

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

629.46.027.11:[519.87:656.2.08]

Л. А. МУРАДЯН^{1*}, І. В. ПІЦЕНКО^{2*}, В. Ю. ШАПОШНИК^{3*}

^{1*}Каф. «Вагони та вагонне господарство», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 19, ел. пошта leontymuradian@gmail.com, ORCID 0000-0003-1781-4580

^{2*}Каф. «Вагони та вагонне господарство», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 19, ел. пошта irinapit95@gmail.com, ORCID 0000-0002-5674-0337

^{3*}Каф. «Вагони та вагонне господарство», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 19, ел. пошта vladislav.sh91@gmail.com, ORCID 0000-0003-4701-6491

Математична модель визначення ризиків на залізничному транспорті під час діагностики буксових вузлів вантажних вагонів

Мета. Дослідження спрямовано на розробку математичної моделі визначення ризиків на залізничному транспорті під час діагностики буксових вузлів вантажних вагонів, яка дозволить надати оцінку безпеки руху в разі вантажних перевезень. **Методика.** Для розробки математичної моделі визначення ризиків на залізничному транспорті використано безперервну статичну модель залежності рівня індивідуального підходу обслуговуючого персоналу від рівня загальних інтересів (бригада, зміна). При цьому було розглянуто три види залежностей: оптимістичну, нейтральну, песимістичну. **Результати.** Розроблена математична модель, яка дозволяє, під час діагностики буксових вузлів вантажних вагонів, оцінити ризики і рівень безпеки руху поїздів, а також визначити подальші заходи щодо зниження ризиків. У процесі оцінки рівня індивідуальних підходів і загальних інтересів окремого підрозділу залізниці під час виконання технічного обслуговування та ремонту буксового вузла вантажних вагонів були розглянуті варіанти граничних можливостей цього підрозділу, при цьому встановлені екстремальні значення за рівноважного розподілу, для випадку домінування технічного контролю буксового вузла вантажних вагонів та для випадку домінування ремонтів буксового вузла вантажних вагонів. **Наукова новизна.** Вперше розроблено математична модель ризиків на залізничному транспорті, що формується при виконанні технічного обслуговування та ремонту вантажних вагонів, яка дозволяє визначити рівень безпеки руху під час виконання вантажних перевезень та намітити подальші заходи щодо зниження ризиків. Набув подальшого розвитку метод дослідження ефективності системи технічного обслуговування та ремонту буксового вузла, що на відміну від наявного встановлює залежність кількості технічних обслуговувань вагонних букс від кількості їх ремонтів в експлуатації та дозволить підвищити рівень безпеки руху. **Практична значимість.** Застосування отриманих математичних моделей ризиків на залізничному транспорті може знизити ризики під час проведення діагностики буксових вузлів вантажних вагонів із метою підвищення локального чи загального рівня безпеки руху поїздів.

Ключові слова: безпека руху поїздів; ризик; буксовий вузол; діагностика; вантажні вагони; залізничний транспорт

Вступ

Залізничний транспорт на внутрішньому ринку надає значну частину транспортних послуг, пов'язаних з організацією та забезпеченням процесу перевезення вантажів і пасажирів.

Одним із головних завдань залізничного транспорту, а також важливою складовою його ефективної роботи й розвитку є забезпечення безпеки руху, на яку безпосередньо впливає надійність елементів рухомого складу й технічних засобів інфраструктури [3, 8, 23, 25].

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Успішне вирішення завдання забезпечення необхідного рівня безпеки руху на залізниці полягає в підтримці належного технічного стану й надійності в першу чергу вагонного парку. Безпека руху при цьому може бути оцінена ризиками можливих відмов вантажних вагонів після виконання технічного обслуговування та ремонту. Тому забезпечення низьких значень ризиків у процесі експлуатації залізничного транспорту під час технічного обслуговування та ремонту може бути досягнуто належним процесом діагностування вантажних вагонів, оскільки вони складають найбільшу частину з усього рухомого складу під час вантажних перевезень [2, 4].

Інформація про відмови елементів вантажних вагонів, що виникають у процесі експлуатації, являє собою деякий набір статистичних даних, використання яких дає можливість провести аналіз цих відмов. На підставі відомої статистичної інформації про відмови елементів вантажних вагонів можна стверджувати, що найбільша їх частка припадає на буксові вузли.

