. А. Н. Колмогоров, «О представлении непрерывных функций нескольких переменных в виде суперпозиции непрерывных функций одного переменного», *Докл. АН СССР*, т. 111, №5, с. 953–966, 1957.

128. В. И. Арнольд, О представлении непрерывных функций нескольких переменных в виде суперпозиции функций меньшего числа переменных, *Мат. Просвещение*, №19, с. 41–61, 1957.

129. А. Н. Горбань, В. Л. Дунин-Барковский, А. Н. Кардин и др., *Нейроинформатика*, Институт вычисл. моделирования СОРАН, Новосибирск, РФ, Наука, 1998.

130. D. E. Rumelhart, G. E. Hinton, and R. J. Williams, «Learning representations by back-propagating errors», *Nature*, vol. 323, p. 533–536, 1986.

131. D. E. Rumelhart and J. L. McClelland, *Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructures of Cognition*, Cambridge, Great Britain, MIT Press, 1986.

132. M. A. Cohen, S. O. Grossberg, «Absolute stability of global pattern formation and parallel memory storage by competitive neural networks», *IEEE*

Transactions on Systems, Man and Cybernetics, vol. 13, p. 815–826, 1983.

133. J. Hopfield, and D. Tank «Computing with neural circuits: a model», *Science*, vol. 233, p. 625–633, 1986.

134. T. Khanna, *Foundations of neural networks*, Don Mills: Addison Wesley Publishing Co., 1990.—196 p.

135. B. Kosko, *Neural networks and fuzzy systems: Adynamical systems approach to machine intelligence*, Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1992.

136. R. Rojas, *Theorie der neuronalen Netze. Eine systematische Einfuehrung*, Berlin, Springer-Verlag:, 1993.

137. P. K., Simpson, *Neural networks theory, technology and applications*, N.Y., USA, IEEE Press, 1995.

138. Simpson P. K., *Neural networks*, N.Y., USA, IEEE Press, 1995.

139. А. Н. Горбань, *Обучение нейронных сетей*, Москва, СССР, СП Параграф, 1990.

140. И. С. Суровцев, В. И. Ключкин, и Р. П. Пивоварова, *Нейронные сети: введение в современные информационные технологии*, Воронеж, РФ, Издательство ВГУ, 1994.

141. М. А. Щербаков, *Искусственные нейронные сети*, Пенза, РФ, Издательство ПГУ, 1996.

142. В. А. Терехов, Д. В.Ефимов, и И. Ю.Тюнин, *Искусственные нейронные сети и их применение в системах автоматического управления*, СПб, РФ, С.-Петербур. гос. электротехн. Ун-т, 1997.

143. А. А. Лисс, М. В. Степанов, *Нейронные сети и нейрокомпьютеры*, СПб, РФ, С.-Петербур. гос. электротехн. Ун-т, 1997.

144. П. П. Кольцов, В. В. Прохоров, *Нейрообработка визуализированной информации*, Мосва, РФ, Наука, 1997.

145. А. А. Веденов, *Обработка информации нейронными сетями*, Мосва, СССР, ВИНТИ, 1990.

146. Р. Каллан, *Основные концепции нейронных сетей*, Москва, РФ, Вильямс, 2001.

147. P. J. Werbos «Backpropagation through time: What it does and how to do it», *Proceedings of the IEEE*, vol. 78, p. 78, p. 1550 – 1560, 1990.
148. K. Weierstrass, «Über die analytische Darstellbarkeit sogenannter willkürlicher Funktionen einer reellen varänderlichen», *Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften*, p. 633 – 639, 789 – 905, 1885.
149. A. Wieland and R. Leighton, «Geometric analysis of neural network capabilities», *First IEEE International Conference on Neural Networks*, vol. III, p. 385 – 392, 1987.
150. D. R. Hush and B. G. Home, «Progress in supervised neural networks: What's new since Lipmann», *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 10, p. 8 – 39, 1993.
151. M. Stone, «Cross-validation: A review, Mathematische Operationsforschung Statistischen», *Serie Statistics*, vol. 9, p. 127 – 139, 1978.
152. M. Keams, «A bound on the error of cross validation using the approximation and estimation rates, with consequences for the training –test split», *Advances in Neural Information Processing Systems*, vol. 8, p. 183 – 189, 1996.
153. A. V. Antonov, Yu. L. Bolshakov, and V. G. Sychenko, «Development a Forecasting Method of Friction Pairs Wear of The Current Collection», *Problemy kolejnictwa*, Tom. 61, No 177, p. 13-19, 2017.
154. А. В. Антонов, Ю. Л. Большаков, та В. Г. Сиченко, «Пристрій для визначення параметрів вугільних струмознімальних елементів», *Пат. UA 114369*, МПК: B60L 5/00, № u201608594, опубл. 10.03.2017.
155. Д. О. Босий, В. Г. Мандич, «Визначення траєкторії розташування контактної підвіски для фізичної моделі взаємодії контактної підвіски зі струмоприймачем електрорухомого складу», *Електрифікація транспорту*, № 2, с. 35 – 40, 2011.
156. А. В. Антонов, «Підвищення технічного ресурсу пар тертя струмознімання», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, №1, с. 39 – 44, 2018.

157. А. В. Антонов, «Увеличение ресурса пар трения токосъема», в материалах *VIII международной научно-практической конференции, посвященной году науки «Проблемы безопасности на транспорте»*, Гомель, 2017, с. 75.

158. Б. А. Волков, *Экономическая эффективность инвестиций на железнодорожном транспорте в условиях рынка*, Москва, РФ, Транспорт, 1996.

159. *Методические рекомендации по определению экономической эффективности мероприятий научно-технического прогресса на железнодорожном транспорте*, Разраб. ВНИИЖТ, Москва, СССР, 1990.

