

УДК 629.42

МОДЕЛЮВАННЯ НАДІЙНОСТІ ТЯГОВОГО РУХОМОГО СКЛАДУ ВПРОДОВЖ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ

Д-р техн. наук О. С. Крашенінін, канд. техн. наук О. О. Шапатіна,
магістранти А. А. Васьковський, Д. О. Миколаєнко, М. В. Шпортак

SIMULATION OF RELIABILITY FOR THE TRACTION ROLLING STOCK DURING THE LIFE CYCLE

D.Sc. (Tech.) O. Krashenin, PhD (Tech.) O. Shapatina, master students A. Vaskovkyi,
D. Mykolaienko, M. Shportak

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.211.2025.327163>



***Анотація.** Забезпеченню процесу ефективного функціонування тягового рухомого складу (ТРС) завжди приділяли велику увагу, що пов'язано зі значними витратами на його створення і експлуатацію. Вирішальним у забезпеченні цих умов є комплексне врахування всіх факторів, що впливають на його ефективну роботу. З урахуванням цього в статті розглянуто питання, пов'язані з забезпеченням надійності ТРС протягом всіх стадій життєвого циклу (ЖЦ). А це передбачає оцінювання впливу факторів на забезпечення надійної роботи ТРС з урахуванням стадії ЖЦ, їхньої кількості й ціни зусиль, що забезпечують високий рівень надійності.*

***Ключові слова:** дефект, життєвий цикл, надійність, тяговий рухомий склад, стадії життєвого циклу.*

***Abstract.** Great attention is always paid to ensuring the process of effective functioning of traction rolling stock, which is associated with significant costs for its creation and operation. A decisive factor in ensuring these conditions is a comprehensive consideration of all factors affecting its reliable operation. The paper deals with issues related to ensuring the reliability of traction rolling stock at all stages of the life cycle. This involves assessing the impact of factors on ensuring the mentioned reliability, taking into account the stage of the life cycle, their number, and the cost of efforts that ensure a high level of reliability. The expediency of using statistical models for a more detailed study of specific multistage programs is noted. When creating expensive unique complex systems, such as traction rolling stock, the greatest effect in saving material, cost, and time resources, under other equal conditions, will be achieved by breaking down the complex process of creating and*

operating the system into a larger number of controlled stages, gradually implementing monitoring of the technical condition of traction rolling stock equipment. It is established that with the introduction of each controlled stage into the process, additional time is required for information gathering, analysis of the results obtained, and the development of control actions, as well as additional costs of material, technical, and financial resources. It is investigated that dividing the process into more than twelve stages can only be justified for extremely complex unique systems, the failure of which is completely unacceptable. When creating simple systems for which there is extensive experience in similar developments, it is advisable to reduce the number of controlled stages without compromising reliability. A methodology is proposed that can be used to assess the reliability of any locomotive system with a discrete functioning structure.

Keywords: defect, life cycle, reliability, stages of the life cycle, traction rolling stock.

Вступ. Світова промисловість останніми роками виготовила велику кількість серій ТРС різного призначення, орієнтуючись на потреби замовника. Частина цієї продукції надійшла в Україну з-за кордону і вже декілька років експлуатована на залізницях.

На жаль, експлуатація цього рухомого складу не завжди відповідала очікуванням щодо його надійності. На це вплинуло багато факторів місцевого характеру, таких як непристосованість ремонтної інфраструктури, високі експлуатаційні навантаження, відсутність досвіду з їх експлуатації та забезпечення повноцінного рівня організації ТО, ПР.

З іншого боку, не були враховані фактори забезпечення надійності з проектуванням, для рівня підготовки до експлуатації цього ТРС у реаліях України; проведення необхідних випробувань на полігоні залізниць України; особливостей експлуатації на колії 1520 мм тощо.

Усе це актуалізує пошук шляхів і заходів із забезпечення надійної роботи ТРС за весь життєвий цикл.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Велика кількість публікацій про забезпечення ефективної роботи ТРС орієнтована на оптимізацію системи ремонту, а саме оптимізацію міжремонтних пробігів і їхню циклічність [1, 2, 4, 5]. Цей період пов'язаний зі стабільною і налагодженою системою виробництва вітчизняного ТРС.

Однак через деякий час значну увагу почали приділяти питанням модернізації ТРС в різних об'ємах [2, 7], що було пов'язано з повільним процесом удосконалення ТРС для їх виготовлення.

Окремі публікації присвячені питанням урахування витрат на утримання ТРС за життєвий цикл [2, 3, 8], що пов'язано зі значними експлуатаційними витратами, які перевищували первинну ціну ТРС у 20-25 разів.

