

УДК 629.42

МОДЕЛЮВАННЯ ДООПРАЦЮВАННЯ ОБЛАДНАННЯ ЛОКОМОТИВІВ

Д-р техн. наук О. С. Крашенінін, канд. техн. наук О. О. Шапатіна,
асп. К. С. Бондаренко

MODELING REFINEMENT OF LOCOMOTIVE EQUIPMENT

D.Sc. (Tech.) O. Krashenin, PhD (Tech.) O. Shapatina,
postgraduate student K. Bondarenko

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.214.2025.351759>



Анотація. Зі створенням нових зразків локомотивної техніки виникає необхідність проведення комплексу заходів, пов'язаних із доведенням їх до необхідних вимог щодо забезпечення надійності. Причина цього полягає в конструкторському і технологічному недоопрацюванні окремого обладнання локомотивів, що призводить до появи джерел відмов. У статті розглянуто декілька методичних підходів, що спрямовані на усунення причин відмов і, відповідно, підвищення надійності локомотивного обладнання за рахунок їх доопрацювання.

Ключові слова: випробування, джерело відмов, доопрацювання, імовірність безвідмовної роботи, локомотив, надійність, обладнання.

Abstract. When creating new models of locomotive equipment, it becomes necessary to implement a set of measures to bring them into compliance with the required reliability standards. This is due to design and manufacturing deficiencies in individual locomotive components, which introduce sources of failure. Accordingly, this paper examines several methodological approaches aimed at eliminating the causes of failures and, consequently, improving the reliability of locomotive equipment through a refinement process. Specifically, during the experimental refinement phase, equipment prototypes undergo numerous modifications to eliminate design and manufacturing deficiencies. The primary information guiding this refinement process is obtained experimentally from the results of additional tests. The main reason necessitating the testing and refinement of newly developed equipment is the presence of failure sources in the initial product, namely: design shortcomings and manufacturing defects. Existing models for ensuring reliability growth are based on two approaches. In the first approach, a specific curve is selected to model the reliability growth trend, and its parameters are then estimated using experimental results. In the second approach, the identification of the reliability growth trend is preceded by an analysis of the stochastic mechanism of the manifestation and elimination of failure sources. From this analysis, reliability growth equations are derived, and only then are the parameters of the reliability growth model estimated. This second approach enables an a priori analysis of the equipment's reliability improvement process. Therefore, based on the analyzed mathematical methods for solving the problems of locomotive equipment refinement across several implementation variants of reliability growth curves, this paper develops an algorithm for the calculation and optimization of the parameters of the equipment refinement model. Furthermore, calculations are presented to determine the probability of failure-free operation of the locomotive equipment for a range of these reliability growth curve implementations.

Keywords: equipment, failure sources, locomotive, probability of failure-free operation, refinement, reliability, testing.

Вступ. У залізничній галузі за останні роки виникло багато невідкладних завдань на тлі зовнішнього втручання в політичне та економічне життя країни фактора воєнних дій. Українська промисловість втратила велику кількість промислових підприємств, ресурсів і територій. Флагмани локомотивобудування в Україні були захоплені або зруйновані.

Ремонтна інфраструктура, яка і раніше перебувала в глибокій стагнації, неспроможна повною мірою реагувати на ці виклики [1]. Навіть сучасний рухомий склад закордонного виробництва, експлуатований на залізницях України, досить складно підтримувати в працездатному стані.

Водночас, як показав досвід експлуатації закордонного рухомого складу, необхідно застосовувати науково-

обґрунтовану політику з утримання всіх засобів транспорту і їхнього обладнання. Це стосується і можливості використання математичних методів щодо реалізації стратегії проведення випробувальних (доводочних) робіт для обладнання, що використовують на тяговому рухомому складі. Усе це визначає актуальність моделювання процедури доопрацювання окремого обладнання локомотивів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблемам підвищення надійності в теоретичному аспекті присвячені фундаментальні праці, зокрема Б. Гнеденка [2], роботи закордонних і вітчизняних учених [3—5]. У них розкрито проблеми забезпечення надійності технічних об'єктів у різних галузях промисловості [6—8]. Крім того, широкого

розвитку набули роботи наукового і прикладного напрямів з удосконалення системи ТО, ПР ТРС [9, 10], присвячені оптимізації стратегії і тактики ТО, ПР ТРС. Характерною рисою цих досліджень є застосування математичних методів, таких як теорії ймовірності і математичної статистики, масового обслуговування, методи динамічного і лінійного програмування, теорія надійності [5]. Низка досліджень присвячена оптимізації витрат на утримання ТРС за життєвий цикл [9].