160. И. Б. Сотников, А. А. Ваганов, Ф. С. Гоманков, *Технико-экономические расчеты в эксплуатации железных дорог*, Москва, СССР, Транспорт, 1983.

ДОДАТОК А.

Будова та принцип дії пристрою для визначення коефіцієнту тертя та інтенсивності зношування трибопари

УКРАЇНА



ПАТЕНТ

НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

№ 116437

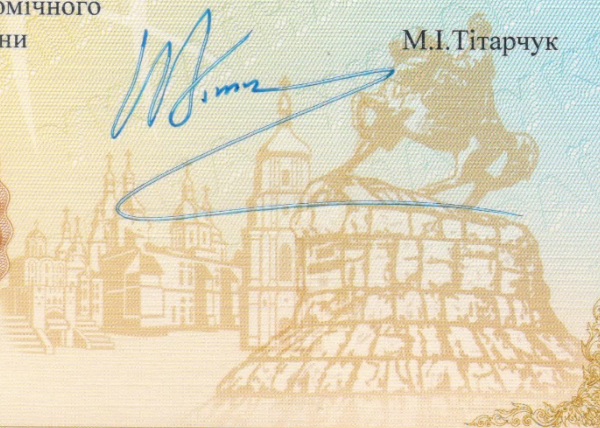
ПРИСТРІЙ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ТЕРТЯ ТА
ІНТЕНСИВНОСТІ ЗНОШУВАННЯ ТРИБОПАР

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи
і корисні моделі".

Зарєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні
моделі **25.05.2017**.

Заступник міністра економічного розвитку і торгівлі України

М.І.Титарчук



(11) 116437

(19) UA

(51) МПК (2017.01)
B60L 5/00
G01N 3/56 (2006.01)
G01N 19/02 (2006.01)

(21) Номер заявки:	u 2016 10905	(72) Винахідник:	Антонов Андрій Владиславович, UA
(22) Дата подання заявки:	31.10.2016	(73) Власник:	ДНІПРОПЕТРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА, вул. Лазаряна, 2, м. Дніпропетровськ-10, 49010, UA
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель:	25.05.2017		
(46) Дата публікації відомостей про видачу патенту та номер бюлетеня:	25.05.2017, Бюл. № 10		

(54) Назва корисної моделі:

ПРИСТРІЙ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ТЕРТЯ ТА ІНТЕНСИВНОСТІ ЗНОШУВАННЯ ТРИБОПАР

(57) Формула корисної моделі:

Пристрій для визначення коефіцієнта тертя та інтенсивності зношування трибопар, що містить корпус, утримувач зразка, утримувач контрзразка, виконаний у вигляді полотна або диска, приводу його обертання, приводу радіального переміщення утримувача зразка та шарніра, розміщеного між утримувачем зразка та приводом його переміщення, який відрізняється тим, що пристрій має механічну частину, механізм навантаження, ізолюваний диск, регульоване джерело стабілізованого струму, безконтактний вимірювач температури, розрахунковий блок, насос.



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **116437** (13) **U**
(51) МПК (2017.01)
B60L 5/00
G01N 3/56 (2006.01)
G01H 19/02 (2006.01)

МІНІСТЕРСТВО
ЕКОНОМІЧНОГО
РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ
УКРАЇНИ

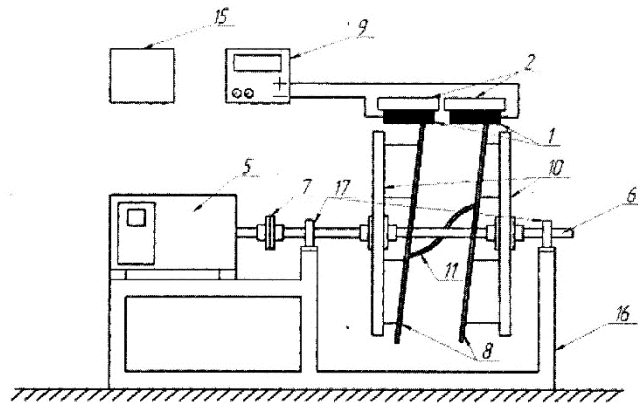
(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: u 2016 10905	(72) Винахідник(и): Антонов Андрій Владиславович (UA)
(22) Дата подання заявки: 31.10.2016	(73) Власник(и): ДНІПРОПЕТРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА, вул. Лазаряна, 2, м. Дніпропетровськ-10, 49010 (UA)
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: 25.05.2017	
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 25.05.2017, Бюл.№ 10	

(54) ПРИСТРІЙ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ТЕРТЯ ТА ІНТЕНСИВНОСТІ ЗНОШУВАННЯ ТРИБОЛАП

(57) Реферат:

Пристрій для визначення коефіцієнта тертя та інтенсивності зношування трибопар містить корпус, утримувач зразка, утримувач контрзразка, виконаний у вигляді полотна або диска, приводу його обертання, приводу радіального переміщення утримувача зразка та шарніра, розміщеного між утримувачем зразка та приводом його переміщення. Пристрій має механічну частину, механізм навантаження, ізований диск, регульоване джерело стабілізованого струму, безконтактний вимірювач температури, розрахунковий блок, насос.