Тому все більше уваги стали приділяти питанням удосконалення організації ТО, ПР ТРС, заохочуючи до цього процесу виробників і спеціалізовані сервіси, які брали на себе відповідальність за ефективну експлуатацію ТРС [1, 6].

Слід зазначити, що весь спектр окремих завдань розглядали окремо один від одного, що не могло не вплинути на ефективність реалізації цих заходів.

Визначення мети та завдання дослідження. Мета статті полягає в розробленні процедури моделювання надійності ТРС з урахуванням усіх стадій життєвого циклу на основі відповідних факторів.

Відповідно до цього вирішено такі завдання:

1. Формування моделі надійності роботи ТРС на всіх стадіях життєвого циклу.
2. Оцінювання рівня надійності залежно від кількості стадій життєвого циклу.
3. Оцінювання рівня витрат, що забезпечують високий рівень надійності за стадіями життєвого циклу.

Основна частина дослідження.

Життєвий цикл будь-якої системи, зокрема ТРС, охоплює низку стадій і етапів проєктування, випробувань, виготовлення та експлуатації.

Рівень надійності системи загалом залежить від рівнів надійності, яких досягають на кожній стадії життєвого циклу системи:

$$R = R(P_{np}, P_{випр}, P_{виг}, P_{ек}), \quad (1)$$

де P_{np} — надійність системи, досягнута в результаті проєктування,

$$P_{np} = [P_0 + (1 - P_0) \cdot a_{np}] \cdot b_{np}, \quad (2)$$

де P_0 — надійність номінального (вихідного) варіанта системи без будь-якого резерву або інших форм надмірності;

a_{np} — коефіцієнт, що виражає ефективність введення надмірності та інших додаткових проєктних рішень, спрямованих на забезпечення надійності;

b_{np} — коефіцієнт, що виражає якість (бездефектність) проєктно-конструкторської документації;

$P_{випр}$ — надійність системи, досягнута в процесі експериментальних робіт і випробувань,

$$P_{випр} = [P_{np} + (1 - P_{np}) \cdot a_{випр}] \cdot b_{випр}, \quad (3)$$

де $a_{випр}$ — коефіцієнт, що виражає ефективність виявлення й усунення дефектів у конструкторській документації (конструкторських помилок);

$b_{випр}$ — коефіцієнт, що виражає якість (бездефектність) випробувань і коректування робочої документації на виготовлення виробів;

$P_{виг}$ — надійність системи, забезпечена з виготовленням,

$$P_{виг} = [P_{випр} + (1 - P_{випр}) \cdot a_{виг}] \cdot b_{виг}, \quad (4)$$

де $P_{випр}$ — надійність системи після завершення експериментальних досліджень і випробувань;

$a_{виг}$ — коефіцієнт, що виражає ефективність заходів, спрямованих на забезпечення якості й надійності виробів системи в процесі виробництва, зокрема ефективність заходів із виявлення й усунення дефектів у технічній і нормативній документації на серійне виготовлення;

$b_{виг}$ — коефіцієнт, що виражає якість (бездефектність) виготовлення виробів;

$P_{ек}$ — надійність системи, введена в експлуатацію,

$$P_{ек} = [P_{виг} + (1 - P_{виг}) \cdot a_{ек}] \cdot b_{ек}, \quad (5)$$

де $P_{виг}$ — надійність системи, забезпечена з виготовленням;

$a_{ек}$ — коефіцієнт, що виражає ефективність виявлення й усунення дефектів експлуатаційно-технічної документації і локалізації наслідків відмови системи на початку експлуатації;

$b_{ек}$ — коефіцієнт, що виражає якість (бездефектність) роботи персоналу.

Використовуючи формули (2) — (5), одержимо рекурентні вирази для досягнутого рівня надійності системи після кожної стадії робіт