Прийшло розуміння необхідності удосконалення системи ТО, ПР ТРС за рахунок широкого запровадження засобів і технологій оцінювання технічного стану обладнання ТРС за рахунок використання діагностичних приладів і комплексів, створення АСУ надійністю ТРС, переходу на сервіс ТРС [9, 10].

Однак методики підвищення надійності локомотивного обладнання були прерогативою локомотивобудівельних заводів і випробувальних полігонів ТРС [9].

Мета та завдання дослідження. Мета статті полягає в дослідженні підходів для моделювання процедури доопрацювання локомотивного обладнання. З урахуванням цього поставлені такі завдання:

1. Проаналізувати математичні підходи щодо проблеми доопрацювання локомотивного обладнання.

2. Розробити алгоритм розрахунку і оптимізації параметрів моделі доопрацювання локомотивного обладнання.

3. Виконати розрахунки з визначення ймовірності безвідмовної роботи (ІБР) локомотивного обладнання.

Основна частина дослідження. У процесі експериментального доопрацювання дослідні зразки обладнання локомотивів зазвичай зазнають численних змін для усунення конструкторських і технологічних недоопрацювань. Основу та інформацію для доопрацювання здобувають експериментально в результаті проведення додаткових випробувань. Головною причиною, що призводить до необхідності

випробовувати і доопрацьовувати розроблюване обладнання, є наявність у недоопрацьованому виробі джерел відмов (ДВ): недоліків проєктування і дефектів технології виготовлення.

Існуючі моделі із забезпечення зростання ІБР підпорядковані двом підходам. У першому підході для моделювання тенденції зростання ІБР підбирають деяку криву і далі, використовуючи результати експериментів, оцінюють параметри цієї кривої. У другому підході виявленню тенденції зростання ІБР передують аналіз випадкового механізму прояву і усунення джерел відмов, виводять рівняння зростання ІБР, а потім уже оцінюють параметри моделі зростання надійності. Другий підхід дає змогу провести апіорний аналіз процесу підвищення надійності обладнання.

Розглянемо гіперболічну криву зростання ІБР обладнання або досягнення успіху для доопрацювання обладнання. У цій моделі зростання ІБР обладнання розглядають експериментальне доопрацювання, що складається з l етапів.

На кожному j -му етапі ($j = \overline{1, l}$) проводять n_j випробувань, за результатами яких доопрацьовують обладнання для усунення причин відмов. Як рівняння гіперболічної кривої зростання ІБР використовують залежність вигляду [5, 9]

$$P_j = P_\infty - \frac{a}{j^c}, \quad j = \overline{1, l}, \quad (1)$$

де P_j — ймовірність успіху в одному випробуванні на j -му етапі;

P_∞ — гранично досягнена ймовірність успіху для $j \rightarrow \infty$;

a, c — параметри моделі (можливості підвищення надійності за рахунок доопрацювання).

Оцінки $\hat{P}_\infty$ і $\hat{a}$ можна отримати методом найменших квадратів (МНК) за формулами [5]

$$\hat{a} = \frac{\varphi \sum_{j=1}^l \frac{m_j}{n_j} - l \sum_{j=1}^l \frac{1}{j^c} \cdot \frac{m_j}{n_j}}{l\varphi - \varphi^2}, \quad (2)$$

$$\hat{p}_{\infty} = \frac{\psi \sum_{j=1}^l \frac{m_j}{n_j} - l \sum_{j=1}^l \frac{1}{j^c} \cdot \frac{m_j}{n_j}}{l\psi - \varphi^2}, \quad (3)$$

де n_j — кількість випробувань на j -му етапі;
 m_j — кількість успіхів у j -й серії
 випробувань.

Нехай кількість етапів відпрацювань
 $l=6$, за результатами яких отримані такі
 дані (табл. 1).

Таблиця 1

Вихідні дані

Номер j етапу відпрацювань	Кількість n_j випробувань	Кількість m_j зафіксованих успішних результатів	Частота успіхів $\frac{m_j}{n_j}$
1	12	8	0,67
2	9	7	0,78
3	14	11	0,79
4	33	30	0,91
5	39	37	0,95
6	49	48	0,98

Прийmemo значення $c=1$. Параметри
 φ і ψ оцінемо за формулами

$$\varphi = \sum_{j=1}^l \frac{1}{j^c}; \quad \psi = \sum_{j=1}^l \frac{1}{j^{2c}}.$$