У ході аналізу відмов буксових вузлів вантажних вагонів встановлено, що майже всі вони пов'язані з неякісно проведеним ремонтом і технічним обслуговуванням, на процес якого істотно впливає недотримання технології виконання, зокрема й людський фактор [24]. Для зниження ризиків, що допускаються під час ремонту й технічного обслуговування вантажних вагонів, необхідно застосовувати методи діагностування буксових вузлів і подальший розрахунок ризиків для оцінки безпеки руху на залізничному транспорті.

У роботах [13, 22] наведено методики аналізу дерева відмов для оцінки безпеки руху. Такі методики використовують для підвищення ефективності технічного обслуговування залізничного транспорту й зниження ризиків. Кілька методів у роботах [14, 20] представляють поліпшені методики аналізу дерева відмов для прийняття рішень.

Роботи [12, 16, 24] засновані на сценаріях аварій з урахуванням людського фактора. У роботах [9, 11] наведено моделі ризику для оцінки безпеки руху. У роботах [10, 26] безпека руху пов'язана з процесами системи технічного

обслуговування елементів транспортної системи.

У [17, 18] наведено систему ідентифікації ризиків на залізничному транспорті та застосовано метод експлуатаційної надійності для оцінки безпеки руху. Аналіз ризику [19] дав можливість використовувати стохастичні методи оцінки безпеки руху. У [2, 6, 21] представлені методи оцінки ризиків і можливості підвищення безпеки руху під час проектування, експлуатації та технічного обслуговування засобів транспорту залізниць, особливу увагу приділено конструкції вантажних вагонів і їх впливу на безпеку руху.

Мета

Основною метою роботи є розробка математичної моделі визначення ризиків на залізничному транспорті під час діагностики буксових вузлів вантажних вагонів, яка дозволить надати оцінку безпеки руху в разі вантажних перевезень.

Методика

Використаємо параметр P_x – імовірність успішного виконання поставленого завдання з технічного обслуговування й ремонту буксових вузлів вантажних вагонів, за яким можна надати оцінку якості їх виконання. Запишемо залежність для зазначеного параметра ймовірності в загальному вигляді:

$$P_x = \sum_{i=1}^n P_{xi} (1 - P_{hi}) / n, \quad (1)$$

де P_{xi} – імовірність виконання відповідної i -ої операції з технічного обслуговування й ремонту буксового вузла вантажних вагонів; P_{hi} – імовірність допущеної помилки під час виконання відповідної i -ої операції з технічного обслуговування й ремонту буксового вузла вантажних вагонів; n – кількість операцій з технічного обслуговування й ремонту буксового вузла вантажних вагонів.

Якщо поставлене завдання з технічного обслуговування й ремонту буксового вузла вантажних вагонів виконане без допущення поми-

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

лок обслуговуючим персоналом, то вираз (1) матиме значення $P_x = 1$.

Під час здійснення технічного контролю виконання технічного обслуговування й ремонту буксового вузла вантажних вагонів ризик його відмови R_x дорівнює величині $R_x = 1 - P_x = 0$. Але в загальному вигляді ризик відмови буксового вузла вантажних вагонів в ході здійснення технічного контролю виконання технічного обслуговування й ремонту потрібно визначати за таким виразом:

$$R_x = (1 - P_x)P_{hk} = 0, \quad (2)$$

де P_{hk} – імовірність допущеної помилки у разі виконання технічного контролю під час прийняття буксового вузла вантажних вагонів із ремонту.

Ризик відмови буксових вузлів вантажних вагонів, які призвели до транспортних подій, визначаємо за виразом:

$$R_{хтп} = \frac{K_{тк}}{\sum_{i=1}^n K_i}, \quad (3)$$

де $K_{тк}$ – кількість відмов буксових вузлів вантажних вагонів під час експлуатації, які призвели до транспортних подій;

$\sum_{i=1}^n K_i$ – сума всіх відмов вантажних вагонів під час експлуатації, які призвели до транспортних подій.

Маючи наявні дані, виявлені приладами контролю колісних пар, можемо розрахувати ризик відмови буксових вузлів вантажних вагонів під час здійснення технічного контролю виконання ремонту за виразом:

$$R_{хтк} = \frac{\left(\sum_{i=1}^n K_{iнк} - K_e \right)}{\sum_{i=1}^n K_{iнк}}, \quad (4)$$

де K_e – кількість відмов буксових вузлів вантажних вагонів через недотримання вимог експлуатації або фізичного зносу, які виявлені приладами контролю; $K_{iнк}$ – i -та відмова буксових вузлів вантажних вагонів під час експлуатації, які виявлені приладами контролю колісних пар.

