

УДК 004.05

О.В. ФЕДУХІН\*, Ар.А. МУХА\*

## ОЦІНКА ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ КОНТАКТНОГО ПРОВОДУ ЕЛЕКТРИФІКОВАНИХ ЗАЛІЗНИЧНИХ ДОРІГ

\*Інститут проблем математичних машин і систем НАН України, м. Київ, Україна

**Анотація.** З огляду на те, що нинішній стан контактної мережі електрифікованих залізниць України не відповідає вимогам щодо забезпечення надійної роботи швидкісних поїздів, у статті пропонуються шляхи покращення якості обслуговування (контролю та ремонту) контактної мережі з метою своєчасного виявлення проблемних ділянок, тим самим забезпечуючи запобігання аварій на залізниці. Стаття присвячена вирішенню проблеми визначення залишкового ресурсу контактної мережі (КМ) електрифікованих залізниць. У роботі аналізуються види й основні параметри зношування КМ. Як визначальний параметр зносу запропоновано використовувати залишкову висоту перерізу і площу зношеної частини перерізу КМ. Також встановлено допустимий ступінь зношування КМ. На основі експериментальних даних було визначено залишковий ресурс КМ. У статті пропонуються і розробляються критерії оцінки залишкового ресурсу КМ, що дозволяють знизити експлуатаційні витрати за рахунок збільшення інтервалів між ремонтом. Пропонується використання ймовірнісно-фізичного підходу до оцінки реального технічного стану і прогнозування залишкового ресурсу виробів за відсутності статистики відмов. У межах ймовірнісно-фізичного підходу до оцінки довговічності залучається ймовірнісна модель (DM-розподіл відмов), параметри якої мають фізичну інтерпретацію – середню швидкість зміни визначального параметра (критерію придатності) та коефіцієнт варіації узагальненого процесу деградації. У статті також наведено декілька прикладів розрахунку залишкового ресурсу, які демонструють використання двох ймовірнісно-фізичних методів для оцінки залишкового ресурсу КМ, а саме за результатами контрольованої експлуатації та статистики відмов і відновлення КМ. Отримані в результаті розрахунків дані відповідають чинним рекомендаціям щодо середньої частоти проведення поточного ремонту ділянок КМ.

**Ключові слова:** ймовірнісно-фізичний підхід, залишковий ресурс, ймовірнісно-фізична модель надійності.

**Abstract.** Since the current state of the contact network of electrified railways of Ukraine does not meet the requirements for ensuring the reliable operation of high-speed trains, the article proposes to improve the quality of service (control and repair) of the contact network in order to timely identify problem areas. Thus contributing to the prevention of accidents on the railway. The article is devoted to solving the problem of determining the residual life of the contact wire (CW) of electrified railways. The purpose of the article is to develop methods for estimating the residual life of the CW of electrified railways using a probabilistic-physical model of reliability – DM-distribution of time to failure. The article analyzes the types of gearbox wear and defines the main defining parameters. It is proposed to use the residual height of the section and the area of the worn part of the CW section as the determining main parameters of wear. The permissible degree of gearbox wear has also been established. On the basis of experimental data, the residual life of the CW was determined. Developed and proposed criteria for assessing the residual life of the gearbox, allowing to reduce operating costs by increasing the overhaul interval. It is proposed to use a probabilistic-physical approach to assess the real technical condition and predict the residual life of products when there is no failure statistics. Within the framework of the probabilistic-physical approach, a probabilistic model (DM-distribution of failures) is involved in the assessment of durability, the parameters of which have a physical interpretation - the average rate of change of the determining parameter (validity criterion) and the coefficient of variation of the generalized degradation process. The article provides several examples of residual life calculations that demonstrate the use of two probabilistic-physical methods for estimating the residual life of the CW, namely, based on the results of controlled operation and on the statistics of failures and recovery of the CW. The calculated data obtained

correspond to the current recommendations for the average frequency of the current repair of the CW sections.

**Keywords:** probabilistic-physical approach, residual life, probabilistic-physical model of reliability.

DOI: 10.34121/1028-9763-2022-2-91-101

## 1. Вступ

Точне прогнозування залишкового ресурсу та визначення реального строку служби контактних проводів дозволяє реалізувати їх безпечну експлуатацію та попереджувати наслідки, спричинені аваріями та простоями внаслідок їх обривів.