Розглянемо спочатку випадок, коли
 $l=5$.
 Тоді

$$\varphi = \sum_{j=1}^5 \frac{1}{j} = \frac{1}{1} + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} + \frac{1}{5} = 2,283;$$

$$\psi = \frac{1}{1^2} + \frac{1}{2^2} + \frac{1}{3^2} + \frac{1}{4^2} + \frac{1}{5^2} = 1 + 0,25 + 0,111 + 0,0625 + 0,04 = 1,464;$$

$$\sum_{j=1}^5 \frac{m_j}{n_j} = 0,67 + 0,78 + 0,79 + 0,91 + 0,95 = 4,09;$$

$$\sum_{j=1}^5 \frac{1}{j} \cdot \frac{m_j}{n_j} = 1 \cdot 0,67 + 0,5 \cdot 0,78 + 0,33 \cdot 0,79 + 0,25 \cdot 0,91 + 0,2 \cdot 0,95 = 1,74 ;$$

$$\hat{a} = \frac{2,283 \cdot 4,09 - 5 \cdot 1,74}{5 \cdot 1,464 - (2,283)^2} = \frac{9,334 - 8,672}{7,318 - 5,214} = \frac{0,662}{2,104} = 0,314 ;$$

$$\hat{P}_{\infty} = \frac{1,464 \cdot 4,09 - 2,283 \cdot 1,74}{5 \cdot 1,464 - (2,283)^2} = \frac{5,983 - 3,96}{2,104} = \frac{2,023}{2,104} = 0,961 .$$

За допомогою додаткової інформації на шостому етапі визначимо

$$\varphi = 2,283 + \frac{1}{6} = 2,45 ; \quad \psi = 1,464 + \frac{1}{6^2} = 1,491 ;$$

$$\sum_{j=1}^6 \frac{m_j}{n_j} = 4,09 + 0,98 = 5,1 ;$$

$$\sum_{j=1}^5 \frac{1}{j} \cdot \frac{m_j}{n_j} = 1,74 + 0,98 \cdot 0,167 = 1,74 + 0,17 = 1,91 ;$$

$$\hat{a} = \frac{2,45 \cdot 5,1 - 6 \cdot 1,91}{6 \cdot 1,491 - (2,45)^2} = 0,343 ;$$

$$\hat{P}_{\infty} = \frac{1,491 \cdot 5,1 - 2,45 \cdot 1,91}{6 \cdot 1,491 - (2,45)^2} = 0,9928 .$$

Знайдемо оцінку ІБР обладнання у випробуванні перед проведенням першого доопрацювання:

$$\hat{P}_1 = P_{\infty} - \frac{\hat{a}}{1} = 0,9928 - 0,343 = 0,649 .$$

А для 10 етапів доопрацювання

$$\hat{P}_{10} = 0,9928 - \frac{0,343}{10} = 0,958 .$$

Отже, за рахунок додаткових етапів доопрацювання задача з підвищення ІБР обладнання розв'язана.

Розглянемо зростання ІБР обладнання за експоненційною кривою залежно від

кількості проведених доопрацювань за формулою [5]

$$P_j = P_\infty - (P_\infty - P_0) \exp(-b(j-1)) \quad (4)$$

або

$$P_j = \beta + \beta_1 \cdot c^{j-1} = cP_j + d, \quad (5)$$

де параметри моделі

$$\beta_0 = P_\infty; \quad \beta_1 = P_0 - P_\infty; \quad c = e^{-b}; \quad d = (1-c)P_\infty; \quad P_1 = P_0. \quad (6)$$

Нехай за експериментальними даними відомі параметри експоненційної кривої: $P_\infty=0,95$; $P_0=0,05$; $b=0,35$.

Визначимо ІБР для доопрацювання обладнання між десятим та одинадцятим доопрацюваннями:

$$P_{10} = 0,95 - (0,95 - 0,05) \cdot \exp(-0,35 \cdot (10 - 1)) = 0,9114;$$

$$\beta_0 = 0,95; \quad \beta_1 = 0,05 - 0,95 = -0,9; \quad c = e^{-0,35} = 0,7047;$$

$$d = (1 - 0,7047) \cdot 0,95 = 0,2805.$$

Тоді, за виразом (5),

$$P_{j+1} = 0,7047 P_j + 0,2805,$$

одержуємо

$$P_{11} = 0,7047 \cdot 0,9114 + 0,2805 = 0,925.$$

Як і в попередній моделі, зі збільшенням кількості етапів доопрацювань досягають зростання ІБР обладнання.

У разі, коли необхідно оцінити параметри експоненційної моделі зростання ІБР обладнання, скористаємося МНК [5].

