

**ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ СТОХАСТИЧНОГО ПРОЦЕСУ
ЗНОШУВАННЯ КОНТАКТНОГО ПРОВІДУ У СИСТЕМІ ТЯГОВОГО
ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ ЗМІННОГО СТРУМУ**

А.М. Муха¹, Д.В. Устименко¹, О.О. Карзова¹, М.М. Кедря¹, О.Я. Куриленко¹

¹ Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені акад. В. Лазаряна, Дніпро, Україна

**STUDY OF THE REGULARITIES OF THE STOCHASTIC PROCESS OF WEAR OF
THE CONTACT WIRE IN THE SYSTEM OF AC ACTIVE TRACTION POWER SUPPLY**

А.М. Муха¹, Д.В. Устименко¹, О.О. Карзова¹, М.М. Кедря¹, О.Я. Куриленко¹

¹ Dnieper National University of Railway Transport named after Acad. V. Lazaryan, Dnipro, Ukraine

Мета. Отримати закономірність яка б описувала стохастичний процес зношування контактної провду на залізницях України.

Методика дослідження полягає в обробці ймовірнісно-статистичними методами результатів експериментальних даних по визначенню висоти контактної провду.

Результати дослідження. Виконана статистична обробка експериментальних даних з визначення висоти контактної провду на ділянках змінного струму Львівської залізниці при проведенні експлуатаційних випробувань електропозів обладнаних накладками струмоприймачів з матеріалу «Романіт-УВЛШ».

Наукова новизна. Встановлено відповідність стохастичного процесу зносу контактної провду нормальному закону.

Практичне значення. Результати досліджень можуть бути покладені в основу прогнозних моделей зношування контактної провду.

Ключові слова: *ковзний контакт, контактний провід, висота контактної провду, випадкова величина, нормальний закон розподілення.*

Вступ. Система тягового енергопостачання електрифікованих доріг являє собою складну розподілену електротехнічну структуру, яка забезпечує енергією рухоми електромеханічну одиницю значної потужності - близько 5000 ... 10000 кВт. Передача енергії на борт транспортного засобу - електропоза, здійснюється за допомогою ковзного сильнострумовевого контакту. Цей контакт являє собою пару: «контактний провід - контактна вставка струмоприймача» (КП-КВС), на стан якої впливають процеси зношування елементів цієї пари. Традиційно оцінюють ступінь зносу контактної провду та контактної вставки шляхом вимірювання висоти останніх і порівнювання їх з нормативними значеннями. Однак процеси зносу носять випадковий характер та залежить від значного числа факторів, серед яких присутні кліматичні, електричні і механічні. Комбінації цих факторів носять ймовірнісний непередбачуваний характер, що ускладняє опис механізму взаємного впливу пари КП-КВС. Найбільшу вартість в цій парі має контактний провід, тому, з практичної точки зору, бажано оцінити прогнозований його знос в умовах застосування різних типів контактних вставок, з різними струмовими навантаженнями. Для цього потрібно встановити закономірностей процесу зносу контактної провду в реальних умовах експлуатації на залізницях України електрифікованих змінним струмом.

Аналіз існуючих досягнень та публікацій. Одним з актуальних питань пов'язаних з вивченням стохастичних процесів в ковзному силовому контакті є встановлення закономірностей зношування контактної провду та створення прогнозних моделей цього процесу.

На систему КП-КВС покладена важлива задача передачі енергії з електромережі на борт транспортного засобу. Тому, надійний електричний контакт між контактною вставкою та контактним провідом є запорукою надійної, енергоефективної та безпечної роботи електрорухомого складу [1 – 3].

В роботі [4] визначено вплив структурних параметрів пари тертя, параметрів системи струмознімання на швидкість з якою зношується пара тертя «контактний провід – контактна вставка». Запропоновано створити математичну модель прогнозування для оцінки зносу та ресурсу контактної провду та контактної вставки.

Важливим фактором, що суттєво впливає на якість роботи, а значить і на ресурс, сильнострумовевого ковзного контакту є геометрія контактної мережі. В роботі [5] відстань між опорами контактної мережі була обрана як змінна оптимізації її геометрії. Отримані результати показують поліпшення якості стру-

можнімання за рахунок зменшення відхилень сили притискання контактної вставки до контактного проводу від стандартного значення.