$$P_{np} = [P_0 + (1 - P_0) \cdot a_{np}] \cdot b_{np} = [\cdot] \cdot b_{np};$$

$$\begin{aligned} P_{випр} &= \{[\cdot] \cdot b_{np} + (1 - [\cdot] \cdot b_{np}) \cdot a_{випр}\} \cdot b_{випр} = \\ &= \{[P_0 + (1 - P_0) \cdot a_{np}] \cdot b_{np} + (1 - [P_0 + (1 - P_0) \cdot a_{np}] \cdot b_{np}) \cdot a_{випр}\} \cdot b_{випр} = \{\cdot\} \cdot b_{випр}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_{\text{виз}} &= \left\{ \left\{ \cdot \right\} \cdot b_{\text{випр}} + \left(1 - \left\{ \cdot \right\} \cdot b_{\text{випр}} \right) \cdot a_{\text{виз}} \right\} \cdot b_{\text{виз}} = \\
 &= \left\{ \left[\left[P_0 + (1 - P_0) \cdot a_{\text{нр}} \right] \cdot b_{\text{нр}} + \left(1 - \left[P_0 + (1 - P_0) \cdot a_{\text{нр}} \right] \cdot b_{\text{нр}} \right) \cdot a_{\text{випр}} \right\} \cdot b_{\text{випр}} + \right. \\
 &+ \left. \left(1 - \left[\left[P_0 + (1 - P_0) \cdot a_{\text{нр}} \right] \cdot b_{\text{нр}} + \left(1 - \left[P_0 + (1 - P_0) \cdot a_{\text{нр}} \right] \cdot b_{\text{нр}} \right) \cdot a_{\text{випр}} \right\} \cdot b_{\text{випр}} \right) \cdot a_{\text{виз}} \right\} \cdot b_{\text{виз}} = \\
 &= \left[\bullet \right] \cdot b_{\text{виз}} ;
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_{\text{ек}} &= \left\langle \left[\bullet \right] \cdot b_{\text{виз}} + \left(1 - \left[\bullet \right] \cdot b_{\text{виз}} \right) \cdot a_{\text{ек}} \right\rangle \cdot b_{\text{ек}} = \\
 &= \left\langle \left\{ \left[\left[P_0 + (1 - P_0) \cdot a_{\text{нр}} \right] \cdot b_{\text{нр}} + \left(1 - \left[P_0 + (1 - P_0) \cdot a_{\text{нр}} \right] \cdot b_{\text{нр}} \right) \cdot a_{\text{випр}} \right\} \cdot b_{\text{випр}} + \right. \right. \\
 &+ \left. \left(1 - \left[\left[P_0 + (1 - P_0) \cdot a_{\text{нр}} \right] \cdot b_{\text{нр}} + \left(1 - \left[P_0 + (1 - P_0) \cdot a_{\text{нр}} \right] \cdot b_{\text{нр}} \right) \cdot a_{\text{випр}} \right\} \cdot b_{\text{випр}} \right) \cdot a_{\text{виз}} \right\} \cdot b_{\text{виз}} + \\
 &+ \left. \left(1 - \left[\left[P_0 + (1 - P_0) \cdot a_{\text{нр}} \right] \cdot b_{\text{нр}} + \left(1 - \left[P_0 + (1 - P_0) \cdot a_{\text{нр}} \right] \cdot b_{\text{нр}} \right) \cdot a_{\text{випр}} \right\} \cdot b_{\text{випр}} + \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. + \left(1 - \left[\left[P_0 + (1 - P_0) \cdot a_{\text{нр}} \right] \cdot b_{\text{нр}} + \left(1 - \left[P_0 + (1 - P_0) \cdot a_{\text{нр}} \right] \cdot b_{\text{нр}} \right) \cdot a_{\text{випр}} \right\} \cdot b_{\text{випр}} \right) \cdot a_{\text{виз}} \right\} \cdot b_{\text{виз}} \right) \right\rangle \cdot b_{\text{ек}} .
 \end{aligned}$$

Як випливає з цих виразів, надійність, досягнута на *i*-й стадії робіт, залежить від номінального (вихідного) рівня надійності P_0 і коефіцієнтів a_i, b_i .

Коефіцієнти a_i характеризують ефективність заходів, оцінюваних математичним апаратом теорії імовірностей і математичної статистики. Коефіцієнти b_i характеризують втрати надійності системи внаслідок різних помилок, допущених з

проектуванням, випробуванням, оформленням документів, у виробництві та експлуатації, тобто відображують слабко формалізовану, неточно прогнозовану й неоперативно контрольовану статистично нестійку частину надійності виробу.

Розглянемо вплив факторів P_0, a_i, b_i на рівень загальної надійності, приймаючи $P_0 = 0,5$, а всі a_i, b_i на рівні $0,9$.