Згідно з дослідженнями в області визначення залишкового ресурсу, найпоширенішими методиками аналізу надійності обладнання є такі, що враховують основні визначальні параметри та включають аналіз тренду відмов.

Метою статті є побудова діагностичної моделі зміни параметрів на основі встановлення зв'язку між даними випробувань (експлуатації) та граничними значеннями визначального (ресурсного) параметра і діагностичних параметрів.

## 2. Постановка проблеми

Знімання струму з контактної дроти (КП) супроводжується зношуванням дроти та струмоприймача. При підвищенні швидкості руху електрорухомого складу на залізницях України необхідно забезпечити зростання надійності роботи системи електропостачання щодо забезпечення безперервного та якісного струмознімання, що є складним завданням в умовах тенденції старіння контактних мереж [1]. Враховуючи те, що значна частина контактних мереж експлуатується понад 40 років, використання швидкісного транспорту веде до появи цілого ряду технічних та економічних проблем.

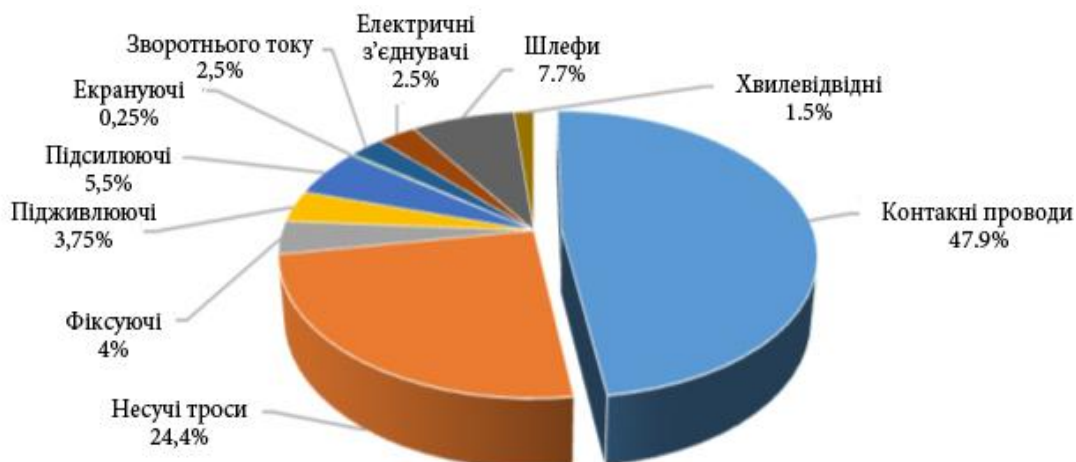


Рисунок 1 – Розподіл пошкоджень проводів та тросів контактної мережі

## 3. Теоретичні основи витрачання ресурсу контактних проводів

Знос контактних проводів (КП) залежно від локалізації поділяється на місцевий та середній. Факторами, що впливають на знос КП, є: матеріал і стан поверхонь, що труться, мастило, величина струму, що знімається, сила натискання струмоприймача на КП, рівномірність еластичності контактної підвіски, якість регулювання контактної мережі і струмоприймачів [2]. Знос контактних проводів можна структурувати в такий спосіб (рис. 2).

ЗНОС КОНТАКТНИХ ПРОВОДІВ		
МЕХАНІЧНИЙ	ЕЛЕКТРИЧНИЙ	ТЕПЛОВИЙ
зношування при прихваті та заїданні	електроерозійне зношування	поступове термічне розміщення
зношування в жорстких точках	зношування при ожеледі	
зношування від втоми	хвилеподібне зношування	
окислювальне зношування	зношування на повітряних проміжках та стрілках	
абразивне зношування	зношування на спряженнях анкерних ділянок	
		миттєве термічне розміщення

Рисунок 2 – Види зносу контактних проводів

*Чинники, що зумовлюють механічне зношування контактних проводів*

Механічний знос КП спричиняється:

- утворенням та руйнуванням тонких оксидних плівок на поверхнях тертя; зазвичай наявність оксидних плівок перешкоджає іншим видам зношування;
- деформуванням поверхонь, що труться, і розтріскуванням наклепаного шару металу з подальшим його видаленням;
- попаданням між поверхнями продуктів зносу, що труться, і зовнішніх твердих частинок (пилу, піску), а також наявністю твердих включень у самих контактних матеріалах;
- переривчастим ковзанням (заїдання та стрибки), що супроводжується важким зносом із глибинним вириванням великих частинок матеріалу подібно до зварювання контактних виступів при повній відсутності мастила та окисних плівок. Якщо одним із контактуючих елементів є графіт, то схоплювання так само, як і зварювання, не відбувається;
- значною зміною контактного натискання, іноді відривами від дроту та іскрінням (фіксатори, затискачі електричних з'єднань тощо).

