ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2025, № 3 (111)

УДК 629.4.077-592:519.6

О. В. НЕВЕДРОВ[1*], О. М. ГОРОБЧЕНКО[2], Д. О. ЗАІКА[3], В. С. ТЕРЕЩЕНКО[4]

[1*]Каф. «Електромеханіки та рухомого складу залізниці», Національний транспортний університет,
вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, Київ, Україна, 01010, тел. +38 (097) 301 28 97, ел. пошта nvp2020lts@gmail.com,
ORCID 0000-0001-9347-0973
[2]Каф. «Електромеханіки та рухомого складу залізниці», Національний транспортний університет,
вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, Київ, Україна, 01010, тел. +38 (050) 972 04 71, ел. пошта gorobhenko.a.n@gmail.com,
ORCID 0000-0002-9868-3852
[3]Каф. «Електромеханіки та рухомого складу залізниці», Національний транспортний університет,
вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, Київ, Україна, 01010, тел. +38 (066) 836 09 91 71,
ел. пошта zaika_do@gsuite.duit.edu.ua, ORCID 0000-0003-0693-9580
[4]Каф. «Електромеханіки та рухомого складу залізниці», Національний транспортний університет,
вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, Київ, Україна, 01010, тел. +38 (068) 794 65 80,
ел. пошта tereschenko_vs@gsuite.duit.edu.ua, ORCID 0009-0006-7906-7284

Прогнозування технічного стану гальмівної системи тепловоза із застосуванням Марковського методу аналізу

Мета. У статті розглянуто питання прогнозування технічного стану гальмівної системи тепловоза з використанням Марковського методу аналізування. Метою дослідження є побудова математичної моделі, що дозволяє з високою точністю оцінювати поточний та майбутній технічний стан системи на основі статистичних даних. Запропонована модель дає змогу формалізувати переходи між технічними станами – справний, частково несправний, критичний і відновлений, – що дозволяє здійснювати ефективне планування технічного обслуговування. **Методика.** Для вирішення поставленої задачі побудуємо математичну модель прогнозування технічного стану гальмівної системи тепловоза на основі дискретного Марковського процесу з чотирма станами: «справний», «частково несправний», «критичний», «відновлений». Ця модель дозволяє формалізувати ймовірності переходу між станами в дискретні моменти часу та оцінювати динаміку деградації системи. Множина станів системи представлена як «справний» (нормальне функціонування, технічне обслуговування – ТО – не потрібне), «частково несправний» (потрібна додаткова діагностика або ТО), «критичний стан» (стан відмови, що потребує ремонту або заміни вузла – поглинаючий стан), «відновлений» (після ремонту, стан близький до початкового). Побудовано структуру матриці переходів та позначено ймовірність переходу зі стану в стан. **Результати**. На основі вище наведених даних побудовано вектор середнього часу до поглинання. **Наукова новизна.** Новизна роботи полягає у отриманні матриці N, що містить інформацію про очікувану кількість разів, коли система, починаючи з певного початкового стану, може переходити або залишається в прийнятному стані до попадання в поглинаючий критичний стан. Це дає змогу виявити слабкі місця, а саме – часті повернення в частково несправний стан. Також можливо визначити динаміку деградації гальмівної системи і, в залежності від неї, оптимізувати технічне обслуговування. **Практична значимість**. В рамках проведеного дослідження було побудовано формалізовану математичну модель гальмівної системи тепловоза у вигляді дискретного Марковського процесу з чотирма визначеними технічними станами.

Ключові слова: залізничний транспорт; локомотив; технічний стан; діагностика; прогнозування; контроль; Марковський процес; ланцюг Маркова

Вступ

Надійність та ефективність гальмівної системи тепловоза є критично важливою складовою безпеки залізничного транспорту. Особливої уваги потребують маневрові та магістральні тепловози, які експлуатуються понад п'ятдесят років, часто в умовах підвищеного зносу. Зниження технічного стану гальмівного обладнання може призводити до зростання гальмівного шляху, порушень динаміки руху та навіть до аварійних ситуацій. Одним із актуальних завдань є створення моделі, що дозволить здійснювати прогнозування стану гальмівної системи з урахуванням попередніх станів та можливих переходів між ними. Такий підхід відкриває можливості для персоніфікованого технічного обслуговування, що підвищує ефективність планових ремонтів.

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2025/341685
© О. В. Неведров, О. М. Горобченко,
Д. О. Заіка, В. С. Терещенко, 2025

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2025, № 3 (111)

У науковій літературі активно розвиваються підходи до діагностики та прогнозування технічного стану залізничного обладнання [7, 17, 20]. Особливої уваги заслуговують дослідження з використанням стохастичних моделей, теорії штучного інтелекту [2, 10], підвищення ефективності експлуатації та управління інфраструктурою залізничного транспорту на основі максимальних рівнів відмовостійкості та теорії надійності [2, 5, 10–12]. Так, у роботах [4, 9, 10] представлено методи діагностики гальмівних систем на основі аналізу експлуатаційних параметрів та результатів обслуговування. Використання логіко-імовірнісних моделей та функцій стану дозволяє оцінювати поточний рівень зносу окремих елементів системи. У дослідженнях [1, 3, 6, 14, 16] Марковські процеси були запропоновані як ефективний інструмент моделювання змін технічного стану, які застосовуються для опису переходів між різними технічними станами вузлів локомотива і враховують відмови та ремонт. У дослідженнях [10] було показано, що застосування методів прогнозування на основі Марківських процесів дозволяє зменшити кількість несподіваних відмов на 15–25 %, забезпечуючи тим самим зростання безпеки руху. Проте недостатньо розробленими залишаються моделі, що безпосередньо орієнтовані на гальмівну систему тепловоза як об’єкт дослідження.