Тоді

$$P_{\text{нр}}(P_0 = 0,5; a = 0,9; b = 0,9) = [0,5 - (1 - 0,5) \cdot 0,9] \cdot 0,9 = 0,855.$$

$$P_{\text{випр}} = [0,855 - (1 - 0,855) \cdot 0,9] \cdot 0,9 = 0,886.$$

$$P_{\text{виз}} = [0,886 - (1 - 0,886) \cdot 0,9] \cdot 0,9 = 0,889.$$

$$P_{\text{ек}} = [0,889 - (1 - 0,889) \cdot 0,9] \cdot 0,9 = 0,89.$$

Приймаючи $P_0 = 0,5$, а всі $a_i = 0,5, b_i = 0,9$, отримуємо

$$P_{\text{нр}}(P_0 = 0,5; a = 0,5; b = 0,9) = [0,5 - (1 - 0,5) \cdot 0,5] \cdot 0,9 = 0,675.$$

$$P_{\text{випр}} = [0,675 - (1 - 0,675) \cdot 0,5] \cdot 0,9 = 0,754.$$

$$P_{\text{виз}} = [0,754 - (1 - 0,754) \cdot 0,5] \cdot 0,9 = 0,789.$$

$$P_{\text{ек}} = [0,789 - (1 - 0,789) \cdot 0,5] \cdot 0,9 = 0,805.$$

На підставі цих розрахунків на рис. 1 зображено вплив різних рівнів факторів P_0 , a_i і b_i на надійність системи за стадіями життєвого циклу.

З рис. 1 випливає:

— зростання надійності ТРС можна досягнути на різних стадіях розроблення його як системи, але найвищу – з проектуванням. Однак досягнуту надійність можна втратити на будь-якій наступній стадії життєвого циклу цієї системи;

— найважливішу роль відіграє вибір вихідного варіанта ТРС, що забезпечує рівень P_0 (причому використання нових, неапробованих рішень може як знизити, так і підвищити P_0);

— реалізація ефективних заходів із забезпечення надійності (підвищення a_i) дає

зможу знизити втрати і досягти необхідної високої надійності ТРС;

— неприпустимо зневажати «бездефектною» складовою надійності, особливо коли йдеться про унікальні системи, яким є сучасний ТРС, оскільки помилки й дефекти можуть перекреслити найкращу розробку (яскравим прикладом був тепловоз 2ТЕ121);

— необхідно враховувати витрати ресурсів для підвищення надійності, реалізовані на різних стадіях використання ТРС, уміти раціонально розподіляти ресурси, що виділяють за стадіями робіт;

— збільшення кількості контрольованих стадій і етапів в обґрунтованих межах дає змогу зменшити втрати через недостатню надійність окремого обладнання ТРС.