Фиг. 1

UA 116437 U

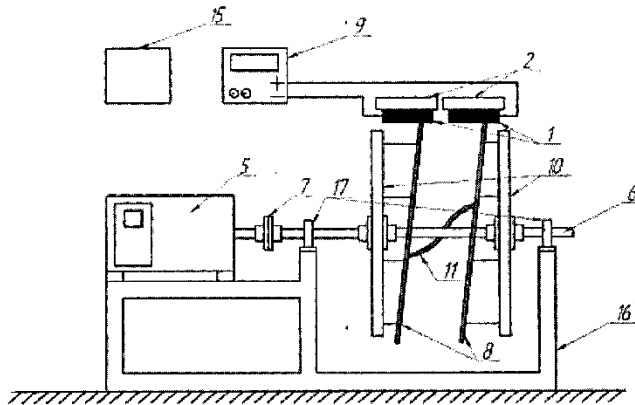
ізольованих дисків 10. Рідина в зону контакту подається насосом 12, який розміщений в резервуарі для рідини 13. Температура в зоні контакту між обертовим контртілом 8 та контрзразком 1 визначається безконтактним вимірювачем температури 14. Визначення коефіцієнта тертя проводиться в розрахунковому блоці 15, який з'єднаний (на рисунку не показано) з частотно-регульованим приводом 5, регульованим стабілізованим джерелом струму 9, безконтактним вимірювачем температури 14. До розрахункового блока 15 вводяться значення сили притискання та інтенсивності подачі рідини.

Виготовлення такого пристрою не викликає складнощів, оскільки механічна частина пристрою виконана з доступних складових, а електрична частина складається з доступних вимірювальних пристроїв та електронних компонентів загального призначення, визначення інтенсивності зношування пар тертя дозволить оцінювати роботу трибопар в лабораторних умовах, а за коефіцієнтом тертя можна оцінювати можливе зношування трибопар, пристрій дозволяє досягти зменшення механічної та електричної складової зносу пар тертя в експлуатації, зменшити експлуатаційні витрати на обслуговування і ремонт трибосистем.

Корисна модель має фізичну реалізацію та використовуються в наукових дослідженнях.

ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

Пристрій для визначення коефіцієнта тертя та інтенсивності зношування трибопар, що містить корпус, утримувач зразка, утримувач контрзразка виконаний у вигляді полотна або диска, приводу його обертання, приводу радіального переміщення утримувача зразка та шарніра, розміщеного між утримувачем зразка та приводом його переміщення, який **відрізняється** тим, що пристрій має механічну частину, механізм навантаження, ізольований диск, регульоване джерело стабілізованого струму, безконтактний вимірювач температури, розрахунковий блок, насос.



Фиг. 1

Корисна модель належить до залізничного та міського електричного транспорту, може використовуватись в галузі машинобудування, а саме в засобах вимірювальної техніки.

На електрифікованих залізницях та міському електричному транспорті, струмознімальні елементи встановлюються на струмоприймач без визначення хаґ характеристик кожного окремого зразка та можливої інтенсивності зношування трибопари "контактний провід струмознімальний елемент". Перевірка відповідності струмознімальних елементів існуючим вимогам виконується на етапі вхідного контролю для кожної партії, відбір зразків з якої проводиться методом "всліпу", а об'єм вибірки нормується існуючими нормативними документами. Значні коливання характеристик струмознімальних елементів від партії до партії та всередині партії призводять до збільшення експлуатаційних витрат.

Корисна модель направлена на підвищення таких властивостей струмознімальних елементів та контактних проводів, як безвідмовність та довговічність, зокрема, на зменшення механічної та електричної складової зносу трибосистеми "контактний провід - струмознімальний елемент", зменшення витрат на обслуговування і ремонт струмоприймачів та контактної мережі.

Відомий пристрій для визначення коефіцієнта тертя ковзання [UA 4591 A, Пристрій для визначення коефіцієнта тертя ковзання, 2005], який складається з основи для встановлення тіла на опорі, контрзразків та гвинтів вузлів навантаження, кронштейнів, шкали та індикатора. Недоліком пристрою є неможливість визначення інтенсивності зношування пари тертя та визначення коефіцієнту тертя готових виробів без їх руйнування.

Найближчим аналогом до корисної моделі є дискова машина тертя [UA 74221 U, Дискова машина тертя, 2012], що складається з корпусу, утримувача зразка, утримувача контрзразка, виконаного у вигляді абразивного полотна або диска, приводу його обертання, приводу радіального переміщення утримувача зразка та шарніра, розміщеного між утримувачем зразка та приводом його переміщення.

Недоліком цього пристрою є: неможливість дослідження на зношування та визначення коефіцієнта тертя готових виробів без їх руйнування, відсутність можливості подачі електричного струму та вологи в зону контакту, неможливість проведення зрівняльних досліджень трибопар.

Технічною задачею, яка розв'язується корисною моделлю, що заявляється, є реалізація в пристрої механічної частини, регульованого стабілізованого джерела струму, пірометра, розрахункового блоку, насосу, можливість проводити тривалі зрівняльні дослідження для оцінювання інтенсивності зношування трибопар та визначати коефіцієнт тертя при різних швидкостях ковзання, силі притиснення з визначенням температури в зоні контакту.

Суть корисної моделі полягає у тому, що пристрій для визначення коефіцієнта тертя та інтенсивності зношування трибопар складається з частотно-регульованого приводу, регульованого стабілізованого джерела струму, механічної частини, вимірювачів та допоміжних пристроїв. Новим є те, що пристрій дозволяє проводити дослідження без руйнування дослідних зразків, містить механічну частину, регульоване джерело стабілізованого струму, для забезпечення протікання струму різного номіналу через трибопару, насос для подачі рідини в зону контакту, з регулюванням інтенсивності її подачі, дозволяє регулювати частотно-регульованим приводом швидкість ковзання та поводити тривалі дослідження, для оцінювання інтенсивності зношування трибопар та визначення коефіцієнту тертя, дозволяє змінювати силу притиснення контактуючих елементів та визначати температуру в зоні контакту безконтактним вимірювачем температури.