Мета

Метою статті є побудова формалізованої математичної моделі гальмівної системи тепловоза у вигляді дискретного Марковського процесу з чотирма станами. Для цього необхідно вирішити наступні завдання: побудувати матриці ймовірностей переходів між станами для гальмівної системи; провести імітаційне моделювання змін станів у часі.

Методика

Побудуємо математичну модель прогнозування технічного стану гальмівної системи тепловоза на основі дискретного Марковського процесу [8, 9, 13] з чотирма станами: «справний», «частково несправний», «критичний», «відновлений». Ця модель дозволяє формалізувати ймовірності переходу між станами в дискретні моменти часу та оцінювати динаміку деградації системи. Позначимо множину станів системи як $S=\{S_1,S_2,S_3,S_4\}$, де S_1 – «справний» (нормальне функціонування, технічне обслуговування – ТО – не потрібне); S_2 – «частково несправний» (потрібна додаткова діагностика або ТО); S_3 – «критичний стан» (стан відмови, що потребує ремонту або заміни вузла – поглинаючий стан); S_4 – «відновлений» (після ремонту, стан близький до початкового). Побудуємо структуру матриці переходів та позначимо ймовірність переходу зі стану S_i в стан S_j як p_{ij} [14]. Структура матриці переходів P з одного стану до іншого наведена нижче у формулі (1),

$$P=\begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ p_{41} & p_{42} & p_{43} & p_{44} \end{pmatrix}, \qquad (1)$$

де p_{ij} – імовірність переходу зі стану S_i в стан S_j,рядок i- поточний стан системи S_i; стовпчик j – стан у який може перейти система S_j.

Пояснення цієї структури [9, 14]:

S_3 – поглинаючий стан (якщо система досягає критичного стану, вона в ньому залишається до втручання → $p_{33} = 1$);

S_4 – відновлений стан (після ремонту може повернутися у справний стан або залишитися у «відновленому»).

Сума імовірностей в рядках повинна дорівнювати одиниці ($\sum p_i = 1$ для кожного i.)

Проведемо розрахунок розподілу ймовірностей у часі:

$$\pi(t+1)=\pi(t)\cdot P, \qquad (2)$$

де $\pi(t)$ – вектор ймовірностей станів на час t.

$$\pi(t)=[\pi_1(t),\pi_2(t),\ldots,\pi_n(t)],$$

де $\pi_i(t)$ – це ймовірність того, що система перебуває в стані S_i на час t.

Вираз (2) є основним рівнянням еволюції дискретного Марковського процесу. Він описує, як змінюється розподіл ймовірностей станів системи з кожним тактом. У контексті дискретного Марковського процесу, зокрема при моделюванні технічного стану гальмівної системи локомотива, термін «такт» означає: один дискретний крок у часі [13, 15, 18–20], на якому може відбутися перехід системи з одного стану

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2025/341685
© О. В. Неведров, О. М. Горобченко, Д. О. Заіка, В. С. Терещенко, 2025

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2025, № 3 (111)

до іншого в нашому випадку дорівнює одному місяцю.

Кожен елемент матриці переходів (1) це ймовірність переходу зі стану *i* у стан *j*. Вираз (3) є рекурентним рівнянням для обчислення ймовірності того, що система буде перебувати у стані S_j на момент часу *t*+1 у дискретному Марковському процесі.

$$\pi_j(t+1) = \sum_{i=1}^{n} \pi_i(t) \cdot p_{ij}\,, \qquad (3)$$

де $\pi_j(t+1)$ – це ймовірність того, що на момент часу *t+1* система буде у стані S_j; $\pi_i(t)$ – ймовірність того, що на момент часу *t* система перебуває у стані S_i; p_{ij} – ймовірність переходу зі стану S_i в стан S_j за один такт, *n* -загальна кількість станів у моделі (у нашому випадку – 4).

Формула обчислює нову ймовірність перебування у стані S_j наступного такту як суму всіх можливих шляхів, які могли призвести до стану S_j з будь-якого стану S_i, З урахуванням: наскільки ймовірно система була в стані S_i (тобто $\pi_i(t)$) і наскільки ймовірно з стану S_i перейти до стану S_j (тобто p_{ij}). Приведемо детальний приклад розрахунку за формулою (3).

Для побудови матриці переходів гальмівної системи тепловоза на основі статистичного аналізу даних, враховуючи початкову ймовірність перебування у стані $\pi_{(0)}$ = [S_1 = 0,991, S_2 = 0,005, S_3 = 0,002, S_4 = 0,002], пропонується використати дискретний Марківський процес із чотирма станами. Матриця переходів *P* буде мати наступний вигляд наведений в табл. 1.