Матеріал роботи [6] також показує взаємозв'язок геометрії контактної мережі з якістю роботи силового ковзного контакту та швидкістю його зношування але вказує на неможливість виявити нерівномірність зносу контактного проводу на основі величини сили притискання контактної вставки пантографа до контактного проводу.

В процесі експлуатації контактний провід взаємодіє з контактною вставкою струмоприймача тому безумовно матеріал та технологія виготовлення останньої суттєво впливає на швидкість зношування контактного проводу [7 – 15].

Мета досліджень. Метою досліджень є визначення закономірностей стохастичного процесу зношування контактного проводу у системі тягового енергопостачання змінного струму, з урахуванням впливу кліматичного (сезонної) фактору.

Основна частина. Вихідними даними для проведення досліджень є реальні результати експлуатаційних випробувань електрорухомого складу змінного струм обладнаного накладками струмоприймача з матеріалу «Романіт-УВЛШ». Ця частина досліджень проводилася на ділянці «Тернопіль - Глибочок Великий - Озерна» Львівської залізниці в три етапи: 11.10.2016 р., 30.11.2016 р. і 30.03.2017 р., що дозволило охопити найбільш важкий, з точки зору процесу струмоміання, період «осінь-зима-весна» (рис. 1). Найбільшу зацікавленість визиває аналіз результатів по заміру висоти контактного проводу в період з листопада по березень, оскільки він дозволяє дослідити вплив зимового періоду на знос контактного проводу, в умовах впровадження новітніх матеріалів для виготовлення контактних вставок струмоприймачів. Тому у подальшому порівнюємо саме дані за цей період. Заміри висоти контактного проводу проводились з використанням мікрометрів типу МКЦ (4)-25-0,001 в характерних («жорстких») точках фіксації контактного проводу з «набігаючої» сторони. У кожній з експериментальних точок, з метою підвищення достовірності, замір висоти контактного проводу проводився тричі. Вибір ділянок і кількості експериментальних точок забезпечувало охоплення характерних профілів: пряма ділянка, крива і пункт зупинки. Заміри проводились для парного і непарного напрямків. У табл.1 представлені результати вимірів висоти на одному з експериментальних ділянок.



11 жовтня 2016 року



30 листопада 2016 року



30 березня 2017 року

Рис.1. Заміри висоти контактного проводу на дослідній ділянці

Як бачимо з табл. 1, висота контактного проводу є випадковою величиною. У зв'язку з цим облік коливань висоти контактного проводу повинен проводитися ймовірно-статистичними методами, а, отже, для практичних розрахунків потрібні ймовірнісні характеристики висоти контактного проводу.

Результати замірів висоти контактного проводу на непарній колії ділянки «Глибочок Великий - Озерна»
30 листопада 2016 року.

№	Контрольна точка	Результати замірів висоти, мм
1	2	3
1	Оп 343 фікс.	11,041
		11,061
		11,062
2	Оп 345 фікс.	10,717
		10,714
		10,713
3	Оп 345 ПС	11,122
		11,122
		11,133
4	Оп 347 фікс.	11,045
		11,033
		11,040
5	Оп 349 фікс.	10,859
		10,859
		10,867
6	Оп 351 ПС	10,862
		10,856
		10,859
7	Оп 353 фікс.	11,236
		11,234
		11,229
8	Оп 353 ПС	10,796
		10,791
		10,806
9	Оп 355 фікс.	10,899
		10,915
		10,916
10	Оп 355 ПС	10,942
		10,938
		10,935
11	Оп 357 фікс.	11,156
		11,157
		11,154

У кожному з експериментів були встановлені певні обмеження, а саме – кількість експериментальних точок від дев'яти до одинадцяти. Тоді при трьох замірах висоти у кожній точці, отримуємо обсяг вибірки на дослідних ділянках від двадцяти семи до тридцяти трьох точок. Враховуючі однаковість умов експлуатації контактного проводу на кожній з ділянок можна вважати що ця вибірка є репрезентативною [16, 17].

В якості нульової гіпотези приймаємо, що розподіл випадкової величини x -висоти контактного проводу відповідає нормальному закону:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}}. \quad (1)$$

За допомогою пакету прикладних програм STATISTICA представимо гістограму випадкової величини – висоти контактного проводу на дослідній ділянці «Оп 343-Оп 357» (табл.1) на рис.2.