*Чинники, що зумовлюють електричне зношування контактних проводів*

Електричний знос спричиняється:

- електричною ерозією – плавлення, випаровування та спрямований викид (перенесення) матеріалу під дією електричних розрядів як стійких (дугове струмознімання), так і одиничних нестійких (іскріння);
- ожеледицею – станом контактуючих поверхонь;
- жорсткими точками (фіксатори, затискачі електричних з'єднань тощо);
- повітряними проміжками та повітряними стрілками;
- сполученням анкерних ділянок;

- хвилеподібним зносом – інтенсивне електричне зношування та важкі дугові пошкодження контактного проводу на послідовно розташованих коротких ділянках (100–150 мм), розділених ще більш короткими (10–30 мм) ділянками з добре шліфованою блискучою поверхнею.

*Фактори, що обумовлюють теплове зношування контактних проводів*

Термічне розміцнення частини об'єму дроту під дією теплових імпульсів спричиняється:

- тривалими струмами навантаження;
- віддаленими від джерела струмами короткого замикання (КЗ);
- близькими від джерела струмами КЗ;
- електричною дугою великої потужності;
- електричною дугою невеликої потужності.

*Інтенсивність зношування контактних проводів*

Інтенсивність механічного зношування збільшується при збільшенні натискання струмоприймача і зменшується при підвищенні якості мастила в контакті. Вплив нагріву на інтенсивність зносу різний: з одного боку, попереджає перенаклеп і утомливе руйнування поверхневих шарів; з іншого боку, він сприяє руйнуванню мастила, викликає розміцнення поверхні тертя і знижує її стійкість до абразивного та молекулярно-механічного зносу (схоплювання, задири).

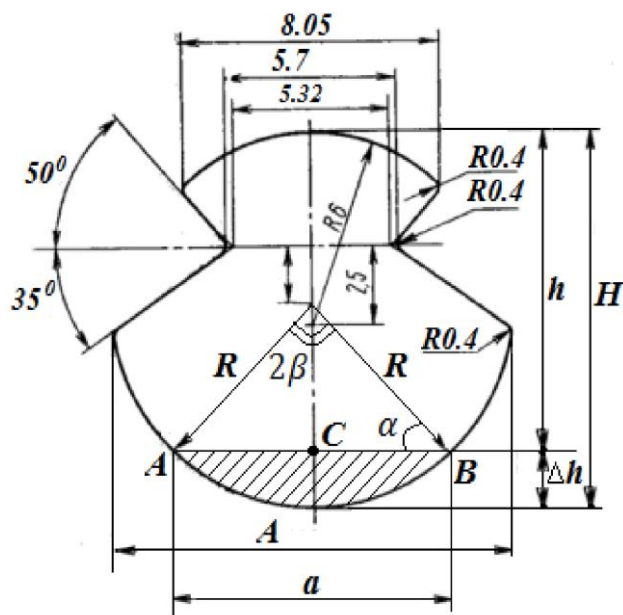


Рисунок 3 – Вид перерізу контактного фасонного дроту

Інтенсивність електричного зносу при тих самих матеріалах контактної пари залежить від щільності струму (значення струму, що припадає на одиницю площі контактної поверхні полоза струмоприймача). На електричний знос впливає вібрація проводів, схоплювання і задирання поверхонь, що труться. Інтенсивність електричного зносу КП вища у місцях торкання, на підйомах, де ЕПС споживає значні струми. Знос зростає при реверсивному русі однієї деталі за іншою через постійну переорієнтацію частинок на поверхні тертя, а також зі збільшенням напруги розтягування основного матеріалу.

Зношування КП визначають побічно, шляхом вимірювання висоти перетину дроту, що залишився,  $h$  (рис. 3).

#### 4. Визначення зносу контактного дроту

Як приклад, у табл. 1 наведено перерахунок значень висоти, що залишилася, перерізу КП  $h$  (рис. 3) значення зносу для круглих проводів перетином  $100 \text{ мм}^2$  (ПУТЭКС [3]).