Таблиця 1

Матриця переходів *P*

Table 1

Transition matrix *P*

З / До	S_1	S_2	S_3	S_4	∑
S_1	0,85	0,10	0,03	0,02	1,0
S_2	0,05	0,75	0,15	0,05	1,0
S_3	0,00	0,00	1,00	0,00	1,0
S_4	0,90	0,00	0,00	0,10	1,0

Інтерпретація станів:

$S_1 \rightarrow S_1$ (0,85): 85 % залишаються справними наступного місяця;

$S_1 \rightarrow S_2$ (0,10): у 10 % випадків виявляється часткова несправність;

$S_1 \rightarrow S_3$ (0,03): раптова критична відмова (3 %);

$S_1 \rightarrow S_4$ (0,02): перехід на ТО, відновлення;

$S_2 \rightarrow S_3$ (0,15): зростає ризик погіршення без обслуговування;

$S_2 \rightarrow S_1$ (0,05): можлива хибна діагностика або дрібне усунення;

$S_2 \rightarrow S_4$ (0,05): ремонт чи профілактика;

$S_3 \rightarrow S_3$ (1,00): стан поглинання — без ремонту система не змінює стан;

$S_4 \rightarrow S_1$ (0,90): успішне відновлення після ремонту;

$S_4 \rightarrow S_4$ (0,10): залишкові проблеми/повторний контроль.

Матриця описує ймовірнісну динаміку зносу та відновлення гальмівної системи**.** Ця модель дозволяє прогнозувати технічний стан гальмівної системи тепловоза у дискретні моменти часу та оцінювати динаміку її деградації.

На рис. 1 зображено граф модель змін технічного стану гальмівної системи тепловоза протягом 12 місяців.

Вершини – чотири технічні стани (S_1: справний, S_2: частково несправний, S_3: критичний, S_4: відновлення).

Стрілки – напрямки змін між станами з відповідними вагами (сумарні прирости ймовірностей протягом часу).

Чим більші ваги – тим частіше або значніше система переходила в цей стан за період.

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2025/341685
© О. В. Неведров, О. М. Горобченко, Д. О. Заіка, В. С. Терещенко, 2025

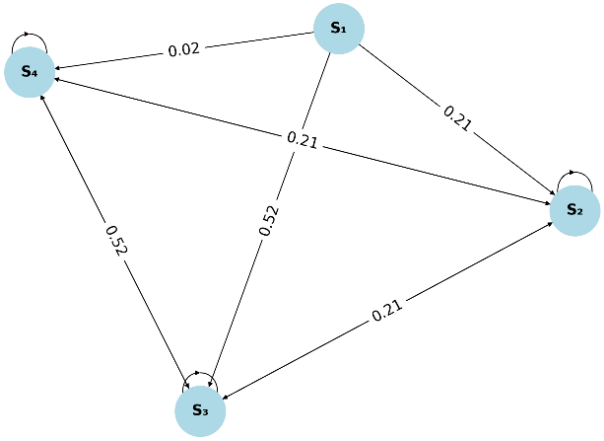

Рис. 1. Граф переходів між технічними станами за 12 місяців

Fig. 1. Graph of transitions between technical states over 12 months

Цей граф допомагає візуалізувати основні траєкторії деградації, наприклад:

$S_1 \rightarrow S_2 \rightarrow S_3$ – типовий шлях поступового зносу;

$S_4 \rightarrow S_1$ – повернення до нормального стану після ремонту.

Щоб визначити імовірність того, що система врешті перейде до поглинаючого стану, будуємо фундаментальну матрицю N для симуляції подальшої поведінки гальмівної системи локомотива, включаючи: побудову Q-матриці (непоглинаючі стани).

$$N = (I - Q)^{-1}, \quad (4)$$

де N – фундаментальна матриця, яка описує очікувану кількість разів, коли система побуває у кожному непоглинаючому стані до моменту переходу у поглинаючий; I – одинична матриця такого ж розміру, як Q; Q – підматриця ймовірностей переходів між непоглинаючими станами, тобто станами, з яких можливі подальші переходи; $(\cdot)^{-1}$ – обернена матриця.

Загальна об’єднана матриця ймовірностей переходів P (усереднена з усіх модулів) має структуру (1).

Оскільки S_3 є поглинаючим станом, ми будуємо Q як підматрицю для станів S_1, S_2, S_4:

$$Q = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{41} & p_{42} & p_{43} & p_{44} \end{pmatrix} \Rightarrow \text{(розмірність } 3 \times 3)$$

Визначення кожного елемента фундаментальної матриці N наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Визначення кожного елемента фундаментальної матриці *N*

Table 2

Determination of each element of the fundamental matrix *N*

Елемент Nij	Пояснення
N_{S_1,S_1}	Очікувана кількість тактів у стані справності, починаючи з S_1
N_{S_1,S_2}	Очікувана кількість разів у частково несправному стані, починаючи з S_1
N_{S_2,S_4}	Скільки разів система потрапить у стан «відновлено», почавши з частково несправного
…	І так далі для кожної пари станів