Якби не було виявлено несправності буксових вузлів вантажних вагонів під час експлуатації приладами контролю колісних пар, то можна було б стверджувати, що вони призвели до відмов, які перейшли в категорію транспортних подій. Це доводить той факт, що застосування технічних засобів і приладів, а також відсутність впливу людського чинника дозволяє знизити ризики відмов буксових вузлів вантажних вагонів під час їх експлуатації.

Для того щоб знизити вплив людського чинника як під час проведення технічного обслуговування та ремонту, так і під час виконання технічного контролю, необхідно застосувати метод та обладнання для діагностики буксових вузлів вантажних вагонів за вібраційними характеристиками [1]. Це дозволить знизити рівень ризику відмов буксових вузлів під час експлуатації вантажних вагонів.

На практиці під час виконання технічного обслуговування та ремонту буксового вузла вантажних вагонів існує деяка безперервна статична модель залежності рівня індивідуального підходу обслуговуючого персоналу (x) від рівня загальних інтересів (бригада, зміна) (y) [5, 7, 15]. Як правило, існує три види залежностей: оптимістична, нейтральна, песимістична. Аналітично ці залежності мають вигляд:

- оптимістична – $x = 1 - y^2$;
- нейтральна – $x = 1 - y$;
- песимістична – $x = (y - 1)^2$.

Графічно ці залежності під час виконання технічного обслуговування та ремонту буксового вузла вантажних вагонів наведено на рис. 1.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

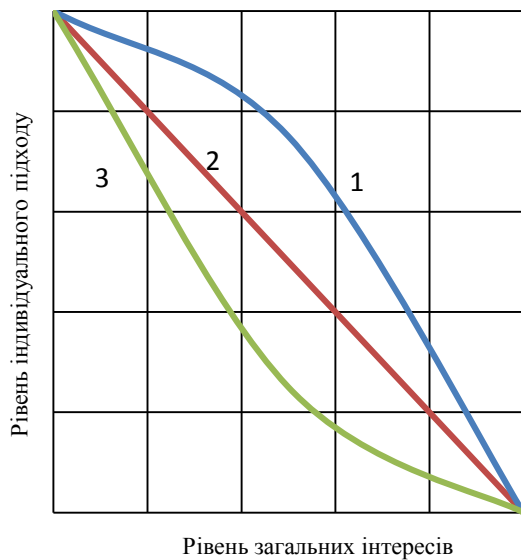


Рис. 1. Графічні залежності рівня індивідуального підходу під час виконання технічного обслуговування та ремонту буксового вузла вантажних вагонів від рівня загальних інтересів:

1 – оптимістична; 2 – нейтральна; 3 – песимістична

Fig. 1. Graphic dependencies of the level of individual approach during the maintenance and repair of the axle box of freight cars on the level of common interests:

1 – optimistic; 2 – neutral; 3 – pessimistic

Як інтегральні критерії визначення стратегічно оптимального співвідношення рівнів досягнення індивідуального підходу й загальних інтересів під час виконання технічного обслуговування та ремонту буксового вузла вантажних вагонів можуть бути обрані два види – мультиплікативний та евклідовий:

$$Y_1 = xy; \rightarrow Y_2 = x^2 + y^2; \quad (5)$$

які для трьох видів залежностей мають вигляд:
– оптимістичний:

$$Y_1 = (1 - y^2)y; Y_2 = (1 - y^2)^2 + y^2;$$

– нейтральний:

$$Y_1 = (1 - y)y; Y_2 = (1 - y)^2 + y^2;$$

– песимістичний:

$$Y_1 = (y - 1)^2 y; Y_2 = (y - 1)^4 + y^2.$$

Результати

Стратегічно оптимальне співвідношення рівнів досягнення індивідуальних підходів і загальних інтересів під час виконання технічного обслуговування та ремонту буксового вузла вантажних вагонів наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Стратегічно оптимальні співвідношення досягнення рівнів індивідуальних підходів і загальних інтересів під час виконання технічного обслуговування та ремонту буксового вузла вантажних вагонів

Table 1

Strategically optimal ratios of achieving the levels of individual approaches and common interests during the maintenance and repair of the axle box of freight cars

Вид стратегічної залежності	Метрика інтегрального критерію	
	мультиплікативна	евклідова
Оптимістичний	0,58	0,7
Нейтральний	0,5	0,5
Песимістичний	0,67	0,4

Таким чином, залежно від суб'єктивного вибору виду стратегічної залежності між рівнем досягнення індивідуального підходу й рівнем досягнення загального інтересу та видом метрики інтегрального критерію під час виконання технічного обслуговування та ремонту буксового вузла вантажних вагонів можна оцінити в статичному режимі їх оптимальне співвідношення.