Таблиця 1 – Перерахунок залишкової висоти перерізу  $h$ , мм фасованих контактних проводів перетином  $100 \text{ мм}^2$  у знос  $S$ ,  $\text{мм}^2$

$h$ , мм	$S$ , $\text{мм}^2$									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
9,0	21,01	20,90	20,79	20,69	20,58	20,47	20,37	20,26	20,16	20,05
1	19,95	19,84	19,73	19,63	19,52	19,42	19,32	19,21	19,11	19,00
2	18,90	18,79	18,69	18,59	18,48	18,38	18,28	18,17	18,07	17,97
3	17,87	17,76	17,66	17,56	17,46	17,36	17,25	17,15	17,05	16,95
4	16,85	16,75	16,65	16,55	16,45	16,35	16,25	16,15	16,05	15,95
5	15,85	15,75	15,65	15,55	15,45	15,35	15,26	15,16	15,06	14,96
6	14,86	14,77	14,67	14,57	14,48	14,38	14,28	14,19	14,09	13,99
7	13,90	13,80	13,71	13,61	13,52	13,42	13,33	13,23	13,14	13,05
8	12,95	12,86	12,76	12,67	12,58	12,48	12,39	12,30	12,21	12,12
9	12,02	11,93	11,84	11,75	11,66	11,57	11,48	11,39	11,29	11,20
10,0	11,11	11,03	10,94	10,85	10,76	10,67	10,58	10,49	10,40	10,32
1	10,23	10,14	10,05	9,97	9,88	9,79	9,71	9,62	9,53	9,45
2	9,36	9,28	9,19	9,11	9,02	8,94	8,85	8,77	8,69	8,60
3	8,52	8,44	8,35	8,27	8,19	8,11	8,03	7,94	7,86	7,78
4	7,70	7,62	7,54	7,46	7,38	7,30	7,22	7,14	7,06	6,99
5	6,91	6,83	6,75	6,68	6,60	6,5	6,44	6,37	6,29	6,22
6	6,14	6,07	5,99	5,92	5,84	5,7	5,70	5,62	5,55	5,48
7	5,40	5,33	5,26	5,19	5,12	5,0	4,97	4,90	4,83	4,76
8	4,69	4,63	4,56	4,49	4,42	4,3	4,28	4,22	4,15	4,08
9	4,02	3,95	3,89	3,82	3,76	3,69	3,63	3,56	3,50	3,44
11,0	3,38	3,31	3,25	3,19	3,13	3,07	3,01	2,95	2,89	2,83
1	2,77	2,71	2,65	2,60	2,54	2,48	2,42	2,37	2,31	2,26
2	2,20	2,15	2,09	2,04	1,99	1,94	1,88	1,83	1,78	1,73
3	1,68	1,63	1,58	1,53	1,48	1,44	1,39	1,34	1,30	1,25
4	1,20	1,16	1,12	1,07	1,03	0,99	0,95	0,90	0,86	0,82
5	0,78	0,75	0,71	0,67	0,63	0,60	0,56	0,53	0,49	0,46
6	0,43	0,40	0,37	0,34	0,31	0,28	0,25	0,22	0,20	0,17
7	0,15	0,13	0,11	0,09	0,07	0,05	0,04	0,02	0,01	0,00

*Примітка 1.* Вимірювання зношування контактних проводів може здійснюватися мобільним інформаційно-вимірювальним комплексом. Швидкодіюча лазерна система діагностики контактного проводу «ЗНОС» призначена для безконтактного вимірювання профілю зношеної частини контактного проводу з подальшим обчисленням залишкової висоти або площі зношеної частини перерізу КП, а також вимірювання положення КП щодо осі струмоприймача.

Таблиця 2 – Характеристики місцевого та середнього зносу КП

Показники зносу контактної дроту та заходи, що вживаються	Значення зносу $S$ , мм <sup>2</sup> та висоти перерізу $h$ , мм контактних проводів номінального перерізу, мм <sup>2</sup>					
	85		100		150	
	S	h	S	h	S	h
Місцевий знос, у якому роблять вставку нового дроту, не більше	30		35		50	
Висота перерізу не менше		7,07		7,77/7,64		9,70
Середнє зношування на анкерній ділянці, при якому проводять суцільну заміну дроту, не більше	25		30		45	
Висота перерізу не менше		7,53		8,20/7,98		10,05

*Примітка 2.* У чисельнику наведено дані фасонного дроту, у знаменнику – фасонного овального.