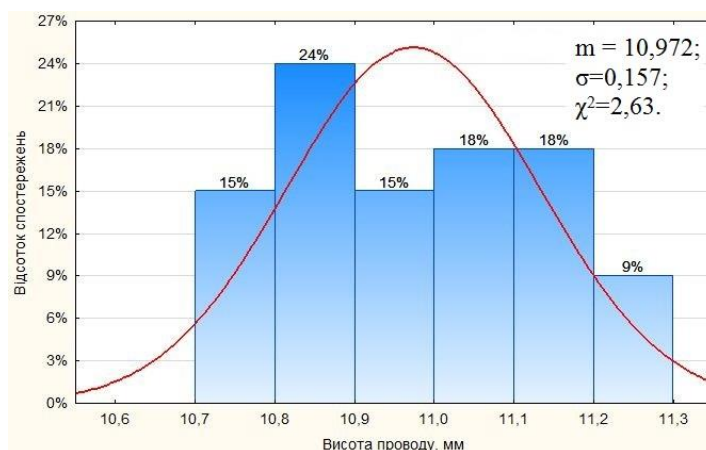


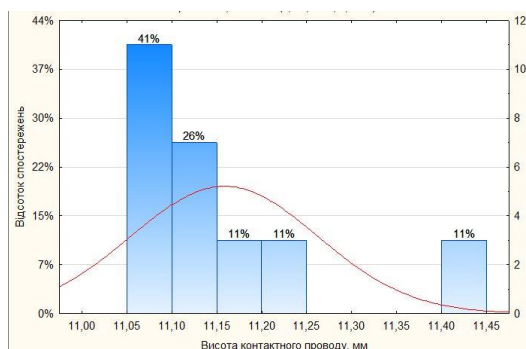
Рис. 2. Гістограма розподілу висоти контактного проводу на дослідній ділянці «Оп 343 - Оп 357». Заміри 30 листопада 2016 року

Для перевірки гіпотези, щодо відповідності нормальному закону розподілу використаємо критерій χ^2 [17]. Розрахункове значення χ^2 для розподілення представленого на рис.2 дорівнює $\chi^2=2,63$, що при кількості ступенів свободи $r = 3$ забезпечує вірогідність на рівні 0,45...0,5, що підтверджує нашу гіпотезу про відповідність нормальному закону розподілу випадкової величини.

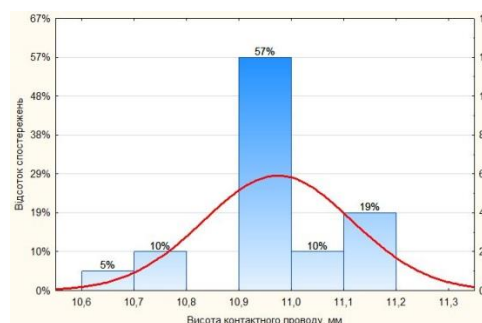
Аналогічно проведемо аналіз експериментальних даних на інших ділянках.

На рис. 3 представлені графіки статистичного одновимірного розподілу випадкової функції висоти контактний проводу на кожній з експериментальних ділянок. Проведені перевірки гіпотези на відповідність нормальному розподілу за критерієм χ^2 для розподілень представлених на рис.3 підтвердили цю гіпотезу.

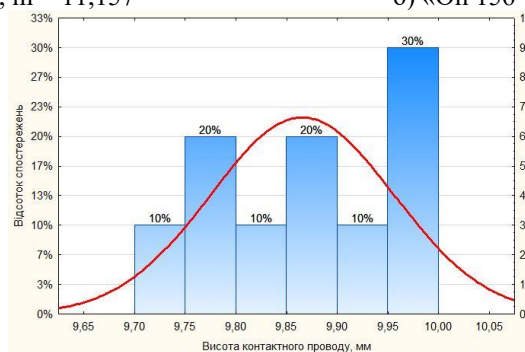
На рис.4 представлені графіки статистичного одновимірного розподілу випадкової функції висоти контактний проводу на кожній з експериментальних ділянок при замірах 30 березня 2017 року. Проведені перевірки гіпотези на відповідність нормальному розподілу за критерієм χ^2 для розподілень представлених на рис.4 підтвердили цю гіпотезу.