Критерієм близькості експоненційної кривої до експериментальної послідовності частотних оцінок ІБР є така сума квадратів:

$$F(c_v) = \sum_{j=1}^l \left(\frac{m_j}{n_j} - \hat{\beta}_{0v} - \hat{\beta}_{1v} \cdot c_v^{j-1} \right)^2 \rightarrow \min, \quad (7)$$

де C_v — значення параметра моделі (5), що зафіксовано на v -му кроці процедури оцінювання параметрів;

$\hat{\beta}_{0v}, \hat{\beta}_{1v}$ — оцінки параметрів моделі, що отримані на v -му кроці,

$$\hat{\beta}_{0v} = \frac{S_{2v} \cdot S_3 - S_{1v} \cdot S_{4v}}{lS_{2v} - S_{1v}^2}; \quad (8)$$

$$\hat{\beta}_{1v} = \frac{lS_{4v} - S_{1v} \cdot S_3}{lS_{2v} - S_{1v}^2}, \quad (9)$$

причому

$$S_{1v} = \frac{1 - c_v^l}{1 - c_v}; \quad (10)$$

$$S_{2v} = \frac{1 - c_v^{2l}}{1 - c_v^2}; \quad (11)$$

$$S_3 = \sum_{j=1}^l \frac{m_j}{n_j}; \quad (12)$$

$$S_{4v} = \sum_{j=1}^l c_v^{j-1} \cdot \frac{m_j}{n_j}. \quad (13)$$

Початкове наближення c_1 величини c визначають за формулою

$$c_1 = \frac{\hat{P}_\infty - \frac{m_{j+1}}{n_{j+1}}}{\hat{P}_\infty - \frac{m_j}{n_j}}, \quad (14)$$

де $\hat{P}_\infty$ — попередня оцінка параметра P_∞ ,
 $\frac{m_j}{n_j} < \hat{P}_\infty < 1$.

Нехай за $l = 6$ етапів було проведено доопрацювання обладнання, результати яких наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Вихідні дані

Номер j етапу відпрацювань	Кількість n_j випробувань	Кількість m_j зафіксованих успішних результатів	Частота успіхів $\frac{m_j}{n_j}$
1	20	3	0,15
2	25	11	0,44
3	20	14	0,7
4	25	19	0,76
5	20	15	0,75
6	30	24	0,8

Знаходимо початкові наближення c_1 параметра c за співвідношенням (14). У разі $i=1$ і $\hat{P}_\infty=0,95$ маємо

$$c_1 = \frac{0,95 - 0,44}{0,95 - 0,15} = 0,61;$$

$$S_{11} = \frac{1 - 0,61^6}{1 - 0,61} = \frac{0,948}{0,39} = 2,43;$$

$$S_{21} = \frac{1 - 0,61^{12}}{1 - 0,61^2} = \frac{0,9973}{0,628} = 1,588;$$

$$S_3 = \sum_{j=1}^l \frac{m_j}{n_j} = 0,15 + 0,44 + 0,7 + 0,76 + 0,75 + 0,8 = 3,6;$$

$$S_{4v} = \sum_{j=1}^l (0,61)^{j-1} \cdot \frac{m_j}{n_j} = (0,61)^0 \cdot 0,15 + (0,61)^1 \cdot 0,44 + (0,61)^2 \cdot 0,7 + \\ + (0,61)^3 \cdot 0,76 + (0,61)^4 \cdot 0,75 + (0,61)^5 \cdot 0,8 = 0,15 + 0,2684 + 0,2605 + \\ + 0,1725 + 0,1038 + 0,0676 = 1,023;$$

$$\hat{\beta}_{0v} = \frac{1,588 \cdot 3,6 - 2,43 \cdot 1,023}{6 \cdot 1,588 - (2,43)^2} = \frac{5,7168 - 2,4859}{9,528 - 5,905} = \frac{3,03}{3,623} = 0,892;$$

$$\hat{\beta}_{1v} = \frac{6 \cdot 1,023 - 2,43 \cdot 3,6}{6 \cdot 1,588 - (2,43)^2} = \frac{6,138 - 8,748}{3,623} = -\frac{2,61}{3,623} = -0,72;$$