Таблиця 3 – Гранично допустимі значення площі зносу контактних проводів

Значення показників для номінальної площі перерізу дроту, мм <sup>2</sup>						
Для мідних та легованих проводів				Для бронзових дротів		
	85	100	120	150	120	150
Місцевий знос, мм <sup>2</sup>	30	35	40	50	40	50
Середній знос, мм <sup>2</sup>	25	<b>30</b>	35	45	35	40

*Примітка 3.* Попередні розрахунки [5] показали, що оптимальна періодичність поточного ремонту контактної підвіски становить 1,5–2,5 року (або 13140–21900 год, середня періодичність поточного ремонту 17520 год).

## 5. Ймовірно-фізичні методи розрахунку залишкового ресурсу КП

*Метод 1. За динамікою зносу КП*

У цьому розділі пропонуються процедура оцінки реального технічного стану та прогнозування залишкового ресурсу виробів, коли відсутні відмови, але можуть бути виміряні у процесі експлуатації (випробувань) значення ресурсного (визначального) параметра  $\Pi$ , досягнення яким свого граничного значення  $\Pi_{np}$  призводить до граничного стану або відмови.

Передбачається, що є можливість для періодичного виміру ресурсного (визначального) параметра  $\varphi(t)$  і відомо або задається граничне значення визначального параметра  $\varphi(t) = \Pi_{np}$ .

Проводять вимірювання визначального параметра через певний період (циклів) експлуатації (випробувань)  $\Delta t$ . В результаті вимірювань одержують ряд неубутних значень ресурсного параметра  $\varphi(t)$  для певних зростаючих моментів напрацювання:

$$\varphi(t_1), \varphi(t_2) = \varphi(t_1 + \Delta t), \varphi(t_n) = \varphi(t_{n-1} + \Delta t), \varphi(t_{n+1}) = \varphi(t_n + \Delta t),$$

де  $n$  – кількість приростів (вимірювань).

Як теоретична модель надійності приймається  $DM$ -розподіл напрацювання до відмови [4], оскільки руйнування виробів є незворотним.

$$F(t) = DM(t; \mu, \nu) = \Phi\left(\frac{t - \mu}{\nu\sqrt{\mu t}}\right), \quad (1)$$

де  $\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z \exp\left(-\frac{U^2}{2}\right) dU$  – нормований нормальний розподіл;

$\mu$  – параметр масштабу (середнє напрацювання до відмови);

$\nu$  – коефіцієнт варіації узагальненого процесу деградації;

$t$  – сумарне напрацювання.

Параметрична форма запису  $DM$ -розподілу виглядає так:

$$F(t) = DM(t; a, \nu) = \Phi\left(\frac{at + \Pi_1 - \Pi_0}{\nu\sqrt{at(\Pi_0 - \Pi_1)}}\right), \quad (2)$$

де  $a$  – середня швидкість зміни визначального параметра – критерію придатності;

$\Pi_0$  – початкове вимірне значення визначального параметра;

$\Pi_1$  – максимальне вимірне значення визначального параметра.

У нашому випадку параметрами  $DM$ -розподілу є середня лінійна швидкість зносу  $a$  та коефіцієнт варіації процесу зносу  $\nu$ .

За даними вимірювань обчислюють середню швидкість зміни визначального параметра:

$$a = \frac{1}{\Delta t \cdot n} \cdot \sum_{i=1}^n [\varphi(t_{i+1}) - \varphi(t_i)] = \frac{1}{\Delta t \cdot n} \cdot \sum_{i=1}^n \Delta \varphi_i. \quad (3)$$

Коефіцієнт варіації зміни визначального параметра визначають такі рекомендації (табл. 4).

Таблиця 4 – Значення коефіцієнтів варіації основних процесів деградації (руйнування)

Вид процесу деградації	Коефіцієнт варіації процесу деградації
1. Механічний знос	0,2 – 0,5
2. Тепловий знос	0,5 – 0,7
3. Електричний знос	0,7 – 1,5

Якщо встановлені процеси руйнування  $\nu_i$  та їх пайова участь  $p_i$  (проценти/100) у формуванні відмов, очікуване середнє значення коефіцієнта варіації узагальненого процесу деградації визначають за формулою

$$\nu = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k \nu_i^2 p_i^2}{\sum_{i=1}^k p_i^2}}, \quad (4)$$

де  $\nu_i$  – середнє значення коефіцієнта варіації  $i$ -го процесу деградації (наприклад, об'ємна втома, контактна втома, механічне зношування та ін.  $i = 1, 2, \dots, k$ ). При цьому  $\sum_{i=1}^k p_i = 1$ .