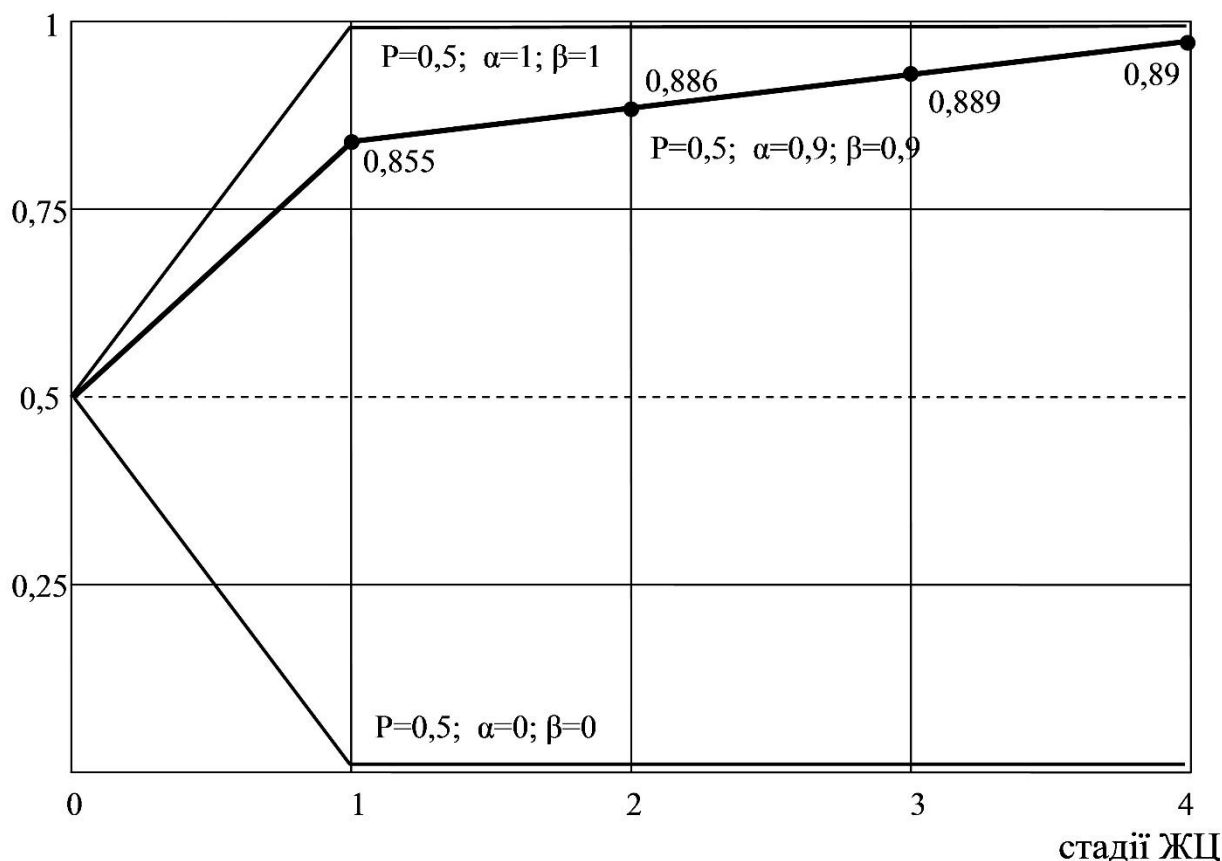


Рис. 1. Динаміка зміни надійності за стадіями ЖЦ:
 1 — проектування; 2 — випробування; 3 — виготовлення;
 4 — експлуатація; $P_0 = 0,5$

Розглянемо на прикладі зв'язок рівня надійності P і втрат Q відносно кількості контрольованих стадій ЖЦ, відповідно додаючи декілька додаткових стадій до основних.

Для першої стадії проектування (у формулах позначено нижнім індексом від 1 до 4 додану кількість стадій ЖЦ і верхнім індексом у формулах (3) — (12) — кількість стадій).

$$P_1^{(3)} = [0,5 + (1 - 0,5) - 0,9] = 0,675; Q_1^{(3)} = 1 - 0,675 = 0,325;$$

$$P_2^{(3)} = [0,675 + (1 - 0,675) - 0,9] = 0,754; Q_2^{(3)} = 1 - 0,754 = 0,246;$$

$$P_3^{(3)} = [0,754 + (1 - 0,754) - 0,9] = 0,789; Q_3^{(3)} = 1 - 0,789 = 0,211;$$

$$P_4^{(3)} = [0,789 + (1 - 0,789) - 0,9] = 0,805; Q_4^{(3)} = 1 - 0,805 = 0,195.$$

Аналогічно для другої стадії випробування

$$P_1^{(6)} = [0,805 + (1 - 0,805) - 0,9] = 0,812; Q_1^{(6)} = 1 - 0,812 = 0,188;$$

$$P_2^{(6)} = [0,812 + (1 - 0,812) - 0,9] = 0,815; Q_2^{(6)} = 1 - 0,815 = 0,185;$$

$$P_3^{(6)} = [0,815 + (1 - 0,815) - 0,9] = 0,816; Q_3^{(6)} = 1 - 0,816 = 0,184;$$

$$P_4^{(6)} = [0,816 + (1 - 0,816) - 0,9] = 0,817; Q_4^{(6)} = 1 - 0,817 = 0,183.$$

Для третьої стадії виготовлення

$$P_1^{(9)} = [0,818 + (1 - 0,818) - 0,9] = 0,8181;$$

$$Q_1^{(9)} = 1 - 0,8181 = 0,1819;$$

$$P_2^{(9)} = [0,8181 + (1 - 0,8181) - 0,9] = 0,81818;$$

$$Q_2^{(9)} = 1 - 0,81818 = 0,18182;$$

$$P_3^{(9)} = [0,8182 + (1 - 0,8182) - 0,9] = 0,81819;$$

$$Q_3^{(9)} = 1 - 0,81819 = 0,18181;$$

$$P_4^{(9)} = [0,81819 + (1 - 0,81819) - 0,9] = 0,8182;$$

$$Q_4^{(9)} = 1 - 0,8182 = 0,1818.$$

На четвертій стадії експлуатації зміна $P_1^{(12)}$ і відповідне значення $Q^{(12)}$ змінюються досить повільно відносно попереднього ступеня ЖЦ.