$$\hat{P}_{\infty} = \hat{\beta}_{0v} = 0,892;$$

$$\hat{P}_{01} = 0,892 - 0,72 \cdot (0,61)^0 = 0,172;$$

$$F(c_1) = \sum_{j=1}^6 \left[\left(0,15 - 0,892 - (-0,72) \cdot (0,61)^0 \right)^2 + \left(0,44 - 0,892 - (-0,72) \cdot (0,61)^1 \right)^2 + \right. \\ \left. + \left(0,7 - 0,892 - (-0,72) \cdot (0,61)^2 \right)^2 + \left(0,76 - 0,892 - (-0,72) \cdot (0,61)^3 \right)^2 + \right. \\ \left. + \left(0,75 - 0,892 - (-0,72) \cdot (0,61)^4 \right)^2 + \left(0,8 - 0,892 - (-0,72) \cdot (0,61)^5 \right)^2 \right] = \\ = 0,00048 + 0,00016 + 0,0058 + 0,00099 + 0,00179 + 0,00097 = 0,0102 (0,1\%).$$

Для вибору параметрів кривої ІБР розроблено алгоритм, поданий на рисунку, за яким виконані розрахунки оптимальних значень параметрів, що занесені в табл. 3.

Із наведених розрахунків оптимальні значення параметрів моделі такі:
 $\hat{P}_{\infty} = \hat{\beta}_0 = 0,8210$; $\hat{\beta}_1 = 0,6814$; $c = 0,4935$,
 причому мінімальне значення
 $F(c_1) = 0,005502$.