На основі наведених залежностей на рис. 1, які будуть виступати кривими граничних можливостей окремого підрозділу залізниці під час виконання технічного обслуговування та ремонту буксового вузла вантажних вагонів, розглянемо взаємозалежності кількості технічних обслуговувань (x) і кількості ремонтів буксового вузла вантажних вагонів (y), виходячи з максимальних можливостей окремого підрозділу X_{\max} та Y_{\max} відповідно. Ці залежності наведено на рис. 2.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

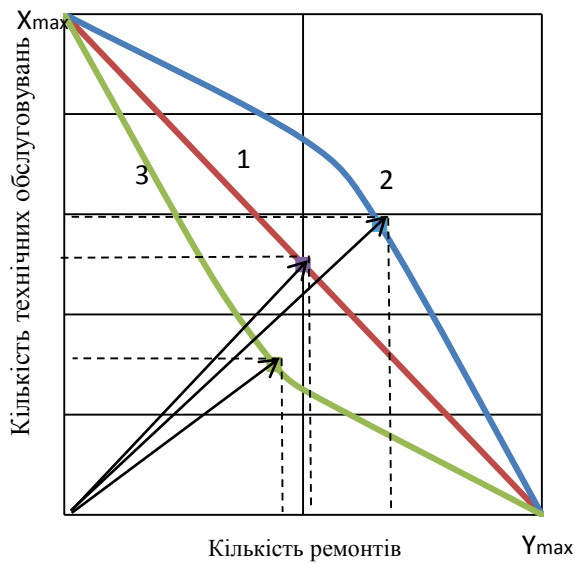


Рис. 2. Криві граничних можливостей окремого підрозділу залізниці під час виконання технічного обслуговування та ремонту буксового вузла вантажних вагонів:
1 – рівноважна; 2 – домінування технічних обслуговувань;
3 – домінування ремонтів

Fig. 2. Curves of the limit possibilities of a separate railway subdivision during the maintenance and repair of axle box of freight cars:
1 – equilibril; 2 – dominance of maintenance;
3 – dominance of repairs

Для рівноважної залежності під час виконання технічного обслуговування та ремонту буксового вузла вантажних вагонів запишемо рівняння:

$$y = a + bx. \quad (6)$$

При цьому максимальне значення кількості ремонтів буксового вузла вантажних вагонів дорівнюватиме: $y_{\max} = a$, а максимальне значення кількості технічних обслуговувань буксового вузла вантажних вагонів $a + bx_{\max} = 0$.

Тоді $b = -\frac{y_{\max}}{x_{\max}}$.

Вихідна залежність з урахуванням значень коефіцієнтів матиме вигляд:

$$y = y_{\max} \left(1 - \frac{x}{x_{\max}} \right).$$

Використовуючи мультиплікативний критерій

$$J = xy \rightarrow \max, \quad (7)$$

запишемо для цього випадку критерій:

$$J = xy_{\max} \left(1 - \frac{x}{x_{\max}} \right) \rightarrow \max.$$

Знайдемо екстремуми наведеної функції ($J = 0$):

$$y_{\max} \left(1 - \frac{x}{x_{\max}} \right) - \left(\frac{xy_{\max}}{x_{\max}} \right) = 0;$$

$$x_{\text{ext}} = \frac{x_{\max}}{2};$$

$$y_{\text{ext}} = \frac{y_{\max}}{2}.$$

Далі для випадків, представлених кривими 2 і 3 на рис. 2, запишемо загальне рівняння у вигляді:

$$y = a + bx + cx^2. \quad (8)$$

Для залежності в разі домінування технічного контролю буксового вузла вантажних вагонів (крива 2, рис. 2) максимальне значення кількості ремонтів (за $x=0$) дорівнюватиме: $y_{\max} = a$, а похідна в точці $x=0$ дорівнює:

$$\dot{y} = b + 2cx \Big|_{x=0} = 0,$$

тоді $b=0$ для цього випадку.