Різниця $\Delta Q_i = Q_i^{(1)} - Q_i^{(2)}$ з переходом від чотири- до дванадцятиступеневого

процесу створення та експлуатації системи дорівнює

$$\Delta Q_1 = 0,325 - 0,195 = 0,13;$$

$$\Delta Q_2 = 0,246 - 0,183 = 0,063;$$

$$\Delta Q_3 = 0,211 - 0,1818 = 0,3;$$

$$\Delta Q_4 = 0,195 - 0,18 = 0,015.$$

На рис. 2 показано відносні втрати надійності залежно від кількості контрольованих стадій за фіксованих значень $P_0 = 0,5$, $a_i = 0$, $b_i = 0,9$. Ламана лінія 1

відповідає чотирьом контрольованим стадіям, ламана лінія 2 — дванадцяти. Ламана лінія 3 показує різницю $\Delta Q_i = Q_i^{(1)} - Q_i^{(2)}$, одержану з переходом від чотири- до дванадцятишарового процесу створення та експлуатації системи.

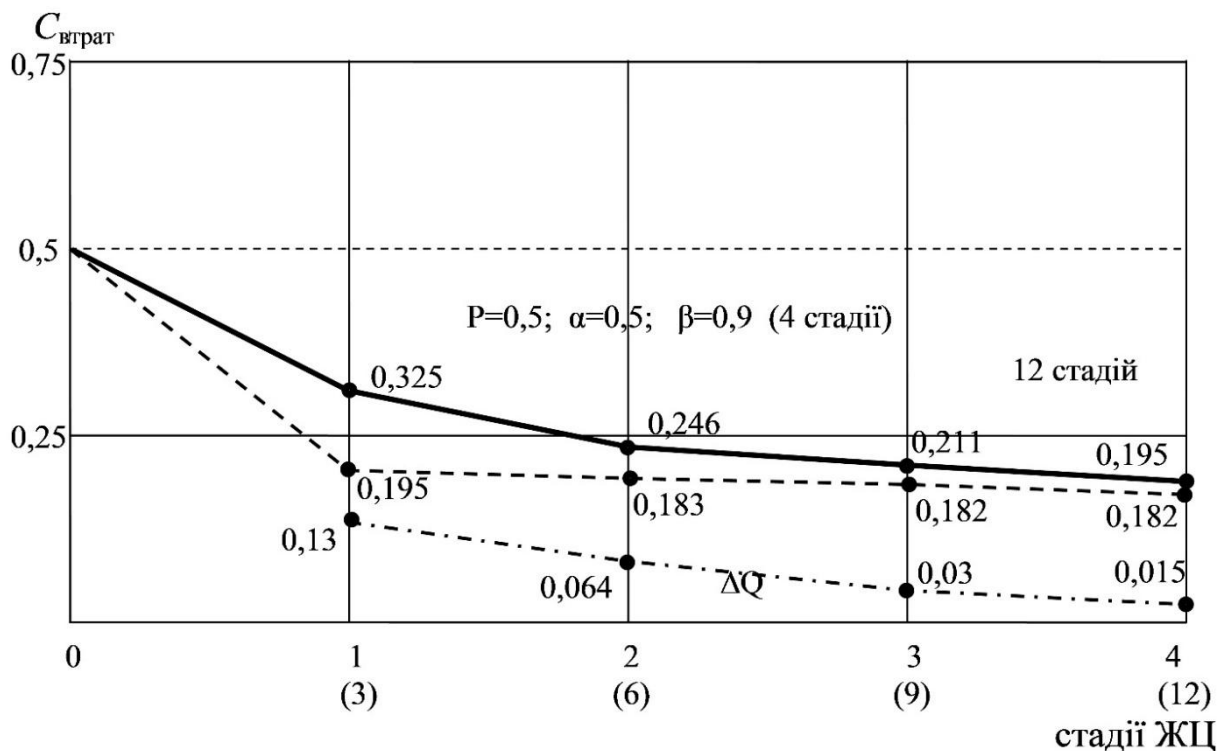


Рис. 2. Відносні втрати надійності залежно від кількості контрольованих стадій ЖЦ

На рис. 3 показана різниця у витратах для усунення причин і наслідків ненадійності за чотирьох і дванадцяти стадій життєвого циклу системи, отриманої в припущенні, що вартість доопрацювання документації і обладнання ТРС від стадії до стадії зростає приблизно на порядок. Незважаючи на зменшення різниці ΔQ_i з переходом від стадії до стадії, втрати від ненадійності за реалізації дванадцяти-стадійної програми робіт менші приблизно в 1,5 раза, ніж за чотирьохстадійної програми.

Розглянутий приклад характеризує якісне подання розподілу втрат по стадіях

життєвого циклу ТРС. Для більш детального дослідження конкретних багатостадійних програм доцільно використовувати статистичні моделі.

Для створення дорогих унікальних складних систем, таких як ТРС, найбільший ефект в економії матеріальних, вартісних і строкових ресурсів за інших рівних умов дає поділ складного процесу створення та експлуатації системи на більшу кількість контрольованих стадій, поступово впроваджуючи моніторинг технічного стану обладнання ТРС.