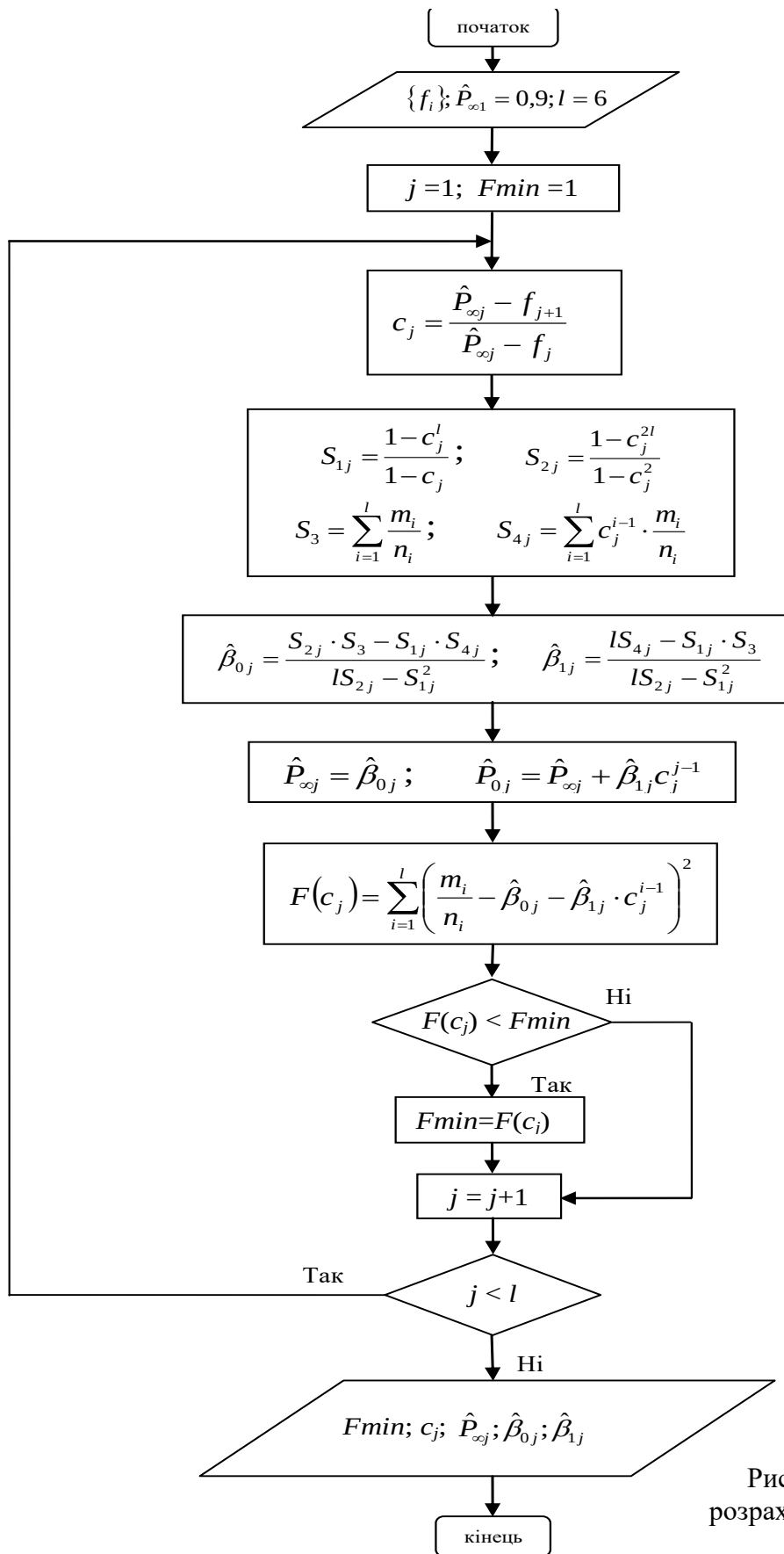


Рис. Блок-схема алгоритму розрахунку оптимальних значень параметрів моделі

Таблиця 3

Розрахунки оптимальних значень параметрів моделі

c_i	S_{1i}	S_{2i}	S_3	S_{4i}	β_{0i}	β_{1i}	P_∞	P_{01}	$F(c_1)$
0,6000	2,3834	1,5591	3,6	0,9896	0,8857	-0,7193	0,8857	0,1665	0,009404
0,5500	2,1607	1,4326	3,6	0,8391	0,8516	-0,6988	0,8516	0,1529	0,006622
0,5000	1,9688	1,3330	3,6	0,7119	0,8242	-0,6832	0,8242	0,1410	0,005517
0,4500	1,8031	1,2538	3,6	0,6045	0,8015	-0,6704	0,8015	0,1310	0,006188
0,4900	1,9336	1,3157	3,6	0,6889	0,8193	-0,6805	0,8193	0,1388	0,005507
0,4910	1,9371	1,3174	3,6	0,6912	0,8198	-0,6808	0,8198	0,1390	0,005505
0,4920	1,9406	1,3191	3,6	0,6934	0,8203	-0,6810	0,8203	0,1392	0,005503
0,4930	1,9441	1,3208	3,6	0,6957	0,8207	-0,6813	0,8207	0,1395	0,005503
0,4940	1,9476	1,3225	3,6	0,6980	0,8212	-0,6816	0,8212	0,1397	0,005503
0,4950	1,9511	1,3243	3,6	0,7003	0,8217	-0,6818	0,8217	0,1399	0,005503
0,4935	1,9458	1,3217	3,6	0,6969	0,8210	-0,6814	0,8210	0,1396	0,005502
0,4936	1,9462	1,3218	3,6	0,6971	0,8210	-0,6815	0,8210	0,1396	0,005502
0,4937	1,9465	1,3220	3,6	0,6973	0,8211	-0,6815	0,8211	0,1396	0,005502

У табл. 4 для порівняння наведено частотні оцінки ймовірностей зростання ІБР обладнання з доопрацюванням і оцінки цих

імовірностей для кожного етапу доопрацювання, що отримані за формулою (5) за методом МНК.

Таблиця 4

Порівняння оцінок ІБР за МНК з частотними оцінками

j	$\hat{P}_j$	$\frac{m_j}{n_j}$	$\frac{m_j}{n_j} - \hat{P}_j$
1	0,1396	0,15	0,0104
2	0,4846	0,44	-0,0446
3	0,6549	0,7	0,0451
4	0,7390	0,76	0,0210
5	0,7805	0,75	-0,0305
6	0,8010	0,8	-0,0010

Коли на початку доопрацювання зростання ІБР обладнання досить повільне порівняно з наступними етапами доопрацювання, доцільно застосовувати

інші криві зростання ІБР, зокрема логістичну криву зростання ІБР.

Логістична крива зростання ІБР обладнання має вигляд

$$P_j = \frac{P_\infty}{1 + \left(\frac{P_\infty}{P_0} - 1 \right) \cdot \exp(-b(j-1))}. \quad (15)$$

Нехай між доопрацюваннями локомотивного обладнання в середньому проводять 10 випробувань, при цьому планують провести 300 випробувань. Параметри логістичної кривої мають такі значення: $P_\infty = 0,98$ і $b = 0,2$. Необхідно до кінця доопрацювання мати значення ІБР

$P_T = 0,95$. При цьому визначимо, чи буде досягнуте необхідне значення ІБР, коли на початку відпрацювання $P_{01} = 0,05$ або $P_{02} = 0,15$.