На основі статистичного аналізу даних експлуатації гальмівного обладнання тепловозів визначено наступні ймовірності переходів між станами (усереднено для всієї системи):

$$P = \begin{pmatrix} 0,85 & 0,10 & 0,03 & 0,02 \\ 0,05 & 0,75 & 0,15 & 0,05 \\ 0,00 & 0,00 & 1,00 & 0,00 \\ 0,90 & 0,00 & 0,00 & 0,10 \end{pmatrix}$$

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2025/341685
© О. В. Неведров, О. М. Горобченко, Д. О. Заіка, В. С. Терещенко, 2025

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2025, № 3 (111)

Стан S_3 – поглинаючий, решта – непоглинаючі. Вилучаємо з P рядки та стовпці, які відповідають поглинаючим станам. Залишаються тільки S_1, S_2, S_4.

Виділення матриці *Q* (непоглинаючі стани):

$$Q = \begin{pmatrix} 0{,}85 & 0{,}10 & 0{,}03 & 0{,}02 \\ 0{,}05 & 0{,}75 & 0{,}15 & 0{,}05 \\ 0{,}90 & 0{,}00 & 0{,}00 & 0{,}10 \end{pmatrix}$$

Побудуємо одиничну матрицю I:

$$I = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Проводимо обчислення *I*–*Q*:

$$I - Q = \begin{pmatrix} 1-0{,}85 & 0-0{,}10 & 0-0{,}02 \\ 0-0{,}05 & 1-0{,}75 & 0-0{,}02 \\ 0-0{,}90 & 0{,}00 & 1-0{,}10 \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} 0{,}15 & 0{,}10 & 0{,}02 \\ 0{,}05 & 0{,}25 & 0{,}05 \\ 0{,}90 & 0{,}00 & 0{,}90 \end{pmatrix}$$

Для обчислення оберненої матриці $N = (I - Q)^{-1}$ використовується стандартний метод обернення матриць (алгебраїчні доповнення або числове програмне обчислення). Припустимо що ми отримуємо наступні дані матриці N наведені в табл. 3.

Таблиця 3

Отриманні дані матриці *N*

Table 3

Obtained data of matrix *N*

Початковий / Поточний стан	S_1	S_2	S_4
S_1 (справний)	11,1111	4,4444	0,4938
S_2 (частково несправний.)	4,4444	5,7778	0,4198
S_4 (відновлений)	11,1111	4,4444	1,6049

N_{11} = 11,11 означає, що якщо система стартує у стані S_1, то в середньому вона буде в ньому 11,1 місяця до відмови.

N_{14} = 0,49 означає, що, починаючи з технічного стану S_1 (справний), система в середньому затримується у стані відновлення (S_4) приблизно на 0,49 дискретних тактів, що при місячному дискретному інтервалі дорівнює приблизно 0,49 місяця.

Результати

На основі вище наведених даних побудуємо вектор середнього часу до поглинання.

$$t = N \cdot 1, \qquad (5)$$

де *N* – фундаментальна матриця (3×3); 1 – вектор-стовпчик одиниць (3×1); *t* – вектор середньої кількості тактів до поглинання кожного початкового стану.

Якщо використовувати матрицю *N*:

$$N = \begin{pmatrix} 11{,}1111 & 4{,}4444 & 0{,}4938 \\ 4{,}4444 & 5{,}7778 & 0{,}4198 \\ 11{,}1111 & 4{,}4444 & 1{,}6049 \end{pmatrix}$$

та

$$1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Тоді:

$$t_{S_1} = 11{,}1111+4{,}4444+0{,}4938 \approx 16{,}05$$

$$t_{S_2} = 4{,}4444+5{,}7778+0{,}4198 \approx 10{,}64$$

$$t_{S_4} = 11{,}1111+4{,}4444+1{,}6049 \approx 17{,}16$$

Отже, середній час до попадання у критичний стан (S_3) наведений у табл. 4.

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2025/341685
© О. В. Неведров, О. М. Горобченко, Д. О. Заіка, В. С. Терещенко, 2025

Таблиця 4

Середній час до попадання у критичний стан (S_3)

Table 4

Average time to critical condition (S_3)

Початковий стан	Середній час до поглинання (місяців)
S_1	~16,05
S_2	~10,64
S_4	~17,16

Проведемо візуалізацію фундаментальної матриці та побудуємо теплову картку (рис. 2).