Запишемо початкове рівняння зі знайденими коефіцієнтами:

$$y_{\max} + 0x_{\max} + cx_{\max}^2 = 0,$$

звідси:

$$c = -\frac{y_{\max}}{x_{\max}^2}.$$

У результаті матимемо:

$$y = y_{\max} \left(1 - \frac{x^2}{x_{\max}^2} \right).$$

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Запишемо критерій (7):

$$J = xy_{\max} \left(1 - \frac{x^2}{x_{\max}^2} \right) \rightarrow \max.$$

Знайдемо екстремуми наведеної функції ($J = 0$):

$$y_{\max} \left(1 - \frac{x^2}{x_{\max}^2} \right) - \left(\frac{2x^2 y_{\max}}{x_{\max}^2} \right) = 0;$$

$$x_{\text{ext}} = \frac{x_{\max}}{\sqrt{3}} = 0,58x_{\max};$$

$$y_{\text{ext}} = \frac{2}{3} y_{\max} \approx 0,66y_{\max}.$$

Для залежності в разі домінування кількості ремонтів буксового вузла вантажних вагонів (крива 3, рис. 2) максимальне значення кількості ремонтів (за $x = 0$) дорівнюватиме: $y_{\max} = a$, а похідна в точці $x = 0$:

$$\dot{y} = b + 2cx_{\max} = 0,$$

тоді $b = -2cx_{\max}$ для розглянутого випадку.

Запишемо початкове рівняння зі знайденими коефіцієнтами:

$$y_{\max} + 2cx_{\max}^2 + cx_{\max}^2 = 0,$$

звідси:

$$c = \frac{y_{\max}}{x_{\max}^2};$$

$$b = -2 \frac{y_{\max}}{x_{\max}}.$$

Ще раз запишемо рівняння:

$$y = y_{\max} \left(1 - \frac{2x}{x_{\max}} + \frac{x^2}{x_{\max}^2} \right).$$

$$J = xy_{\max} \left(1 - \frac{2x}{x_{\max}} + \frac{x^2}{x_{\max}^2} \right) = xy_{\max} \left(1 - \frac{x}{x_{\max}} \right)^2 \rightarrow \max.$$

Знайдемо екстремуми наведеної функції ($J = 0$):

$$y_{\max} \left(1 - \frac{x}{x_{\max}} \right)^2 -$$

$$-2y_{\max} \left(1 - \frac{x}{x_{\max}} \right) \times \frac{x}{x_{\max}} = 0;$$

$$x_{\text{ext}} = \frac{x_{\max}}{3} \approx 0,33x_{\max};$$

$$y_{\text{ext}} = \frac{4}{9} y_{\max} \approx 0,44y_{\max}.$$

Розглянуті варіанти граничних можливостей окремого підрозділу залізниці за рівноважної залежності, у разі домінування кількості технічних обслуговувань або ремонтів буксового вузла вантажних вагонів, дають можливість обрати техніко-економічні параметри роботи окремого підрозділу залізниці та модель для оцінки виконання технічного обслуговування й ремонту буксового вузла вантажних вагонів.

Наукова новизна та практична значимість

Автори цієї роботи вперше запропонували математичну модель визначення ризиків на залізничному транспорті під час діагностики буксових вузлів вантажних вагонів, яка дозволяє надати оцінку безпеки руху в разі здійснення вантажних перевезень та визначити подальші заходи щодо зниження ризиків.

Набув подальшого розвитку метод дослідження ефективності системи технічного обслуговування та ремонту буксового вузла, що на відміну від наявного встановлює залежність кількості технічних обслуговувань вагонних букс від кількості їх ремонтів в експлуатації та дозволить підвищити рівень безпеки руху.

Висновки

У процесі оцінки рівня індивідуальних підходів і загальних інтересів окремого підрозділу залізниці під час виконання технічного обслуговування та ремонту буксового вузла вантажних вагонів в умовах невизначеності було розглянуто варіанти граничних можливостей цього

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

підрозділу. При цьому встановлено, що за рівноважного розподілу екстремальні значення $x_{\text{ext}} = x_{\text{max}} / 2$, $y_{\text{ext}} = y_{\text{max}} / 2$ для випадку домінування технічних обслуговувань буксового вузла вантажних вагонів дорівнюють