За формулою (15), попередньо визначивши середню кількість відпрацювання в одному інтервалі $300 : 10 = 30$,

$$P_{30}^{(1)} = \frac{0,98}{1 + \left(\frac{0,98}{0,05} - 1 \right) \cdot \exp(-0,2 \cdot (30 - 1))} = \frac{0,98}{1 + 18,6 \cdot \exp(-5,8)} = 0,9268.$$

$$P_{30}^{(2)} = \frac{0,98}{1 + \left(\frac{0,98}{0,15} - 1 \right) \cdot \exp(-0,2 \cdot (30 - 1))} = \frac{0,98}{1 + 5,53 \cdot \exp(-5,8)} = 0,9635.$$

Тобто мета з доопрацюванням для значення $P_{02} = 0,15$ виконана.

Визначимо найменший номер доопрацювання для випадку $P_{02} = 0,15$ за формулою

$$t_0 = 1 + \frac{1}{b} \cdot \ln \frac{\frac{P_\infty}{P_0} - 1}{\frac{P_\infty}{P_T} - 1}. \quad (16)$$

$$t_0 = 1 + \frac{1}{0,2} \cdot \ln \frac{\frac{0,98}{0,15} - 1}{\frac{0,98}{0,95} - 1} = 26,8.$$

Отже, необхідного рівня ІБР досягають в результаті реалізації 27 доопрацювань, а потрібно загалом $27 \cdot 10 = 270$ випробувань.

На практиці часто виникає необхідність аналізу експериментального доопрацювання до початку його проведення, тобто апіорі. Через це виникає необхідність побудови моделі зростання надійності, виходячи з імовірнісної прояви і усунення джерел відмов (ДВ).

Для процесу підвищення надійності відповідного локомотивного обладнання використовують систему рівнянь

$$\begin{cases} P_{i+1} - P_i = \left(\sum_{v=1}^{N_1} s_{vi} q_{vi} \right) P_i + \sum_{v=1}^{N_1} g_{vi} q_{vi}^2, \\ q_{v(i-1)} - q_{vi} = -(s_{vi} P_{vi} + g_{vi} q_{vi}) q_{vi} \end{cases}, \quad (17)$$

де $P_1 = P_0$, P_i — ІБР в i -му випробуванні;

g_{vi} — імовірність виникнення в i -му випробуванні відмови, що викликано v -м ДВ;

$\nu = \overline{1, N_1}$; $q_{vi} = c_{vi}$; g_{vi} — імовірність усунення ν -го ДВ із доопрацюванням, що проводять після відмови, яка викликана цим ДВ;

S_{vi} — імовірність усунення ν -го ДВ із доопрацюванням, яке проводять після успішного доопрацювання на ν -му випробуванні;

N_1 — кількість усунених ДВ.

Коли доопрацювання обладнання проводять тільки після відмов, приблизне розв'язання системи рівнянь (17) буде таким:

$$P_i = P_\infty - \sum_{\nu=1}^{N_1} \frac{c_\nu}{c_\nu g_\nu (i-1) + 1}, \quad (18)$$

$$\text{де } P_\infty = 1 - \sum_{\nu=1}^{N_1} c_\nu.$$

У випадку рівності значень початкових імовірностей g_{vi} , $\nu = \overline{1, N_1}$ залежність зростання ІБР обладнання від кількості проведених випробувань має такий вигляд:

$$P_i = P_\infty - \frac{P_\infty - P_0}{N_1 g (P_\infty - P_0) (i-1) + 1}, \quad (19)$$

$$\text{де } g = g_\nu, \nu = \overline{1, N_1}.$$

Нехай за умовами випробувань дослідні зразки доопрацьованого обладнання не відновлюються. Треба перед початком відпрацювання оцінити кількість дослідних зразків обладнання, яке необхідно виготовити для підвищення зростання ІБР з $P_0 = 0,05$ до $P_T = 0,955$.

За даними експериментальних доопрацювань зразків обладнання — аналогів визначені такі значення параметрів: $P_\infty = 0,98$; $s = 0,15$; $g = 0,84$; $N_1 = 30$.

Послугуючись рівнянням (20), знайдемо шукані значення $i = t_T$:

$$P_i = P_\infty (\alpha + \beta P_0) - \alpha (P_\infty - P_0) \frac{\exp[-s P_\infty (i-1)]}{\alpha + \beta P_0 + \beta (P_\infty - P_0) \cdot \exp[-s P_\infty (i-1)]}, \quad (20)$$

$$\text{де } \alpha = \frac{P_\infty g}{N_1}; \quad \beta = s - \frac{g}{N_1}.$$

$$t_T = 1 + \frac{1}{s P_\infty} \cdot \ln \frac{(\alpha + \beta P_T)(P_\infty - P_0)}{(\alpha + \beta P_0)(P_\infty - P_T)},$$

$$\text{де } \alpha = \frac{0,98 \cdot 0,84}{30} = 0,02744; \quad \beta = 0,15 - \frac{0,84}{30} = 0,122.$$

$$t_T = 1 + \frac{1}{0,15 \cdot 0,98} \cdot \ln \frac{(0,02744 + 0,122 \cdot 0,955)(0,98 - 0,05)}{(0,02744 + 0,122 \cdot 0,05)(0,98 - 0,955)} = 34,3.$$

Тобто для проведення експериментальних доопрацювань необхідно зробити 34 дослідних зразки обладнання.