*Примітка 4.* Досвід експлуатації та аналіз фізики відмов механічного обладнання дозволяє встановити, що коефіцієнт варіації узагальненого процесу деградації цих виробів знаходиться в діапазоні 0,5–1,0.

Якщо визначальний параметр виробу змінюється монотонно (незворотні зміни, тобто всі  $\Delta\varphi_i$  мають знак плюс або деякі дорівнюють нулю), то середній залишковий ресурс обчислюють за формулою

$$\tilde{\pi}(\tau) = \frac{(P_{np} - P_1)}{a} \left( 1 + \frac{v^2}{2} \right), \quad (5)$$

де  $P_{np}$  – граничне значення визначального параметра (критерію придатності);

$\tau$  – момент експлуатації (сумарне напрацювання), в який проводять оцінку рівня реальної надійності і прогнозування залишкового ресурсу (терміну служби).

*Приклад 1.* За наслідками підконтрольної експлуатації електрифікованої залізничної ділянки була отримана залежність величини середнього зносу КП на анкерній ділянці із круглими фасонними мідними дротами номінальним перерізом 100 мм<sup>2</sup> (табл. 5).

Таблиця 5 – Приклад залежності залишкової висоти перерізу та середнього зносу КП від терміну експлуатації ділянки

№ п/п	Срок експлуатації $t$ , год	Остаточна висота перетину $h$ , мм	Середній знос $S$ , мм <sup>2</sup>
1	3000	11,3	1,53
2	5000	10,91	3,95
3	7000	10,42	7,62
4	9000	9,52	15,65

*Примітка 5.* Перерахунок вимірних значень залишкової висоти перерізу КП провадився з використанням табл. 1.

Критерій граничного стану (за даними табл. 2, 3) – знос понад 30% від номінальної площі перерізу дроту, тобто 30 мм<sup>2</sup> при остаточній висоті 8,2 мм.

Динаміка зміни величин залишкової висоти та зносу КП від часу експлуатації ділянки проілюстрована на рис. 4, 5.