$x_{\text{ext}} = 0,58x_{\text{max}}$, $y_{\text{ext}} = 0,66y_{\text{max}}$, а для випадку домінування ремонтів буксового вузла вантажних вагонів $x_{\text{ext}} = 0,33x_{\text{max}}$, $y_{\text{ext}} = 0,44y_{\text{max}}$.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ададуров А. С., Романова А. А. Критерии достоверности результатов диагностики буксовых узлов грузовых вагонов акустическими методами. *Транспорт Российской Федерации*. 2019. № 5 (84). С. 57–61.
2. Мурадян Л. А., Шапошник В. Ю., Мищенко А. А. Методологические основы определения эксплуатационных характеристик несамоходного подвижного состава. *Наука та прогрес транспорту*. 2016. № 1 (61). С. 169–179. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2016/61044>
3. Мурадян Л. А., Шапошник В. Ю., Пиценко И. В. Перспективы эксплуатации литых колес на железных дорогах Украины. *Вагонный парк*. 2016. Вып. № 9–10 (114–115). С. 38–41.
4. Мурадян Л. А., Шапошник В. Ю., Подосенов Д. О. Повышение надежности грузовых вагонов с применением новых технологий изготовления и восстановления рабочих поверхностей. *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті*. 2016. № 11. С. 49–54.
5. Мямлін С. В., Мурадян Л. А. Застосування основних законів розподілу випадкових величин для визначення показників надійності вагонів. *Збірник наукових праць ДЕТУТ. Серія «Транспортні системи і технології»*. 2015. Вип. 26. С. 172–180.
6. Потапенко О. О., Могила В. І. Перспективна конструкція ресорного підвищення візка вантажного вагона та результати її дослідження. *Вісник ЧНУ ім. В. Даля*. 2019. № 3 (251). С. 144–150.
7. Устич П. А., Карпычев В. А., Овечников М. Н. *Надежность рельсового нетягового подвижного состава*. Москва : УМЦ МПС России, 2004. 416 с.
8. Швець А. О. Стійкість вантажних вагонів у разі дії стискних поздовжніх сил. *Наука та прогрес транспорту*. 2020. № 1 (85). С. 119–137. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2020/199485>
9. An M., Lin W., Huang S. An Intelligent Railway Safety Risk Assessment Support System for Railway Operation and Maintenance Analysis. *The Open Transportation Journal*. 2013. Vol. 7. P. 27–42. DOI: <https://doi.org/10.2174/1874447801307010027>
10. COMMISSION IMPLEMENTING REGULATION (EU) No 402/2013 of 30 April 2013 on the common safety method for risk evaluation and assessment and repealing Regulation (EC) No 352/2009. *Official Journal of the European Union*. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=celex:32013R0402>
11. Figueres E. M., Hughes P., Gulijk C. Big Data for Risk Analysis : the future of safe railways. *XII Congreso de Ingeniería del Transporte (CIT 2016)* (Spain, 7-9 June 2016). Universitat Politècnica de València, 2016. P. 347–353. DOI: <https://doi.org/10.4995/CIT2016.2016.1825>
12. Hadj-Mabrouk H. Contribution of artificial intelligence to risk assessment of railway accidents. *Urban Rail Transit*. 2019. Vol. 5. Iss. 2. P. 104–122. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40864-019-0102-3>
13. Houdijk R. M. Rail transport of hazardous substances from the perspective of ‘all hazard’ risk management. *Chemical 158 engineering transactions*. 2016. Vol. 48. P. 949–954.
14. Huang H.-Z., Zhang H., Li Y. A new ordering method of basic events in fault tree analysis. *Quality and Reliability Engineering International*. 2012. Vol. 28. Iss. 3. P. 297–305. DOI: <https://doi.org/10.1002/qre.1245>
15. Johansen S. Estimation and hypothesis testing of cointegration vectors in the presence of linear trend. *Econometrica*. 1991. Vol. 59. № 6. P. 1551–1580.
16. Leitner B. A general model for railway systems risk assessment with the use of railway accident scenarios analysis. *Procedia engineering*. 2017. Vol. 187. P. 150–159. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.361>
17. Lingaitis L. P., Mjamlin S., Baranovsky D., Jastremskas V. Prediction methodology of durability of locomotives diesel engines. *Ekspluatacija i Niezawodnosc – Maintenance and Reliability*. 2012. Vol. 14, № 2. P. 154–159.
18. Lingaitis L. P., Mjamlin S., Baranovsky D., Jastremskas V. Experimental investigations on operational reliability of diesel locomotives engines. *Ekspluatacija i Niezawodnosc – Maintenance and Reliability*. 2012. Vol. 14, № 1. P. 5–10.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