а) «Оп 51 - Оп 41»; $m = 11,157$

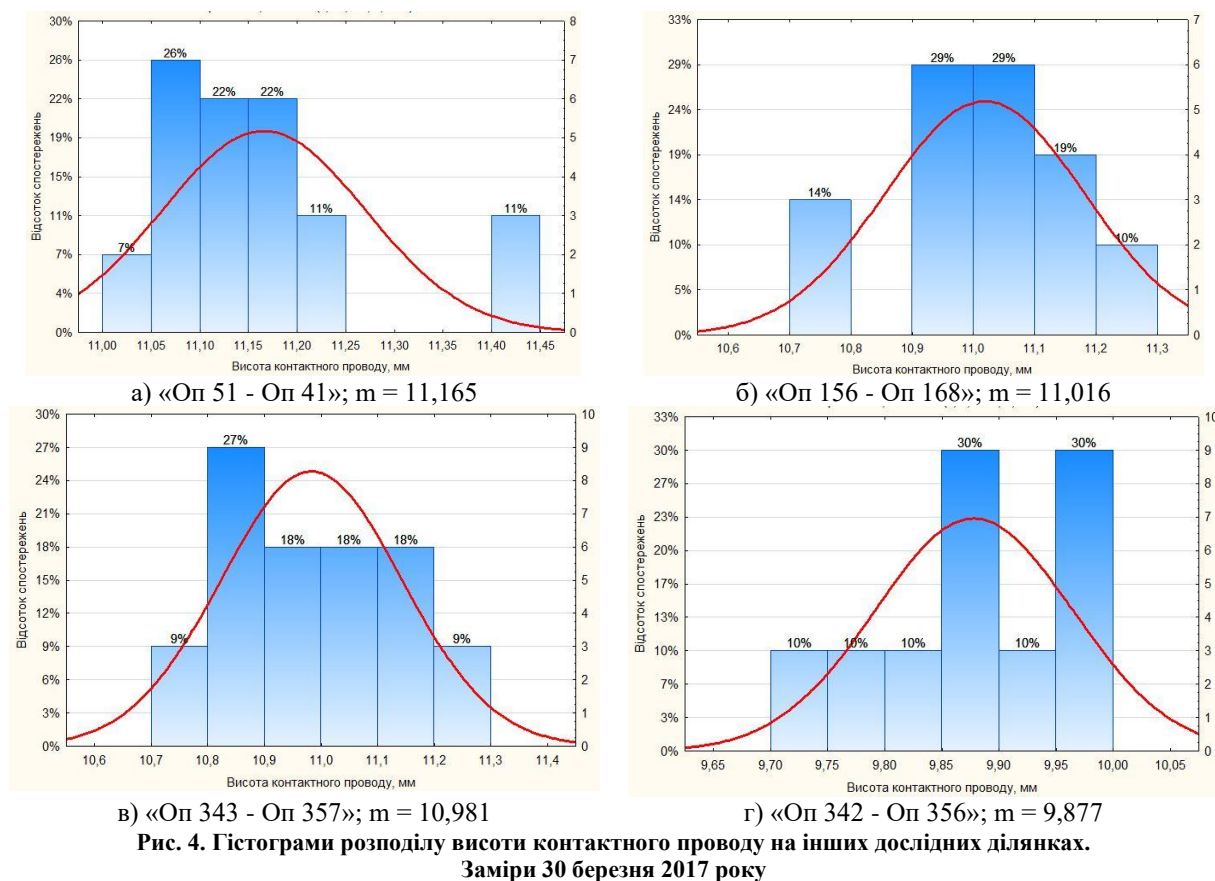


б) «Оп 156 - Оп 168»; $m = 10,973$



в) «Оп 342 - Оп 356»; $m = 9,864$

Рис. 3. Гістограми розподілу висоти контактний проводу на інших дослідних ділянках. Заміри 30 листопада 2016 року



Використовуючи значення математичного очікування величини висоти контактного проводу на кожній з експериментальних ділянок у листопаді 2016 р. та у березні 2017 р. визначимо динаміку зміни висоти. Результати представимо на рис.5.