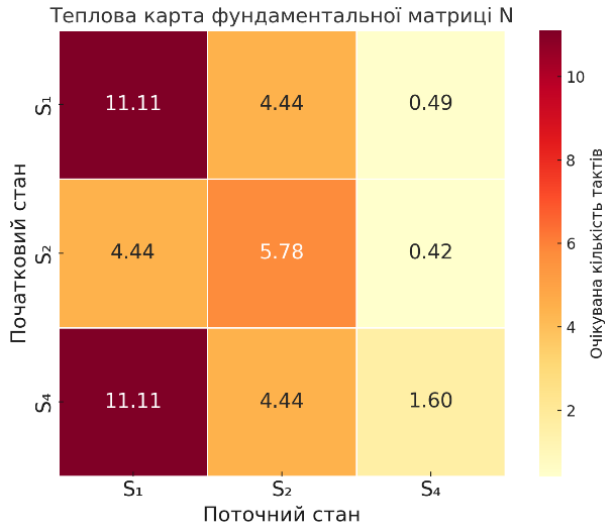

Рис. 2. Теплова карта фундаментальної матриці *N*

Fig. 2. Heat map of the fundamental matrix *N*

Теплова карта фундаментальної матриці *N*, показує:

як довго система в середньому перебуватиме у кожному з непоглинаючих станів (S_1, S_2, S_4), перш ніж потрапити у критичний стан (S_3);

значення по осі Y – початковий стан, по осі X – спостережуваний стан до поглинання;

найтемніші клітинки відповідають найбільшому очікуваному часу перебування.

Наприклад:

починаючи з S_1, система найдовше затримується у S_1 (~11,11 тактів);

починаючи із S_4, вона також часто повертається у S_1.

На рис. 3 побудовано графік на якому зображено середній час до досягнення критичного стану (S_3) для кожного з трьох початкових технічних станів гальмівної системи:

S_1 (справний): ≈ 16,05 місяців – досить стабільний стан;

S_2 (частково несправний): ≈ 10,64 місяця – найшвидше потрапляє у критичний стан;

S_4 (відновлення): ≈ 17,16 місяців – найдовший термін без відмови після ремонту.

Цей аналіз допомагає визначити, з якого стану найвигідніше підтримувати експлуатацію системи та як часто слід проводити технічне обслуговування.

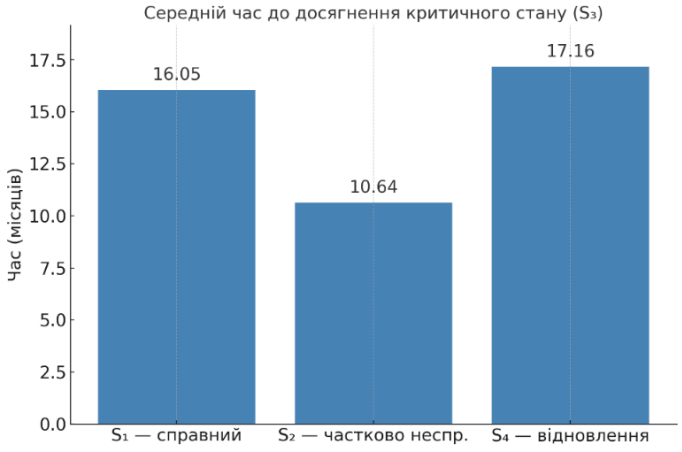

Рис. 3. Середній час до поглинання (потрапляння у критичний стан S_3)

Fig. 3. Average time to absorption (reaching critical state S3)

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2025/341685
© О. В. Неведров, О. М. Горобченко, Д. О. Заіка, В. С. Терещенко, 2025

Наукова новизна та практична значимість

Новизна роботи полягає у отриманні матриці N, що містить інформацію про очікувану кількість разів, коли система, починаючи з певного початкового стану, може переходити або залишається в прийнятному стані (S_1, S_2, S_4) до попадання в поглинаючий критичний стан (S_3). Це дає змогу: виявити слабкі місця – наприклад, часті повернення в частково несправний стан; визначити динаміку деградації; оптимізувати політику обслуговування залежно від профілю деградації. Фундаментальна матриця N є базовим блоком для побудови інтегральних моделей ризику, які дозволяють: оцінити комплексний технічний стан всієї гальмівної системи на будь-який момент часу; сформувати гнучкі графіки технічного обслуговування, які ґрунтуються на фактичному стані, а не лише на пробігу; сприяє створенню інтегрованих показників надійності системи, побудові інфраструктури предиктивного обслуговування, зниженню

експлуатаційних витрат та підвищенню безпеки руху. Фундаментальна матриця N є не лише інструментом теоретичного аналізу, а й практичним інструментом для впровадження цифрової стратегії управління надійністю у сучасному залізничному транспорті. Її використання відкриває можливості для: цифровізації технічної діагностики; адаптивне планування обслуговування; створення інфраструктури інтелектуального обслуговування тепловозів.

Висновки

В рамках проведеного дослідження було побудовано формалізовану математичну модель гальмівної системи тепловоза у вигляді дискретного Марковського процесу з чотирма визначеними технічними станами: S_1 – справний стан (нормальне функціонування); S_2 – частково несправний стан (потребує діагностики або технічного обслуговування); S_3 – критичний стан (відмова, потребує ремонту); S_4 – відновлення стан (після ремонту, частково повернене ресурсне значення). Для побудови даної моделі було вирішено такі завдання:

1. Побудована матриця ймовірностей переходів між станами на основі статистичних даних та експертних оцінок та історичних експлуатаційних даних сформовано матрицю переходів P, що описує імовірності переходу між усіма технічними станами гальмівної системи Особливістю моделі є наявність поглинаючого стану S_3, який фіксує незворотню відмову без зовнішнього втручання.