19. Licciardello R., Baldassarra A., Vitali P., Tieri A., Cruciani M., Vasile A. N. Limits and opportunities of risk analysis application in railway systems. *Transactions on The Built Environment*. 2013. Vol. 134. P. 133–144. DOI: <https://doi.org/10.2495/SAFE130131>
20. Mo Y., ZhongmF., Liu H., Yang Q., Cui G. Efficient ordering heuristics in binary decision diagram-based fault tree analysis. *Quality and Reliability Engineering International*. 2013. Vol. 29. Iss. 3. P. 307–315. DOI: <https://doi.org/10.1002/qre.1382>
21. Muradian L. A. Probabilistic-physical approach to describe and determine the reliability of cars. *Science and Transport Progress*. 2016. № 5 (65). P. 168–177. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2016/84082>
22. Peng Z., Lu Y., Miller A., Johnson C., Zhao T. Risk assessment of railway transportation systems using timed fault trees. *Quality and Reliability Engineering International*. 2016. Vol. 32. Iss. 1. P. 181–194. DOI: <https://doi.org/10.1002/qre.1738>
23. Reidemeister O. G., Shykunov O. A. Sensitivity of stresses to the forces acting on the cast parts of freight-car bogie. *Science and Transport Progress*. 2018. № 4 (76). P. 125–133. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/141186>
24. Shaposhnyk V. Y. Human factor influence on performing technical maintenance and repair of freight cars. *Science and Transport Progress*. 2018. № 6 (78). P. 165–175. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/154031>
25. Shykunov O. A. Three-element bogie side frame strength. *Science and Transport Progress*. 2017. № 1 (67). P. 183–193. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2017/92535>
26. Smoczyński P., Kadziński A. Introduction to the risk management in the maintenance of railway tracks. *Journal of mechanical and transport engineering*. 2016. Vol. 68, № 4. P. 65–80. DOI: <https://doi.org/10.21008/j.2449-920X.2016.68.4.06>

L. A. MURADIAN^{1*}, I. V. PITSENKO^{2*}, V. Y. SHAPOSHNYK^{3*}

^{1*}Dep. «Cars and Car Facilities», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 19, e-mail leontymuradian@gmail.com, ORCID 0000-0003-1781-4580

^{2*}Dep. «Cars and Car Facilities», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 19, e-mail irinapit95@gmail.com, ORCID 0000-0002-5674-0337

^{3*}Dep. «Cars and Car Facilities», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 19, e-mail vladislav.sh91@gmail.com, ORCID 0000-0003-4701-6491

Mathematical Model of Risks in Railway Transport During Diagnostics of Axle Boxes of Freight Cars

Purpose. The research is aimed at developing a mathematical model for determining the risks in railway transport during the diagnostics of axle boxes of freight cars, which will provide an assessment of traffic safety in the case of freight transportations. **Methodology.** To develop a mathematical model for determining the risks in railway transport, a continuous static model of the dependence of the level of individual approach of service personnel on the level of common interests (crew, shift) was used. Three types of dependencies were considered: optimistic, neutral, pessimistic. **Findings.** A mathematical model has been developed that allows assessing the risks and the level of train traffic safety during the diagnosis of axle boxes of freight cars, as well as determining further measures to reduce risks. In the process of assessing the level of individual approaches and general interests of a particular railway subdivision during maintenance and repair of the axle box of freight cars the variants for the limit possibilities of this subdivision were considered. At the same time extreme values for equilibrium distribution, for a case of dominance of maintenance and for a case of dominance of repairs of freight car's axle box were established. **Originality.** For the first time, a mathematical model of risks in railway transport was developed, which is formed during the maintenance and repair of freight cars. It allows determining the level of traffic safety during freight transportations and outlining further measures to reduce risks. The method of studying the efficiency of the system of maintenance and repair of the axle box has been further developed, which, in contrast to the existing one, establishes the dependence of the number of maintenance of axle boxes on the number of their repairs in operation and will

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

increase traffic safety. **Practical value.** The application of the obtained mathematical models of risks in railway transport can reduce the risks during the diagnostics of axle boxes of freight cars in order to increase the local or general level of train traffic safety.

Keywords: train traffic safety; risk; axle box; diagnostics; freight cars; railway transport