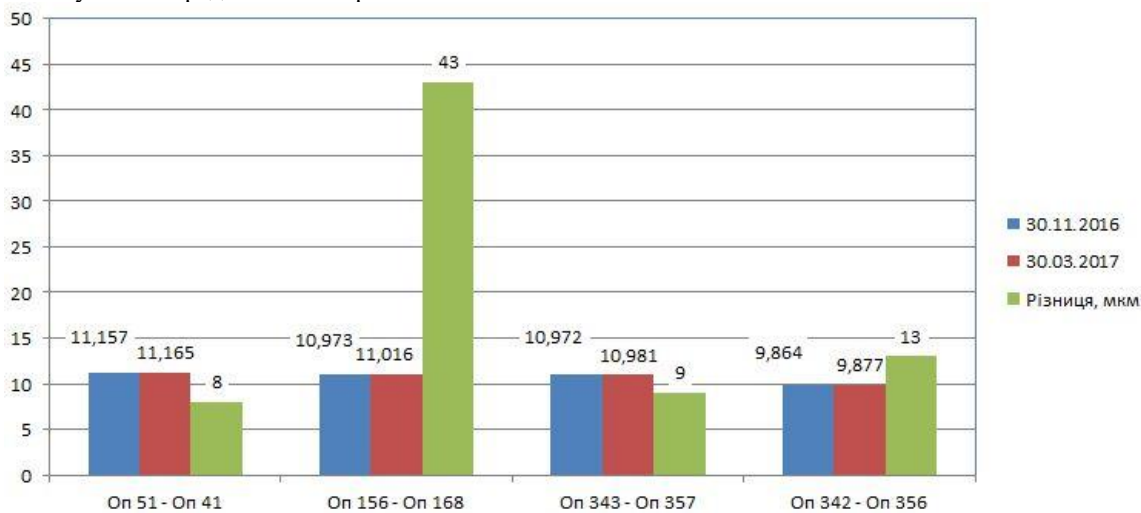


Рис. 5. Динаміка зміни висоти контактного проводу дослідних ділянок в період між 30 листопада 2016 року та 30 березня 2017 року

При порівнянні представлених на рис.5 даних встановлено, що контактний провід за зимовий період «збільшив» свою висоту, тобто замість зносу маємо стійкий ефект його нарощування. Таке явище має досить просте пояснення – на поверхню контактного проводу утворилась стійка захисна плівка, товщина якої на різних ділянках має різне значення, а саме від 8 до 43 мкм.

Утворення захисної плівки на робочій поверхні контактного проводу при використанні матеріалу «Романіт-УВЛШ» для накладок полозів струмоприймачів, вже описувалось і в інших роботах авторів [14, 15].

Під час проведених досліджень, впливу кліматичного фактора на знос контактної провладу при використанні матеріалу «Романіт-УВЛШ» для накладок полозів струмоприймачів електровозів, що працювали на дослідних ділянках встановлено не було.

Висновки.

1. Проведений аналіз експериментальних результатів по визначенню висоти контактної провладу на ділянках змінного струму, при використанні матеріалу «Романіт-УВЛШ» для накладок полозів струмоприймачів електровозів, ймовірно-статистичними методами дозволив встановити відповідність стохастичного процесу зносу контактної провладу нормальному закону.

2. Порівняння значень математичного очікування висот контактної провладу на дослідних ділянках перед початком та наприкінці експериментів підтвердив факт утворення на робочій поверхні контактної провладу стійкої захисної плівки при використанні матеріалу «Романіт-УВЛШ» для накладок полозів струмоприймачів електровозів.

3. Під час проведених досліджень, впливу кліматичного фактора на знос контактної провладу при використанні матеріалу «Романіт-УВЛШ» для накладок полозів струмоприймачів електровозів, що працювали на дослідних ділянках встановлено не було.