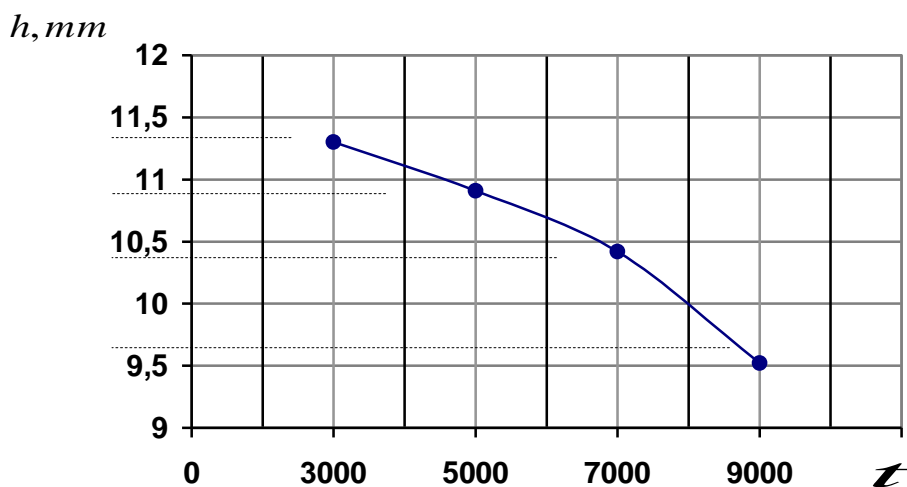


Рисунок 4 – Динаміка зміни залишкової висоти КП від часу експлуатації, год



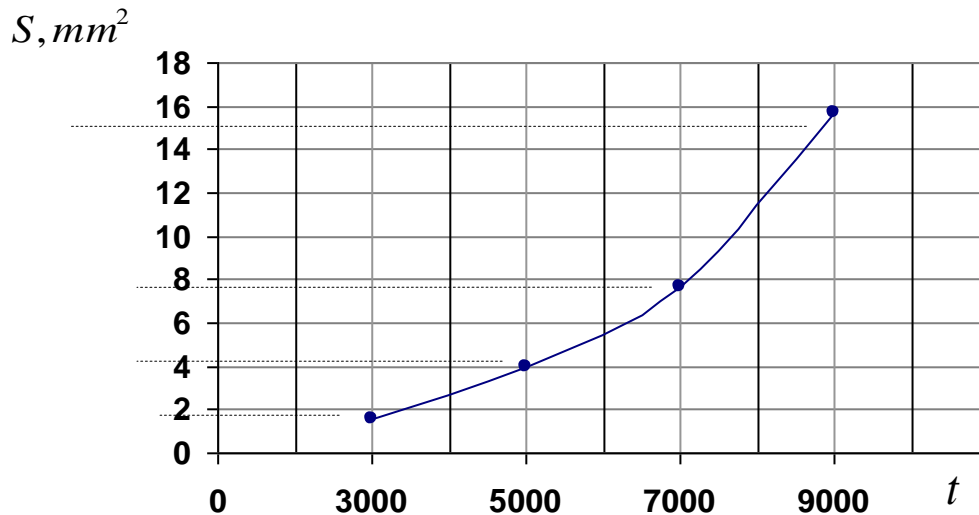


Рисунок 5 – Динаміка зміни величини зношування КП від часу експлуатації, год

За даними вимірів (табл. 5) обчислюємо середню швидкість зміни визначального параметра – середнього зносу:

$$a = \frac{1}{\Delta t \cdot n} \cdot \sum_{i=1}^n \Delta \varphi_i.$$

$n=4$ ;

$\Delta t=2000$  год;

$\Delta \varphi_1=3,95-1,53=2,42$  мм<sup>2</sup>;

$\Delta \varphi_2=7,62-3,95=3,67$  мм<sup>2</sup>;

$\Delta \varphi_3=15,65-7,62=8,03$  мм<sup>2</sup>;

$a=14,12 / 8000=0,0018$  мм<sup>2</sup>/год.

Обчислюємо величину коефіцієнта варіації узагальненого процесу деградації за даними табл. 4.

$$v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k v_i^2 p_i^2}{\sum_{i=1}^k p_i^2}}.$$

$k=3$ ;

$v_1=0,2-0,5=0,7/2=0,35$ ;

$v_2=0,5-0,7=1,2/2=0,6$ ;

$v_3=0,7-1,5=2,2/2=1,1$ ;

$p_1=0,5$ ;  $p_2=0,2$ ;  $p_3=0,3$ ;

$v=0,63$ ;

$\Pi_1=15,65$  мм<sup>2</sup> – максимальне вимірне значення визначального параметра;

$\Pi_{np}=30$  мм<sup>2</sup> – граничне значення визначального параметра;

Обчислюємо величину залишкового ресурсу КП після закінчення  $\tau=8000$  год експлуатації:

$$\tilde{\pi}(\tau) = \frac{(\Pi_{np} - \Pi_1)}{a} \left( 1 + \frac{v^2}{2} \right) = 9550 \text{ год.}$$

Обчислюємо повний середній ресурс ділянки  $R = \tau + \tilde{\pi}(\tau) = 8000 + 9550 = 17550$  год.

*Метод 2. За статистикою відмов та відновлення КП*

За результатами підконтрольної експлуатації визначається математичне очікування середнього напрацювання на відмову КП [5]:

$$\mu = \mu_O + \mu_B,$$

де  $\mu_O$  – математичне очікування потоку відмов;

$\mu_B$  – математичне очікування потоку відновлень.

Як теоретичну модель надійності використовуємо *DM*-розподіл (1) [4].

Математичне очікування залишкового ресурсу:

$$\pi(\tau) = \frac{\left[ \mu \left( 1 + \frac{\nu^2}{2} \right) - \tau \right] \Phi \left( \frac{\mu - \tau}{\nu \sqrt{\mu \tau}} \right) + \frac{\mu \nu^2}{2} \exp \left( \frac{2}{\nu^2} \right) \Phi \left( - \frac{\mu + \tau}{\nu \sqrt{\mu \tau}} \right) + \frac{\nu \sqrt{\mu \tau}}{\sqrt{2\pi}} \exp \left[ - \frac{(\tau - \mu)^2}{2\nu^2 \mu \tau} \right]}{\Phi \left( \frac{\mu - \tau}{\nu \sqrt{\mu \tau}} \right)}. \quad (6)$$