2. Імітаційне моделювання зміни станів у часі було проведено дискретне моделювання динаміки вектора станів $\pi(t)$, що відображає розподіл ймовірностей перебування системи у кожному з чотирьох станів у кожний момент часу. Графічно відображено процес деградації: ймовірність перебування у стані S_3 (відмова) зростає з часом, що підтверджує релевантність обраної моделі до умов експлуатаційного зносу. Розглядаючи перспективи впровадження наведеного дослідження, можна сказати, що розроблена математична модель дозволяє не лише кількісно аналізувати процес старіння та відмов гальмівної системи, а й формувати оптимальні стратегії технічного обслуговування на основі ймовірнісного прогнозування. Застосування такої моделі у практиці експлуатації локомотивів дозволить: знизити ризики аварій, підвищити ефективність управління технічним станом тягового рухомого складу, реалізувати цифрові сервіси діагностики та підтримки рішень у сфері технічного менеджменту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. *V Міжнародна науково-практична конференція «Безпека на транспорті – основа ефективної інфраструктури: проблеми та перспективи»* : матеріали конф., м. Харків, 10–11 листоп. 2022 р. Харків, 2022. 119 с. URL: https://dl2022.khadi-kh.com/course/view.php?id=3829
2. Горобченко О. М., Заіка Д. О. Створення математичної моделі визначення тягово-енергетичних показників маневрового локомотива. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. 2024. Вип. 208. С. 146–162. DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.208.2024.308485
3. *ДСТУ IEC/ISO 31010:2013. Керування ризиком. Методи загального оцінювання ризику (IEC/ISO 31010:2009, IDT)*. Чинний від 2014-07-01. Вид. офіц. Київ : Мінекономрозвитку України, 2015. 80 с.

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2025/341685
© О. В. Неведров, О. М. Горобченко, Д. О. Заіка, В. С. Терещенко, 2025

4. Лобатюк Ю. А., Мокін О. Б., Мокін Б. І. *Методи і засоби технічної діагностики гальмівної системи електропоїзда* : монографія. Вінниця : ВНТУ, 2018. 100 с.
5. Неведров О. В. Розвиток теоретичних основ оптимізації та оцінки якості управління тяговим рухомим складом. *Транспортні системи і технології*. 2020. Вип. 36. С. 24–32. DOI: https://doi.org/10.32703/2617-9040-2020-36-3
6. Пальчевський Б. О. Класифікація і аналіз технологічних машин за характером взаємодії їх робочих і інформаційних процесів. *Технологічні комплекси*. 2019. № 1. С. 5–20. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Tehkom_2019_1_3
7. Bodnar B., Ochkasov O., Petrenko V., Martishevskij M. Implementing Intelligent Monitoring of the Technical Condition of Locomotive Hydraulic Transmissions. *TRANSBALTICA XIII: Transportation Science and Technology : Proc. of the 13th Intern. Conf*., Sept. 15–16, 2022, Vilnius, Lithuania. Cham, 2023. P. 726–736. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-25863-3_70
8. Craig B. A., Sendi P. P. Estimation of the transition matrix of a discrete-time Markov chain. *Health Economics*. 2002. Vol. 11, Iss. 1. P. 33–42. DOI: https://doi.org/10.1002/hec.654
9. Dufour F., Prieto-Rumeau T. Nash Equilibria for Total Expected Reward Absorbing Markov Games: The Constrained and Unconstrained Cases. *Applied Mathematics & Optimization*. 2024. Vol. 89, Iss. 2. 34. DOI: https://doi.org/10.1007/s00245-023-10095-1
10. Gorobchenko O., Holub H., Zaika D. Theoretical basics of the self-learning system of intelligent locomotive decision support systems. *Archives of Transport*. 2024. Vol. 71, Iss. 3. P. 169–186. DOI: https://doi.org/10.61089/aot2024.gaevsp41
11. Gorobchenko O., Matsiuk V., Holub H., Gritsuk I., Nevedrov O. Increasing the efficiency of operation and management of railroad transport infrastructure based on maximum levels of fault tolerance. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Vol. 5, Iss. 3 (131). P. 55–65. DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.311829
12. Gorobchenko O., Nevedrov O. Development of the structure of an intelligent locomotive DSS and as-sessment of its efectiveness. *Archives of Transport*. 2020. Vol. 56, Iss. 4. P. 47–58. DOI: https://doi.org/10.5604/01.3001.0014.5517
13. Grussing M. N., Liu L. Y., Uzarski D. R., El-Rayes K., El-Gohary N. Discrete Markov approach for building component condition, reliability, and service-life prediction modeling. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 2016. Vol. 30, Iss. 5. 04016015. DOI: https://doi.org/10.1061/(asce)cf.1943-5509.0000865
14. He W., Sun Y. Stationary Markov perfect equilibria in discounted stochastic games. *Journal of Economic Theory*. 2017. Vol. 169. P. 35–61. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jet.2017.01.007
15. Hernández-Lerma,O., Lasserre J. B. *Discrete-Time Markov Control Processes. Basic Optimality Criteria*. New York : Springer, 1996. 230 p. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4612-0729-0
16. Martins A., Fonseca I., Farinha J., Reis J., Cardoso A. J. M. Maintenance Prediction through Sensing Using Hidden Markov Models – A Case Study. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, Iss. 16. 7685. DOI: https://doi.org/10.3390/app11167685
17. Moiseenko V., Kameniev O., Gaievskyi V. Predicting a technical condition of railway automation hardware under conditions of limited statistical data. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2017. Вип. 3, № 9(87). С. 26–35. DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.102005
18. Stewart W. J. *Introduction to the numerical solution of Markov chains*. Princeton : Princeton University Press, 1994. 568 p.
19. Tang D., Cao J., Yu J. Remaining useful life prediction for engineering systems under dynamic operational conditions: A semi-Markov decision process-based approach. *Chinese Journal of Aeronautics*, 32(3), P. 627–638. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cja.2018.08.015
20. Vale C., Simões M. L. Prediction of Railway Track Condition for Preventive Maintenance by Using a Data-Driven Approach. *Infrastructures*. 2022. Vol. 7, Iss. 3. 34. DOI: https://doi.org/10.3390/infrastructures7030034