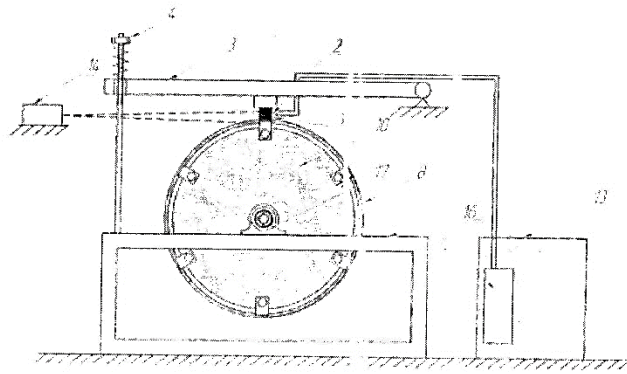
Суть корисної моделі пояснюється кресленнями фіг. 1 та фіг. 2, на яких зображено зовнішній вигляд пристрою, де 1 - контрзразок; 2 - натискна колодка; 3 - механізм навантаження; 4 - гайка; 5 - частотно-регульований привід; 6 - вал; 7 - муфта; 8 - обертове контртіло; 9 - стабілізоване джерело струму; 10 - ізолюваний диск; 11 - електричний з'єднувач; 12 - насос; 13 - резервуар для рідини; 14 - безконтактний вимірювач температури; 15 - розрахунковий блок; 16 - рама; 17 - гранбуksа з підшипником.

Процес визначення коефіцієнта тертя та інтенсивності зношування трибопари проводиться наступним чином.

Вищеперераховане обладнання 1-15 встановлюється на раму 16, а вал 6 кріпиться до рами 16 за допомогою гранбуksа з підшипниками 17.

Контрзразок 1 фіксується на натискній колодці 2 механізму навантаження 3, сила притиснення регулюється гайками 4. Обертовий момент від частотно-регульованого приводу 5 на вал 6 передається через муфту 7. Сила струму, що протікає через трибопару "обертове контртіло 8 - контрзразок 1" встановлюється регульованим стабілізованим джерелом струму 9. Обертові контртіла 8 закріплені на ізолюваних дисках 10 та з'єднані між собою електричним з'єднувачем 11. Обертові контртіла 8 мають можливість встановлюватись під кутом до

UA 116437 U



Ф г. 2

Комп'ютерна верстка Л. Ціхановська

Міністерство економічного розвитку і торгівлі України, вул. М. Грушевського, 12/2, м. Київ, 01008, Україна

ДП "Український інститут інтелектуальної власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601

ДОДАТОК Б.

**Результати експериментальних досліджень зношування
струмознімальних елементів типу «А» та мідного контактного проводу
МФ-100**

№	S , мм ²	P , даН	$HВ$	ρ , мкОм·м	φ , %	I , А	H , мм
1	0,0011	1,5	21,3	24,3	40	0	0,4646
2	0,0017	2,5	21,3	24,3	40	0	0,3998
3	0,0028	3,5	21,3	24,3	40	0	0,3957
4	0,0044	4,5	21,3	24,3	40	0	0,4378
5	0,0061	5,5	21,3	24,3	40	0	0,5121
6	0,0083	6,5	21,3	24,3	40	0	0,6041
7	0,0106	7,5	21,3	24,3	40	0	0,6998
8	0,0133	8,5	21,3	24,3	40	0	0,7847
9	0,001	1,5	30,1	25,6	40	0	0,4841
10	0,002	2,5	30,1	25,6	40	0	0,419
11	0,003	3,5	30,1	25,6	40	0	0,4142
12	0,005	4,5	30,1	25,6	40	0	0,4556
13	0,007	5,5	30,1	25,6	40	0	0,5289
14	0,01	6,5	30,1	25,6	40	0	0,6198
15	0,013	7,5	30,1	25,6	40	0	0,714
16	0,016	8,5	30,1	25,6	40	0	0,7974
17	0,0017	1,5	37,8	28,5	40	0	0,4998
18	0,0026	2,5	37,8	28,5	40	0	0,4342
19	0,0044	3,5	37,8	28,5	40	0	0,4289
...
363	0,0103	3,5	30,1	25,6	100	500	0,4873
364	0,0091	4,5	30,1	25,6	100	500	0,5207
365	0,0096	5,5	30,1	25,6	100	500	0,5898
366	0,0129	6,5	30,1	25,6	100	500	0,6777
367	0,0176	7,5	30,1	25,6	100	500	0,7808
368	0,0222	8,5	30,1	25,6	100	500	0,8719
369	0,0194	1,5	37,8	28,5	100	500	0,6596
370	0,0157	2,5	37,8	28,5	100	500	0,5568
371	0,0129	3,5	37,8	28,5	100	500	0,5045
372	0,0114	4,5	37,8	28,5	100	500	0,5365
373	0,0126	5,5	37,8	28,5	100	500	0,6042
374	0,0166	6,5	37,8	28,5	100	500	0,6904
375	0,0212	7,5	37,8	28,5	100	500	0,792
376	0,0259	8,5	37,8	28,5	100	500	0,8814
377	0,0244	1,5	42,1	29,3	100	500	0,6724
378	0,0197	2,5	42,1	29,3	100	500	0,5687
379	0,0162	3,5	42,1	29,3	100	500	0,5148
380	0,0143	4,5	42,1	29,3	100	500	0,5455
381	0,0151	5,5	42,1	29,3	100	500	0,6119
382	0,0199	6,5	42,1	29,3	100	500	0,6967
383	0,0253	7,5	42,1	29,3	100	500	0,7967
384	0,0321	8,5	42,1	29,3	100	500	0,8844

ДОДАТОК В.