Гамма-процентний залишковий ресурс:

$$\pi_\gamma(\tau) = \mu \left( 1 + \frac{\nu^2 U_{\gamma^*}^2}{2} - \nu U_{\gamma^*} \sqrt{1 + \nu^2 U_{\gamma^*}^2 / 4} \right) - \tau, \quad (7)$$

де  $U_{\gamma^*}$  – квантиль нормованого нормального розподілу рівня  $\gamma^*$ ;

$$\gamma^* = \gamma \cdot \Phi \left( \frac{\mu - \tau}{\nu \sqrt{\mu \tau}} \right).$$

*Приклад 2.* Визначити залишковий ресурс контактної мережі, якщо остання планова діагностика стану КП проводилася після закінчення  $\tau = 8000$  год експлуатації, за якої було уточнено її експлуатаційну надійність [5].

Обчислимо величину залишкового ресурсу КП за формулою (6), де

$\mu_O = 10000$  год,  $\mu_B = 1$  год;

$\mu = 10001$  год;

$\tau = 8000$  год;

$\nu = 0,63$ .

$$\pi(\tau) = \frac{\left[ 10001 \left( 1 + \frac{0,63^2}{2} \right) - 8000 \right] \Phi \left( \frac{10001 - 8000}{0,63 \sqrt{10001 \cdot 8000}} \right) + \frac{10001 \cdot 0,63^2}{2} \exp \left( \frac{2}{0,63^2} \right) \Phi \left( - \frac{10001 + 8000}{0,63 \sqrt{10001 \cdot 8000}} \right) + \frac{0,63 \sqrt{10001 \cdot 8000}}{\sqrt{2 \cdot 3,14}} \exp \left[ - \frac{(8000 - 10001)^2}{2 \cdot 0,63^2 \cdot 10001 \cdot 8000} \right]}{\Phi \left( \frac{10001 - 8000}{0,63 \sqrt{10001 \cdot 8000}} \right)}$$

$$= \frac{4001,2 \cdot 0,6293 + 2000 \cdot 148,4 \cdot 0,007 + 5635 \cdot 0,87}{0,6293} = 9498 \text{ год.}$$

Обчислюємо повний середній ресурс ділянки  $R = \tau + \tilde{\tau}(\tau) = 8000 + 9498 = 17498$  год.

## 6. Висновки

На модельних прикладах продемонстровано застосування двох імовірнісно-фізичних методів оцінки залишкового ресурсу КП.

За методом 1 середній залишковий ресурс КП після закінчення  $\tau = 8000$  год експлуатації становив  $\tilde{\tau}(\tau) = 9550$  год.

За методом 2 середній залишковий ресурс КП після закінчення  $\tau = 8000$  год експлуатації становив  $\tilde{\tau}(\tau) = 9498$  год.

Запропоновані у статті методи дозволили отримати значення  $R = 17500$  год для повного ресурсу ділянки КП. Отримані результати відповідають рекомендаціям [5] для середньої періодичності поточного ремонту ділянки КП кожні 17520 год (2 роки), що цілком підтверджує справедливість наведених розрахунків.

## СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Антонов А.В. Определение направлений повышения эффективности работы системы «контактный провод-токоприемник» при внедрении скоростного движения. *Вестник Белорусского государственного университета транспорта: Наука и транспорт*. 2017. № 1 (34). С. 14–17.
2. Ли В.Н. Совершенствование методов и средств неразрушающего контроля элементов контактной сети и токоприемников электроподвижного состава электрифицированных железных дорог: дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.07. URL: <https://www.dissercat.com/content/sovershenstvovanie-metodov-i-sredstv-nerazrushayushchego-kontrolya-elementov-kontaktnoi-seti>.
3. ЦЭ 197. Правила устройства и технической эксплуатации контактной сети электрифицированных железных дорог: 12.07.1993. URL: [https://ohranatruda.ru/ot\\_biblio/norma/246779/](https://ohranatruda.ru/ot_biblio/norma/246779/).
4. Стрельников В.П., Федухин А.В. Оценка и прогнозирование надёжности электронных элементов и систем. К.: Логос, 2002. 486 с.
5. Болтаев О.Т., Ахмедова Ф.А., Нуриддинова Ш.Ф. Закономерности отказов и вопросы диагностики контактной сети. *Universum. Технические науки*. 2020. № 7 (76). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/9970>.

*Стаття надійшла до редакції 29.03.2022*