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2025/341685

© О. В. Неведров, О. М. Горобченко, Д. О. Заіка, В. С. Терещенко, 2025

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2025, № 3 (111)

O. V. NEVEDROV[1*], O. M. GOROBCHENKO[2], D. O. ZAIKA[3], V. S. TERESHCHENKO[4]

[1*]Dep. «Electromechanics and Railway Rolling Stock», National Transport University, M. Omelyanovicha-Pavlenko St., 1, Kyiv, Ukraine, 01010, tel. +38 (097) 301 28 97, e-mail nvp2020lts@gmail.com, ORCID 0000-0001-9347-0973
[2]Dep. «Electromechanics and Railway Rolling Stock», National Transport University, M. Omelyanovicha-Pavlenko St., 1, Kyiv, Ukraine, 01010, tel. +38 (050) 972 04 71, e-mail gorobhenko.a.n@gmail.com, ORCID 0000-0002-9868-3852
[3]Dep. «Electromechanics and Railway Rolling Stock», National Transport University, M. Omelyanovicha-Pavlenko St., 1, Kyiv, Ukraine, 01010, tel. +38 (066) 836 09 91 71, e-mail zaika_do@gsuite.duit.edu.ua, ORCID 0000-0003-0693-9580
[4]Dep. «Electromechanics and Railway Rolling Stock», National Transport University, M. Omelyanovicha-Pavlenko St., 1, Kyiv, Ukraine, 01010, tel. +38 (068) 794 65 80, e-mail tereschenko_vs@gsuite.duit.edu.ua, ORCID 0009-0006-7906-728

Prediction of the Technical Condition of the Brake System of a Diesel Locomotive using the Markov Analysis Method

Purpose. The article considers the issue of predicting the technical condition of the brake system of a diesel locomotive using the Markov analysis method. The purpose of the study is to build a mathematical model that allows for high-precision assessment of the current and future technical condition of the system based on statistical data. The proposed model allows for formalizing transitions between the technical states of serviceable, partially faulty, critical, and restored, which allows for effective maintenance planning. **Methodology**. To solve the problem, we will build a mathematical model for predicting the technical condition of the brake system of a diesel locomotive based on a discrete Markov process with four states: «serviceable», «partially faulty», «critical», «restored». This model allows for formalizing the probabilities of transitions between states at discrete points in time and assessing the dynamics of system degradation. The set of system states is represented as «serviceable» (normal functioning, no maintenance required), «partially faulty» (additional diagnostics or maintenance required), «critical state» (failure state requiring repair or replacement of a node – absorbing state), «restored» (after repair, the state is close to the initial state). The structure of the transition matrix is constructed and the probability of transition from state to state is denoted. **Finding.** Based on the above data, the vector of the average time to absorption is constructed. **Originality.** The novelty of the work lies in obtaining the matrix *N*, which contains information about the expected number of times when the system, starting from a certain initial state, can transition or remain in an acceptable state until it enters an absorbing critical state. This makes it possible to identify weaknesses, namely frequent returns to a partially faulty state. It is also possible to determine the dynamics of the degradation of the brake system and, depending on it, optimize maintenance. **Practical value**. As part of the research, a formalized mathematical model of the locomotive brake system was constructed in the form of a discrete Markov process with four defined technical states.

Keywords: railway transport; locomotive; technical state; diagnostics; forecasting; control; Markov process; Markov chain

REFERENCES

1. Kharkivskyi natsionalnyi avtomobilno-dorozhnii universytet (2022). *V Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia «Bezpeka na transporti – osnova efektyvnoi infrastruktury: problemy ta perspektyvy»:* materialy konferentsii. Kharkiv, Ukraine. Retrieved from https://dl2022.khadi-kh.com/course/view.php?id=3829 (in Ukrainian)
2. Gorobchenko, O., & Zaika, D. (2024). Development of a Mathematical Model for Determining Traction and Energy Performance Indicators of a Maneuvering Locomotive. *Collection of Scientific Works of the Ukrainian State University of Railway Transport*, *208*, 146-162. DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.208.2024.308485 (in Ukrainian)
3. *Keruvannia ryzykom. Metody zahalnoho otsiniuvannia ryzyku, 80 DSTU IEC/ISO 31010:2013* (2015). (in Ukrainian)
4. Lobatiuk, Yu. A., Mokin, O. B., & Mokin, B. I. (2018). *Metody i zasoby tekhnichnoi diahnostyky halmivnoi systemy elektropoizda* : monohrafiia. Vinnytsia: VNTU. (in Ukrainian)
5. Nevedrov, O. V. (2020). Development of Theoretical Fundamentals of Optimization and Quality Assessment of Traction Rolling Stock Management. *Collection of Scientific Works of the State University of Infrastructure and Technologies Series «Transport Systems and Technologies»*, *36*, 24-32. DOI: https://doi.org/10.32703/2617-9040-2020-36-3 (in Ukrainian)