**Результати експериментальних досліджень зношування
струмознімальних елементів типу «Б» та контактного проводу МФ-100**

№	S, мм ²	P, даН	НВ	ρ, мкОм·м	φ, %	I, А	H, мм
1	0,0003	1,5	16,2	17,38	40	0	0,524
2	0,0007	2,5	16,2	17,38	40	0	0,4435
3	0,0011	3,5	16,2	17,38	40	0	0,4342
4	0,0016	4,5	16,2	17,38	40	0	0,4791
5	0,0022	5,5	16,2	17,38	40	0	0,5611
6	0,003	6,5	16,2	17,38	40	0	0,663
7	0,0036	7,5	16,2	17,38	40	0	0,7678
8	0,0046	8,5	16,2	17,38	40	0	0,8583
9	0,0004	1,5	17,8	21,36	40	0	0,5326
10	0,0008	2,5	17,8	21,36	40	0	0,452
11	0,0013	3,5	17,8	21,36	40	0	0,4428
12	0,0019	4,5	17,8	21,36	40	0	0,4877
13	0,0027	5,5	17,8	21,36	40	0	0,5696
14	0,0037	6,5	17,8	21,36	40	0	0,6716
15	0,0047	7,5	17,8	21,36	40	0	0,7764
16	0,0061	8,5	17,8	21,36	40	0	0,8669
17	0,0005	1,5	18,7	22,3	40	0	0,544
18	0,001	2,5	18,7	22,3	40	0	0,4634
...
362	0,0049	2,5	17,8	21,36	100	500	0,4831
363	0,0041	3,5	17,8	21,36	100	500	0,4341
364	0,0037	4,5	17,8	21,36	100	500	0,4644
365	0,0034	5,5	17,8	21,36	100	500	0,5294
366	0,0046	6,5	17,8	21,36	100	500	0,612
367	0,0062	7,5	17,8	21,36	100	500	0,7074
368	0,0083	8,5	17,8	21,36	100	500	0,7899
369	0,0075	1,5	18,7	22,3	100	500	0,5983
370	0,0061	2,5	18,7	22,3	100	500	0,4953
371	0,0051	3,5	18,7	22,3	100	500	0,4453
372	0,0046	4,5	18,7	22,3	100	500	0,4753
373	0,0042	5,5	18,7	22,3	100	500	0,54
374	0,0057	6,5	18,7	22,3	100	500	0,6224
375	0,0078	7,5	18,7	22,3	100	500	0,7178
376	0,0101	8,5	18,7	22,3	100	500	0,8003
377	0,0095	1,5	19,2	25,1	100	500	0,5989
378	0,0077	2,5	19,2	25,1	100	500	0,4968
379	0,0064	3,5	19,2	25,1	100	500	0,4481
380	0,0058	4,5	19,2	25,1	100	500	0,4799
381	0,0053	5,5	19,2	25,1	100	500	0,5467
382	0,0075	6,5	19,2	25,1	100	500	0,6315
383	0,01	7,5	19,2	25,1	100	500	0,73
384	0,0125	8,5	19,2	25,1	100	500	0,816

ДОДАТОК Г.

**Результати експериментальних досліджень зношування мідних
накладок та контактного проводу МФ-100**

№	S, мм ²	P, даН	НВ	ρ, мкОм·м	φ, %	I, А	H, мм
1	0,0124	1,5	89,4	0,018	40	0	0,1476
2	0,015	2,5	89,4	0,018	40	0	0,1361
3	0,0187	3,5	89,4	0,018	40	0	0,1295
4	0,0274	4,5	89,4	0,018	40	0	0,1292
5	0,0375	5,5	89,4	0,018	40	0	0,1362
6	0,0517	6,5	89,4	0,018	40	0	0,1519
7	0,0655	7,5	89,4	0,018	40	0	0,1773
8	0,0867	8,5	89,4	0,018	40	0	0,2138
9	0,0112	1,5	89,4	0,018	100	0	0,1467
10	0,0136	2,5	89,4	0,018	100	0	0,1353
11	0,0172	3,5	89,4	0,018	100	0	0,1287
12	0,0258	4,5	89,4	0,018	100	0	0,1284
13	0,0343	5,5	89,4	0,018	100	0	0,1354
14	0,0449	6,5	89,4	0,018	100	0	0,151
15	0,0577	7,5	89,4	0,018	100	0	0,1763
...
359	0,114	7,5	96,8	0,017	40	400	0,2248
360	0,1493	8,5	96,8	0,017	40	400	0,2736
361	0,0969	1,5	96,8	0,017	100	400	0,202
362	0,0748	2,5	96,8	0,017	100	400	0,1819
363	0,0637	3,5	96,8	0,017	100	400	0,1633
364	0,0585	4,5	96,8	0,017	100	400	0,1626
365	0,0634	5,5	96,8	0,017	100	400	0,1717
366	0,0866	6,5	96,8	0,017	100	400	0,1923
367	0,1169	7,5	96,8	0,017	100	400	0,2293
368	0,1538	8,5	96,8	0,017	100	400	0,2791
369	0,1111	1,5	96,8	0,017	40	500	0,201
370	0,0833	2,5	96,8	0,017	40	500	0,1811
371	0,068	3,5	96,8	0,017	40	500	0,1641
372	0,0602	4,5	96,8	0,017	40	500	0,1634
373	0,0643	5,5	96,8	0,017	40	500	0,1717
374	0,0879	6,5	96,8	0,017	40	500	0,1904
375	0,1186	7,5	96,8	0,017	40	500	0,2271
376	0,1567	8,5	96,8	0,017	40	500	0,2764
377	0,1222	1,5	96,8	0,017	100	500	0,2161
378	0,09	2,5	96,8	0,017	100	500	0,1928
379	0,0714	3,5	96,8	0,017	100	500	0,1699
380	0,062	4,5	96,8	0,017	100	500	0,1675
381	0,0656	5,5	96,8	0,017	100	500	0,1751
382	0,0896	6,5	96,8	0,017	100	500	0,1942
383	0,1209	7,5	96,8	0,017	100	500	0,2316
384	0,1599	8,5	96,8	0,017	100	500	0,2819

ДОДАТОК Д.