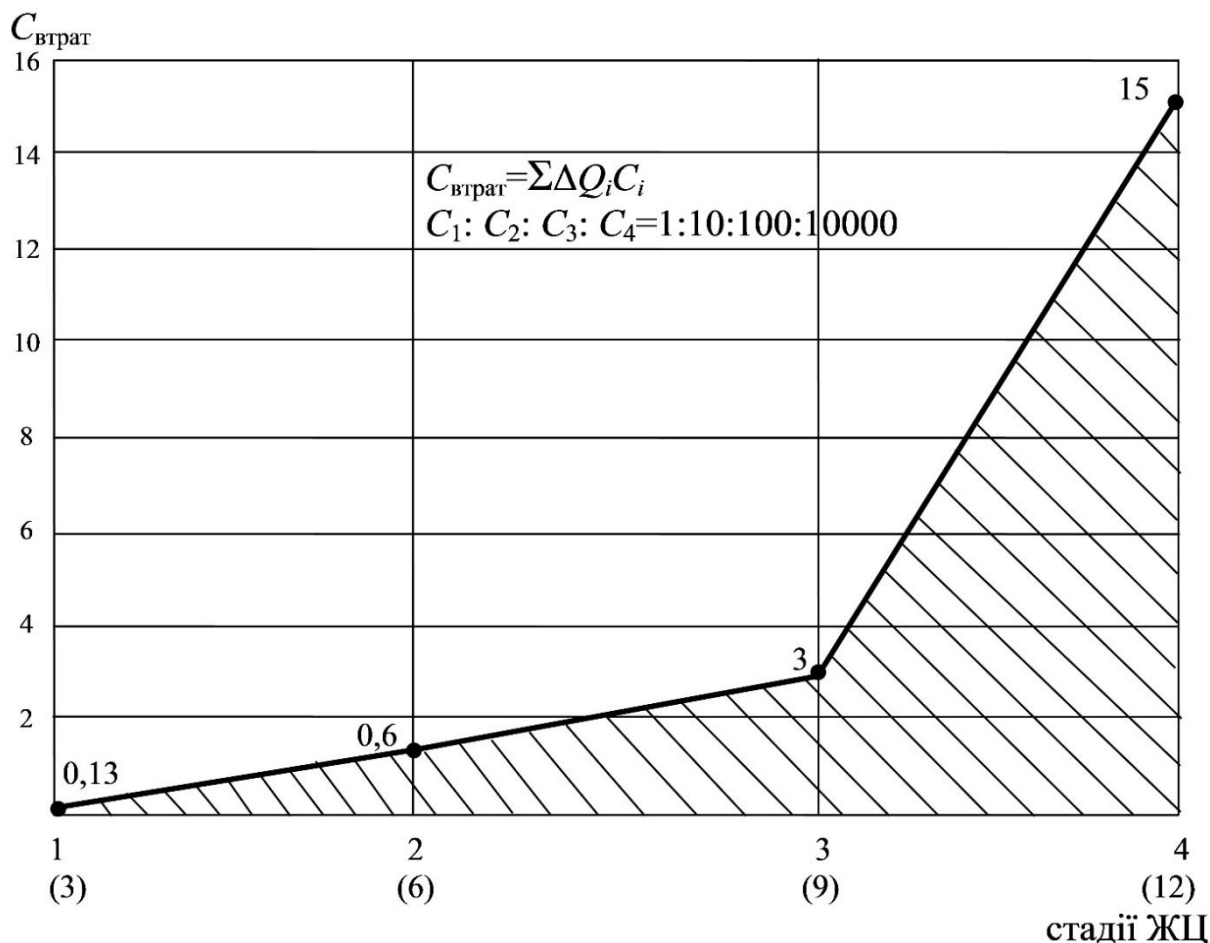


Рис. 3. Динаміка економічного ефекту залежно від кількості контрольованих стадій ЖЦ

Очевидно, що з введенням кожної контрольованої стадії в процес потрібен додатковий час на збір інформації, аналіз отриманих результатів і вироблення керуючих впливів, а також додаткові витрати матеріально-технічних і вартісних ресурсів. Тому поділ процесу на кількість стадій більше дванадцяти може бути виправданий тільки для надскладних унікальних систем, відмови яких зовсім неприпустимі [2, 8]. Зі створенням простих систем, за якими є великий досвід аналогічних розробок, доцільно скорочувати кількість контрольованих стадій без зашкодження надійності.