Висновки. З урахуванням проведених досліджень отримані такі результати:

— проаналізовано математичні методи для вирішення завдань доопрацювання локомотивного обладнання для декількох варіантів реалізації кривих зростання ІБР;

— розроблено алгоритм розрахунку та оптимізації параметрів моделі доопрацювання локомотивного обладнання;

— проведено розрахунки з визначення імовірності безвідмовної роботи локомотивного обладнання для низки варіантів реалізації кривих зростання ІБР локомотивного обладнання.

Список використаних джерел

1. Капіца М. І. Стратегії експлуатації, технічного обслуговування та ремонту локомотивів. *Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізнич. трансп. ім. акад. В. Лазаряна*. 2012. Вип. 40. С. 63—67.
2. Gnedenko B. V., Belyayev Yu. K., Solovyev A. D. Mathematical Methods of Reliability Theory. *Elsevier*. 1969. P. 506. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-12300-8>.
3. Chen D., Xiao Q., Mou M., Yang W. et al. Fatigue reliability evaluation of heavy-haul locomotive car body underframe based on measured strain and virtual strain. *International Journal of Fatigue*. 2023. Vol. 172. 107661. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2023.107661>.
4. Leite M., Costa M. A., Alves T., Infante V. et al. Reliability and availability assessment of railway locomotive bogies under correlated failures. *Engineering Failure Analysis*. 2022. Vol. 135. 106104. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106104>.
5. Канарчук В. Є. Надійність машин. Київ: Либідь, 2003. 424 с.
6. Falcatelli F., Yue N., Di Sante R., Zarouchas D. Probability of detection, localization, and sizing: The evolution of reliability metrics in structural health monitoring. *Structural Health Monitoring*. 2021. Vol. 21(6). P. 2990 — 3017. <https://doi.org/10.1177/14759217211060780>.
7. Xu P., Jones R., Sarris G., Huthwaite P. Efficient generation of realistic guided wave signals for reliability estimation. *Structural Health Monitoring*. 2025. <https://doi.org/10.1177/14759217241302469>.
8. Zorzi S., Broccardo M., Tonelli D., Zonta D. Reliability-based metrics for structural health monitoring information quality assessment. *Structural Health Monitoring*. 2025. Vol. 24(5). P. 3028 — 3045. <https://doi.org/10.1177/14759217241265956>.
9. Методы оценки жизненного цикла тягового подвижного состава железных дорог: монография / Э. Д. Тартаковский, С. Г. Грищенко, Ю. Е. Калабухин и др. Луганск: «Ноулидж», 2011. 174 с.
10. Голубенко О. Л. Визначення оптимальних строків служби та міжремонтних періодів рухомого складу. *Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля*. 2002. № 11(58). С. 132—137.

Крашенінін Олександр Семенович, доктор технічних наук, професор кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0001-7462-3372.

Тел.: +38 (097) 991-70-99. E-mail: alsem1512@gmail.com.

Шапатіна Ольга Олександрівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління вантажною і комерційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-9185-6212. Тел.: +38 (066) 812-48-89. E-mail: shapatina.uvkr@kart.edu.ua.

Бондаренко Костянтин Станіславович, аспірант кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна. E-mail: kos.bondarenko.kh@gmail.com. Orcid.org/0009-0001-2284-3557.

Krashenin Olexandr, Dr.Sc (Tech.), Professor, department of maintenance and repair of rolling stock, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0001-7462-3372. Tel.: +38 (097) 991-70-99.
E-mail: obozny@kart.edu.ua.

Shapatin Olga, PhD (Tech.), Associate Professor, department of cargo and commercial work management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-9185-6212. Tel.: +38 (066) 812-48-89.
E-mail: shapatina.uvkr@kart.edu.ua.

Bondarenko Kostiantyn Stanislavovych, Ukrainian State University of Railway Transport, Department of Operation and Repair of Rolling Stock, postgraduate student, Kharkiv, Ukraine. E-mail: kos.bondarenko.kh@gmail.com.
Orcid.org/0009-0001-2284-3557.

Статтю прийнято 28.11.2025 р.