Будова та принцип дії пристрою для визначення параметрів вугільних струмознімальних елементів

УКРАЇНА



ПАТЕНТ

НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

№ 114369

**ПРИСТРІЙ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ВУГІЛЬНИХ
СТРУМОЗНІМАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ**

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі **10.03.2017**.

В.о. Голови Державної служби
інтелектуальної власності України

А.А.Малиш



(11) 114369

(19) UA

(51) МПК (2017.01)
B60L 5/00

(21) Номер заявки: **u 2016 08594**

(22) Дата подання заявки: **05.08.2016**

(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: **10.03.2017**

(46) Дата публікації відомостей про видачу патенту та номер бюлетеня: **10.03.2017, Бюл. № 5**

(72) Винахідники:

**Антонов Андрій
Владиславович, UA,
Большаков Юрій
Леонідович, UA,
Сиченко Віктор Григорович,
UA**

(73) Власник:

**ДНІПРОПЕТРОВСЬКИЙ
НАЦІОНАЛЬНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ
ЗАЛІЗНИЧНОГО
ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ
АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА,
вул. Лазаряна, 2, м.
Дніпропетровськ-10, 49010, UA**

(54) Назва корисної моделі:

ПРИСТРІЙ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ВУГІЛЬНИХ СТРУМОЗНІМАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

(57) Формула корисної моделі:

Пристрій для визначення параметрів вугільних струмознімальних елементів, що містить вимірювальний контактний блок та електричний вимірювальний блок, що включає в себе чотири електроди, два внутрішніх вимірювальних та два зовнішніх, для підведення електричного струму в зону вимірювання та вантажу, для зміни контактного натиску, який відрізняється тим, що пристрій має суміщену механічну та електричну частини, регульовану ізолювану поверхню та черв'ячну передачу з рухомим потенційним електродом, мікроконтролер, багатоканальний аналого-цифровий перетворювач, цифровий амперметр, блок вводу та блок виводу.



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **114369** (13) **U**
(51) МПК (2017.01)
B60L 5/00

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

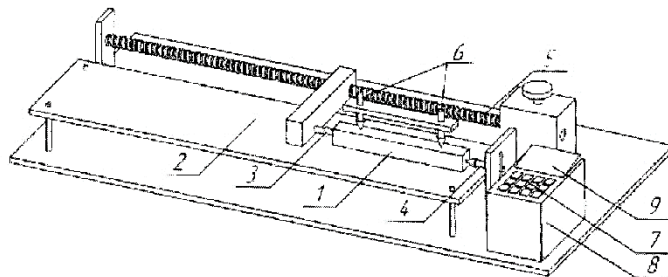
(21) Номер заявки: **u 2016 08594**
(22) Дата подання заявки: **05.08.2016**
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: **10.03.2017**
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: **10.03.2017, Бюл.№ 5**

(72) Винахідник(и)
**Антонов Андрій Владиславович (UA),
Большаков Юрій Леонідович (UA),
Сиченко Віктор Григорович (UA)**
(73) Власник(и):
**ДНІПРОПЕТРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ ЗАЛІЗНИЧНОГО
ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В.
ЛАЗАРЯНА,
ву.1. Лазаряна, 2, м. Дніпропетровськ-10,
49010 (UA)**

(54) ПРИСТРІЙ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ВУГІЛЬНИХ СТРУМОЗНІМАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

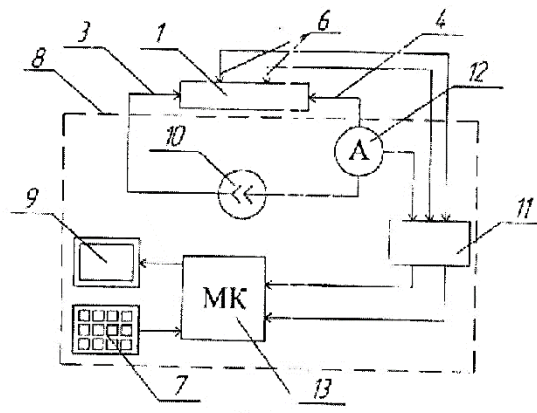
(57) Реферат:

Пристрій для визначення параметрів вугільних струмознімальних елементів містить вимірювальний контактний блок та електричний вимірювальний блок, що включає в себе чотири електроди, два внутрішніх вимірювальних та два зовнішніх. Додатково пристрій має суміщену механічну та електричну частини, регульовану ізольовану поверхню та черв'ячну передачу з рухомим потенційним електродом, мікроконтролер, багатоканальний аналого-цифровий перетворювач, цифровий амперметр, блок вводу та блок виводу.



Фіг. 1

UA 114369 U



Фіг. 2

Комп'ютерна верстка О. Гергіль

Державна служба інтелектуальної власності України, вул. Василя Липківського, 45, м. Київ, МСП, 03680, Україна

ДП "Український інститут інтелектуальної власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601

Корисна модель належить до залізничного електричного транспорту, електрифікованого системою постійного та змінного струму, а саме до засобів вимір-овальної техніки.

В умовах локомотивних депо постійного та змінного струму, вугільні струмоznімальні елементи встановлюються на полоз струмоприймача без визначення питомого електричного опору та твердості кожного окремого зразка. Перевірка їх відповідності існуючим вимогам виконується на етапі вхідного контролю для кожної партії, відбір зразків з якої, проводиться методом "всліпу", а об'єм вибірки нормується існуючими нормативними документами. Значні коливання параметрів вугільних струмоznімальних елементів призводять до різкого скорочення їх пробігу, збільшення експлуатаційних витрат на обслуговування та ремонт.