Перелік посилань

1. Сергієнко, М. І. (2010). *Основні напрямки роботи Укрзалізниці з енергозбереження та її результати*. Локомотив-інформ. №4. 24-28.
2. Лашко, А. Д. (2001). *Енергозбереження на залізничному транспорті України*. Залізничний транспорт України. №4. 7-11.
3. Малышко, И. В. (2007). *Основные направления энергосбережения на железнодорожном транспорте Украины*. Локомотив-информ. №1. 12-14.
4. Antonov, A. (2017). *Resource evaluation of friction pair «contact wire – contact strip»*. Archives of transport. Vol. 44, Issue 4, 7-14.
5. Gregoria, S. (2017). *An approach to geometric optimisation of railway catenaries*. Vehicle System Dynamics. 1-25. doi:10.1080/00423114.2017.1407434.
6. Wang, H. (2018). *Analysis of the evolvement of contact wire wear irregularity in railway catenary based on historical data*. Dollevoet Vehicle System Dynamics, Volume 56, Issue 8, 2018, Pages: 1207-1232. doi: 10.1080/00423114.2017.1408919.
7. Большаков, Ю. Л. (2015). *Дослідження властивостей струмозмінальних елементів та їх впливу на ефективність роботи трибосистеми «контактний провід – вугільна вставка»*. Наука та прогрес транспорту. № 6(60), 35–44.
8. G. Wu, Wenfu Wei, Guoqiang Gao (2016). *Evolution of the electrical contact of dynamic pantograph–catenary system*. Journal of Modern Transportation. Vol. 24. Iss. 2. P. 132-138. doi: 10.1007/s40534-016-0099-1.
9. Janahmadov, A. Kh, Javadov, M. Y. (2016). *Synergetics and fractals in tribology / A. Kh. Janahmadov, Maksim Javadov*. Springer, 2016. – P. 381. doi: 10.1007/978-3-319-28189-6.
10. Bai, L., Meng, Y., Khan, Z.A. (2017). *The Synergetic Effects of Surface Texturing and MoDDP Additive Applied to Ball-on-Disk Friction Subject to Both Flooded and Starved Lubrication Conditions*. Tribol Lett. Vol. 65(4). P. 115-127. doi: 10.1007/s11249-017-0949-y
11. Берент, В.Я. (2005). *Материалы и свойства электрических контактов в устройствах железнодорожного транспорта*. Интекст.
12. Гершман И.С. (2012). *Токосъемные вставки для токоприемников железнодорожного транспорта*. Вестник ВНИИЖТ, Вып. 4, 3-10.
13. Горобец, В.Л. (2015). *Методология комплексной оценки эксплуатационных качеств накладок токоприемников электроподвижного состава*. Вісник східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. №1(218). 297-302.
14. Муха, А.М., Устименко, Д.В., Балійчук, О.Ю., Куриленко, О.Я., Малишко, І.В., Адамович, Ю.О. (2017). *Знос контактної провладу при його взаємодії з струмоприймачами залізничного електрорухомого складу обладнаними контактними вставками з матеріалу «Романіт-УВЛШ»*. Залізничний транспорт України. № 4. С. 52-58.
15. Ustymenko, D.V., Mukha, A.M., Baliichuk, O.Y., Kurylenko, O.Ya. (2019). *Nanostructures in the formation of the properties of high-current sliding electrical contacts on the electric rolling stock*. IEEE 39th International Conference Electronics and nanotechnology (Elnano), Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, P. 233-236. doi: 978-1-7281-2064-5/19/\$31.00
16. Карташов М.В. (2008). *Імовірність, процеси, статистика*. Київ: Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет».
17. Вентцель Е.С. (2006). *Теория вероятностей*. 10-е изд. Москва: Высшая школа.

Рекомендовано до друку к-том техн. наук, проф. Івановим О.Б.

АННОТАЦИЯ

Цель. Получить закономерность, которая описывала бы стохастический процесс износа контактного провода на железных дорогах Украины.

Методика исследований заключается в обработке вероятностно-статистическими методами результатов экспериментальных данных по определению высоты контактного провода.

Результаты исследования. Выполнена статистическая обработка экспериментальных данных по определению высоты контактного провода на участках переменного тока Львовской железной дороги при проведении эксплуатационных испытаний электровозов оборудованных накладками токоприемников из материала «Романит-УВЛШ».

Научная новизна. Установлено соответствие стохастического процесса износа контактного провода нормальному закону.

Практическое значение. Результаты исследований могут быть положены в основу прогнозных моделей износа контактного провода.

Ключевые слова: *скользящий контакт, контактный провод, высота контактного провода, случайная величина, нормальный закон распределения.*

ABSTRACT

Purpose. Obtain a pattern that would describe the stochastic process of wear of the contact wire on the railways of Ukraine.

The methodology of research consists in processing the results of experimental data on determining the height of the contact wire by probabilistic and statistical methods.

Findings. Statistical processing of experimental data on determining the height of the overhead wire on the alternating current sections of the L'viv railway was carried out during operational tests of electric locomotives equipped with pantograph plates made of «Romanit-UVLSh» material.

The originality. The correspondence of the stochastic process of the contact wire wear to the normal law is established.

Practical implication. The research results can be used as the basis for predictive models of the overhead wire wear.

Keywords: *sliding contact, contact wire, contact wire height, random variable, normal distribution law.*