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2025/341685
© О. В. Неведров, О. М. Горобченко, Д. О. Заіка, В. С. Терещенко, 2025

6. Palchevskyi, B. O. (2019). Classification and Analysis of Technological Machines by the Nature of the Interaction of Their Working and Information Processes. *Tekhnolohichni* kompleksy, *1*, 5-20. Retrieved from http://nbuv.gov.ua/UJRN/Tehkom_2019_1_3 (in Ukrainian)
7. Bodnar, B., Ochkasov, O., Petrenko, V., & Martishevskij, M. (2023). Implementing Intelligent Monitoring of the Technical Condition of Locomotive Hydraulic Transmissions. *TRANSBALTICA XIII: Transportation Science and Technology*, 726-736. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-25863-3_70 (in English)
8. Craig, B. A., & Sendi, P. P. (2002). Estimation of the transition matrix of a discrete- time Markov chain. *Health Economics*, *11*(1), 33-42. DOI: https://doi.org/10.1002/hec.654 (in English)
9. Dufour, F., & Prieto-Rumeau, T. (2024). Nash Equilibria for Total Expected Reward Absorbing Markov Games: The Constrained and Unconstrained Cases. *Applied Mathematics & Optimization*, *89*(2), 34. DOI: https://doi.org/10.1007/s00245-023-10095-1 (in English)
10. Gorobchenko, O., Holub, H., & Zaika, D. (2024). Theoretical basics of the self-learning system of intelligent locomotive decision support systems. *Archives of Transport*, *71*(3), 169-186. DOI: https://doi.org/10.61089/aot2024.gaevsp41 (in English)
11. Gorobchenko, O., Matsiuk, V., Holub, H., Gritsuk, I., & Nevedrov, O. (2024). Increasing the efficiency of operation and management of railroad transport infrastructure based on maximum levels of fault tolerance. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, *5*(3 (131)), 55-65. DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.311829 (in English)
12. Gorobchenko, O., & Nevedrov, O. (2020). Development of the structure of an intelligent locomotive DSS and assessment of its efectiveness. *Archives of Transport*, *56*(4), 47-58. DOI: https://doi.org/10.5604/01.3001.0014.5517 (in English)
13. Grussing, M. N., Liu, L. Y., Uzarski, D. R., El-Rayes, K., & El-Gohary, N. (2016). Discrete Markov Approach for Building Component Condition, Reliability, and Service-Life Prediction Modeling. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, *30*(5), 04016015. DOI: https://doi.org/10.1061/(asce)cf.1943-5509.0000865 (in English)
14. He, W., & Sun, Y. (2017). Stationary Markov perfect equilibria in discounted stochastic games. *Journal of Economic Theory*, *169*, 35-61. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jet.2017.01.007 (in English)
15. Hernández-Lerma, O., & Lasserre, J. B. (1996). *Discrete-Time Markov Control Processes*. *Basic Optimality Criteria*. New York: Springer. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4612-0729-0 (in English)
16. Martins, A., Fonseca, I., Farinha, J., Reis, J., & Cardoso, A. J. M. (2021). Maintenance Prediction through Sensing Using Hidden Markov Models – A Case Study. *Applied Sciences*, *11*(16), 7685. DOI: https://doi.org/10.3390/app11167685 (in English)
17. Moiseenko, V., Kameniev, O., & Gaievskyi, V. (2017). Predicting a technical condition of railway automation hardware under conditions of limited statistical data. *Skhidno-Yevropeiskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii*, *3*(9 (87)), 26-35. DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.102005 (in English)
18. Stewart, W. J. (1994). *Introduction to the numerical solution of Markov chains*. Princeton: Princeton University Press. (in English)
19. Tang, D., Cao, J., & Yu, J. (2019). Remaining useful life prediction for engineering systems under dynamic operational conditions: A semi-Markov decision process-based approach. *Chinese Journal of Aeronautics*, *32*(3), 627-638. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cja.2018.08.015 (in English)
20. Vale, C., & Simões, M. L. (2022). Prediction of Railway Track Condition for Preventive Maintenance by Using a Data-Driven Approach. *Infrastructures*, *7*(3), 34. DOI: https://doi.org/10.3390/infrastructures7030034 (in English)

Надійшла до редколегії: 26.05.2025
Прийнята до друку: 30.09.2025

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2025/341685
© О. В. Неведров, О. М. Горобченко, Д. О. Заіка, В. С. Терещенко, 2025