Корисна модель направлена на підвищення таких властивостей вугільних струмоznімальних елементів та контактних проводів, як безвідмовність та довговічність, зокрема, на зменшення механічної та електричної складової зносу трибосистеми "контактний провід - струмоznімальний елемент", зменшення експлуатаційних витрат на обслуговування і ремонт струмоприймачів та контактної мережі.

Відомий пристрій для закріплення та вимірювання питомого електричного опору провідникових матеріалів чотириконтактним методом [US 4267506 A, Collinear four-point probe head and mount for resistivity measurements, 1981], який складається з поверхні для розташування зразків та пневматичної станини з вимірювальною голівкою, на якій в одній площині розміщені чотири електроди. Електроди приєднані до вимірювальної частини пристрою. Недоліком пристрою є складність та незручність використання, громіздкість, висока вартість.

Найближчим аналогом до корисної моделі є пристрій для вимірювання питомого електричного опору провідних матеріалів [UA 5434 U, Пристрій для вимірювання питомого електричного опору провідних матеріалів, 2010], що складається з вимірювального контактного блока та електричного вимірювального блока. Вимірювальний контактний блок включає в себе чотири електроди, два внутрішніх вимірювальних та два зовнішніх, для підведення електричного струму в зону вимірювання. Для зміни контактного натиску на вимірювальний контактний блок встановлюється вантаж.

Недоліком цього пристрою є: неможливість виміру питомого електричного опору вуглецевого зразку з відношенням довжини ділянки постійного поперечного перерізу до діагоналі перерізу більше двох; низька перешкодозахищеність, через відсутність ізоляції між вимірюваним зразком та поверхнею на якій він знаходиться; процес використання установки ускладнюється тим, що вона складається з двох окремих частин - вимірювального контактного блока та електричного вимірювального блока; застосування установки вимагає особливих навиків.

Технічною задачею, яка розв'язується корисною моделлю, що заявляється, є реалізація в одному пристрої механічної частини, що включає в себе черв'ячну передачу та регульовану ізольовану платформу, для фіксації досліджуваних вугільних струмоznімальних елементів чи їх зразків різного перерізу та довжини; електричної частини, що включає в себе джерело стабілізованого струму, перетворювач аналогових сигналів, мікроконтролер, блоки вводу та виводу; забезпечення простоти, зручності та швидкості користування пристроєм, зменшення масо-габаритних показників пристрою, при максимально можливій зниженій вартості.

Сутність корисної моделі полягає у тому, що пристрій для визначення параметрів струмоznімальних елементів складається з джерела стабілізованого струму, потенційних електродів та вимірювальних приладів. Новим є те, що пристрій має суміщену механічну та електричну частини, містить регульовану ізольовану поверхню та черв'ячну передачу з рухомим потенційним електродом для встановлення вугільних струмоznімальних елементів чи їх зразків різного перерізу та довжини, містить мікроконтролер, який реалізує в собі алгоритм визначення питомого електричного опору, твердості та схеми розміщення на полозі струмоприймача вугільних струмоznімальних елементів, містить багатоканальний аналого-цифровий перетворювач, блок вводу та блок виводу.

На кресленні (фіг. 1) показано зовнішній вигляд пристрою, де 1 - вугільний струмоznімальний елемент; 2 - регульована ізольована платформа; 3 - рухомий струмовий електрод; 4 - нерухомий струмовий електрод; 5 - черв'ячна передача; 6 - вимірювальні потенційні електроди; 7 - блок вводу; 8 - електрична частина; 9 - блок виводу.

На кресленні (фіг. 2) показано структурну схему електричної частини, де: 10 - джерело стабілізованого струму; 11 - перетворювач аналогових сигналів; 12 - цифровий амперметр; 13 - мікроконтролер.

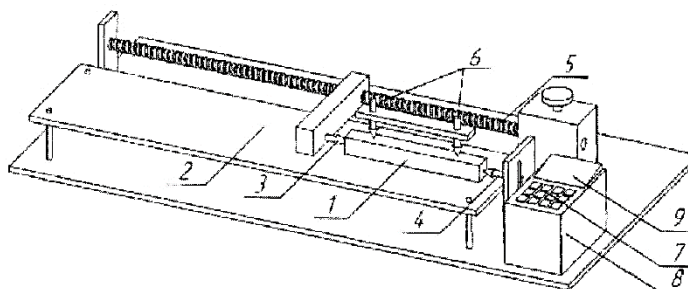
Вугільний струмоznімальний елемент 1, фіксується на регульованій ізольованій платформі 2 між рухомим струмовим електродом 3 та нерухомим струмовим електродом 4, який

приводиться в рух черв'ячною передачею 5. До вугільного струмознімального елемента 1 під'єднуються вимірювальні потенційні електроди 6, вводиться значення поперечного перерізу та відстані між вимірювальними потенційними електродами 3 через блок вводу 7, після чого, подається струм зі стабілізованого джерела струму 10 (фіг 2) електричної частини 8 через струмові електроди 3 та 4 до вугільного струмознімального елемента 1. Перетворювач аналогових сигналів 11 збирає та перетворює данні з цифрового амперметра 12 та вимірювальних потенційних електродів 6 в цифровий сигнал для мікроконтролера 13, в якому проводиться розрахунок питомого електричного опору, твердості та визначається оптимальне розміщення для струмознімального елемента на положі струмоприймача з виведенням результатів на блок виводу 9.

Виготовлення такого пристрою не потребує значних матеріальних затрат, оскільки механічна частина пристрою виконана з доступних складових, а електрична частина складається з електронних компонентів загального призначення, реалізація в пристрої алгоритму визначення питомого електричного опору, твердості та схеми розміщення на положі струмоприймача вугільних струмознімальних елементів дозволить покращити такі властивості як безвідмовність та довговічність трибосистеми "контактний провід - струмознімальний елемент", досягти зменшення механічної та електричної складової зносу, зменшення експлуатаційних витрат на обслуговування і ремонт струмоприймачів та контактної мережі.