Висновки. За результатами проведених досліджень із моделювання

надійності роботи ТРС за життєвий цикл отримано такі результати:

1. Сформовано модель надійності роботи ТРС на всіх стадіях життєвого циклу.
2. Оцінено динаміку рівня надійності ТРС залежно від кількості стадій життєвого циклу.
3. Оцінено рівень витрат, що забезпечують високий рівень надійності за стадіями життєвого циклу.

Наведена методика може бути використана для оцінювання надійності будь-якої системи локомотива, у якій є дискретна структура функціонування.

Список використаних джерел

1. Капіца М. І., Коренюк Р. О. Стратегії експлуатації, технічного обслуговування та ремонту локомотивів. *Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізнич. трансп. ім. акад. В. Лазаряна*. Дніпропетровськ, 2012. Вип. 40. С. 63—67.
2. Калабухін Ю. Є. Теоретичні положення оцінки техніко-економічних показників функціонування тягового рухомого складу протягом життєвого циклу. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля: науковий журнал*. 2010. № 1, Ч. 2. С. 75—80.
3. Понтиселли К. Стоимість життєвого циклу залізничного подвижного складу: від теорії до практики. *Техніка залізничних доріг*. 2009. № 4 (8). С. 19-24.
4. Організація технологічних процесів ремонту ТРС із застосування засобів діагностування / І. Г. Крашенинін, О. С. Крашенинін, В. Г. Пузир, А. П. Фалендиш. *Зб. наук. праць УкрДАЗТ*. Харків: УкрДАЗТ, 2004. Вип. 57. С. 31—34.
5. Крашенинін О. С., Пузир В. Г., Крашенинін І. Г. Автоматизована розробка технологічних процесів обслуговування тепловозів за допомогою ПЕОМ. *Міжвуз. зб. наук. праць ХарДАЗТ*. Харків: ХарДАЗТ, 2000. Вип. 41. С. 42—47.
6. Крашенинін О. С., Яковлев С. С., Шапатіна О. О. Обґрунтування стратегії організації технічного обслуговування, поточного ремонту швидкісного рухомого складу в умовах України. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2021. Т. 26. № 3. С. 7—11. <https://doi.org/10.18664/iksz.v26i3.240449>.
7. Крашенинін О. С., Яковлев С. С., Задесенець В. І. Обґрунтування критерію ефективності експлуатації локомотивів. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2020. Т. 25, № 4. С. 10—14. <https://doi.org/10.18664/iksz.v25i4.217755>.
8. 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.

Крашенинін Олександр Семенович, доктор технічних наук, професор кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID ID: 0000-0001-7462-3372. E-mail: krashenin@kart.edu.ua.

Шапатіна Ольга Олександрівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління вантажною і комерційною роботою Український державний університет залізничного транспорту. ORCID ID: 0000-0002-9185-6212. E-mail: shapatina.ovkr@kart.edu.ua.

Васьковський Артем Анатолійович, магістрант освітньо-наукової програми «Локомотиви та локомотивне господарство», Український державний університет залізничного транспорту. E-mail: vma0308@gmail.com.

Миколаєнко Дмитро Олександрович, магістрант освітньо-наукової програми «Локомотиви та локомотивне господарство», Український державний університет залізничного транспорту. E-mail: mikolaenko.dima2710@gmail.com.

Шпортак Михайло Володимирович, магістрант освітньо-наукової програми «Локомотиви та локомотивне господарство», Український державний університет залізничного транспорту. E-mail: mickshportak@gmail.com.

Krashenin Oлександр Semenovich, D.Sc. (Tech), Professor, Department of Operation and repair of rolling stock, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID ID: 0000-0001-7462-3372. E-mail: krashenin@kart.edu.ua.

Shapatina Olga Oлександрivna, PhD (Tech), Associate Professor, Department of Management of Freight and Commercial work, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID ID: 0000-0002-9185-6212.

E-mail: shapatina.ovkr@kart.edu.ua.

Vaskovskiy Artem Anatoliiovych, master student, educational level Master-scientist «Locomotives and locomotive facilities», Ukrainian State University of Railway Transport. E-mail: vma0308@gmail.com.

Mykolaenko Dmytro Oлександрovych, master student, educational level Master-scientist «Locomotives and locomotive facilities», Ukrainian State University of Railway Transport. E-mail: mikolaenko.dima2710@gmail.com.

Shportak Mykhailo Volodymyrovych, master student, educational level Master-scientist «Locomotives and locomotive facilities», Ukrainian State University of Railway Transport. E-mail: mickshportak@gmail.com.

Статтю прийнято 27.03.2025 р.