20 **ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ**

25 Пристрій для визначення параметрів вугільних струмознімальних елементів, що містить вимірювальний контактний блок та електричний вимірювальний блок, що включає в себе чотири електроди, два внутрішніх вимірювальних та два зовнішніх, для підведення електричного струму в зону вимірювання та вантажу, для зміни контактного натиску, який відрізняється тим, що пристрій має суміщену механічну та електричну частини, регульовану ізольовану поверхню та черв'ячну передачу з рухомим потенційним електродом, мікроконтролер, багатоканальний аналого-цифровий перетворювач, цифровий амперметр, блок вводу та блок виводу.



Фіг. 1

ДОДАТОК Е.
Акти впровадження



ЗАТВЕРДЖУЮ:

Начальник служби електропостачання
РФ «Львівська залізниця»
ПАТ «Укрзалізниця»

М.М. Пулін

03 2018 р.

АКТ

впровадження дисертаційної роботи
Антонова Андрія Владиславовича

Цим актом підтверджуємо, що результати дисертаційної роботи Антонова А. В. направлені на удосконалення взаємодії елементів сильнострумowego контакту «контактний провід – струмознімальний елемент» електричного транспорту прийняті до використання службою електропостачання РФ «Львівська залізниця» ПАТ «Укрзалізниця». Дослідження будуть впроваджуватися з метою зменшення зношування контактних проводів на електрифікованих залізницях України.

Найбільшої уваги з отриманих результатів дисертації заслуговують:

1. Рекомендації щодо вибору оптимальних параметрів струмознімальних елементів, для зменшення зношування контактних проводів.
2. Прогнозні нейромереві моделі для визначення можливого зношування контактних проводів при впровадженні швидкісного руху.

Результати дисертаційної роботи Антонова А. В. враховують особливості роботи електрифікованих ділянок залізниць постійного та змінного струму, а також можуть бути використані на всіх електрифікованих залізницях для врахування взаємодії контактних проводів зі струмознімальними елементами швидкісного електрорухомого складу.

Головний інженер служби
електропостачання
РФ «Львівська залізниця»

О.І.Шалко

Начальник дорожньої
електротехнічної лабораторії
РФ «Львівська залізниця»

А.І.Барна



Товариство з обмеженою відповідальністю
“Глорія”

Україна

69032 м. Запоріжжя, провулок Туристський, 5

тел./факс (068)108-08-41

р/р № 26005202151001 в ЗРУ ПАТ “Приватбанк”

МФО 313399, ЄДРПОУ 22117843

АКТ

впровадження дисертаційної роботи
Антонова Андрія Владиславовича

Цим актом підтверджуємо, що результати дисертаційної роботи Антонова А. В. направлені на удосконалення взаємодії елементів сильнострумового контакту «контактний провід – струмознімальний елемент» електричного транспорту прийняті до врахування та впровадження в ТОВ «Глорія».

Дослідження будуть використовуватися з метою врахування, при створенні нових типів струмознімальних елементів, взаємного зношування контактних проводів та струмознімальних елементів струмоприймачів електричного транспорту.

Найбільш важливими практично цінними вважаємо такі результати:

1. Встановлений вплив фізико-механічних характеристик струмознімальних елементів та параметрів навколишнього середовища на процес зношування пари тертя «контактний провід – струмознімальний елемент».
2. Розроблені прогнози нейромережеві моделі для визначення можливого зношування контактних проводів та струмознімальних елементів.
3. Розроблено пристрій для визначення параметрів вуглецевих струмознімальних елементів.

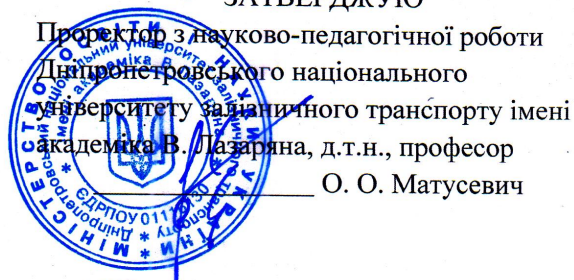
Результати дисертаційної роботи Антонова А. В. можуть бути використані на етапі виготовлення, контролю та визначення ресурсних характеристик струмознімальних елементів на етапі контролю якості продукції в умовах ТОВ «Глорія».

Директор
к.т.н., академ.
радник НАУ



Ю.Л. Большаков

ЗАТВЕРДЖУЮ



Проректор з науково-педагогічної роботи
Дніпропетровського національного
університету залізничного транспорту імені
академіка В. Лазаряна, д.т.н., професор
_____ О. О. Матусевич

АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи
Антонова Андрія Владиславовича «Удосконалення взаємодії елементів
сильнострумового контакту електротранспорту»

м. Дніпро

20 03 2018 р.

Цей акт складений про те, що у навчальному процесі, який ведеться в університеті, прийняті до використання наукові та практичні результати, отримані в дисертації Антонова А. В.:

1. Метод прогнозування зношування ковзного сильнострумового контакту (дисципліна «Контактна мережа», лабораторні роботи 3 курсу спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»).

2. Дослідний зразок пристрою для визначення параметрів вугільних струмознімальних елементів, пристрою для визначення коефіцієнту тертя та інтенсивності зношування триболари та експериментальна установка для дослідження процесу струмознімання (дисципліна «Контактна мережа», лабораторні роботи 3 курсу та підготовка магістерських робіт зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»).

Декан факультету Управління
енергетичними процесами,
д.т.н., професор

А. М. Афанасов

д.т.н., професор кафедри
«Інтелектуальні системи
електропостачання»

В. Г. Кузнецов