REFERENCES

1. Adadurov, A. S., & Romanova, A. A. (2019). Validation criteria of cargo wagon's axle box diagnostic results by acoustic method. *Transport of the Russian Federation*, 5(84), 57-61. (in Russian)
2. Muradian, L. A., Shaposhnyk, V. Y., & Mischenko, A. A. (2016). Methodological Fundamentals of Determination of Unpowered Rolling Stock Maintenance Characteristics. *Science and Transport Progress*, 1(61), 169-179. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2016/61044> (in Russian)
3. Muradyan, L. A., Shaposhnik, V. Yu., & Pitsenko, I. V. (2016). Perspektivy ekspluatatsii litykh koles na zheleznykh dorogakh Ukrainy. *Vagonnii park*, 9-10(114-115), 38-41. (in Russian)
4. Muradyan, L. A., Shaposhnik, V. Yu., & Podosenov, D. A. (2016). Improving the reliability of freight wagons with the use of new manufacturing technologies and regeneration of working surfaces. *Electromagnetic compatibility and safety on railway transport*, 11, 49-54. (in Russian)
5. Myamlin, S. V., & Muradian, L. A. (2015). Application of the fundamental laws of distribution of random variables to determine the parameters of reliability of cars. *Transport Systems and Technologies: Collection of scientific works of the State University of Infrastructure and Technologies*, 26, 172-180. (in Ukrainian)
6. Potapenko, O., & Mogila, V. (2019). Perspective design of spring suspension of the cart of the freight wagon and the results of its study. *Visnik of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National University*, 3(251), 144-150. (in Ukrainian)
7. Ustich, P. A., Karpychev, V. A., & Ovechnikov, M. N. (2004). *Nadezhnost relsovogo netyagovogo podvizhnogo sostava*. Moscow: UMTs MPS Rossii. (in Russian)
8. Shvets, A. O. (2020). Stability of freight cars under the action of compressive longitudinal forces. *Science and Transport Progress*, 1(85), 119-137. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2020/199485> (in Ukrainian)
9. An, M., Lin, W., & Huang, S. (2013). An Intelligent Railway Safety Risk Assessment Support System for Railway Operation and Maintenance Analysis. *The Open Transportation Journal*, 7, 27-42. DOI: <https://doi.org/10.2174/1874447801307010027> (in English)
10. COMMISSION IMPLEMENTING REGULATION (EU) No 402/2013 of 30 April 2013 on the common safety method for risk evaluation and assessment and repealing Regulation (EC) No 352/2009. *Official Journal of the European Union*. Retrieved from <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=celex:32013R0402> (in English)
11. Figueres, E. M., Hughes, P., & Gulijk, C. (2016). Big Data for Risk Analysis: the future of safe railways. *XII Congreso de Ingeniería del Transporte (CIT 2016)* (pp. 347-353), Universitat Politècnica de València, Spain. DOI: <https://doi.org/10.4995/CIT2016.2016.1825> (in English)
12. Hadj-Mabrouk, H. (2019). Contribution of Artificial Intelligence to Risk Assessment of Railway Accidents. *Urban Rail Transit*, 5(2), 104-122. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40864-019-0102-3> (in English)
13. Houdijk, R. M. (2016). Rail transport of hazardous substances from the perspective of 'all hazard' risk management. *Chemical engineering transactions*, 48, 949-954. (in English)
14. Huang, H.-Z., Zhang, H., & Li, Y. (2011). A New Ordering Method of Basic Events in Fault Tree Analysis. *Quality and Reliability Engineering International*, 28(3), 297-305. DOI: <https://doi.org/10.1002/qre.1245> (in English)
15. Johansen, S. (1991). Estimation and hypothesis testing of cointegration vectors in the presence of linear trend. *Econometrica*, 59(6), 1551-1580. (in English)
16. Leitner, B. (2017). A general model for railway systems risk assessment with the use of railway accident scenarios analysis. *Procedia Engineering*, 187, 150-159. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.361> (in English)
17. Lingaitis, L. P., Mjamlin, S., Baranovsky, D., & Jastremskas, V. (2012). Prediction methodology of durability of locomotives diesel engines. *Ekspluatacija i Niezawodnosc-Maintenance and Reliability*, 14(2), 154-159. (in English)
18. Lingaitis, L. P., Mjamlin, S., Baranovsky, D., & Jastremskas, V. (2012). Experimental Investigations on Operational Reliability of Diesel Locomotives Engines. *Ekspluatacija i Niezawodnosc-Maintenance and Reliability*, 14(1), 5-10. (in English)

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

19. Licciardello, R., Baldassarra, A., Vitali, P., Tieri, A., Cruciani, M., & Vasile A. N. (2013). Limits and opportunities of risk analysis application in railway systems. *Transactions on The Built Environment*, 134, 133-144. DOI: <https://doi.org/10.2495/SAFE130131> (in English)
20. Mo, Y., Zhong, F., Liu, H., Yang, Q., & Cui, G. (2012). Efficient Ordering Heuristics in Binary Decision Diagram-based Fault Tree Analysis. *Quality and Reliability Engineering International*, 29(3), 307-315. DOI: <https://doi.org/10.1002/qre.1382> (in English)
21. Muradian, L. A. (2016). Probabilistic-physical approach to describe and determine the reliability of cars. *Science and Transport Progress*, 5(65), 168-177. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2016/84082> (in English)
22. Peng, Z., Lu, Y., Miller, A., Johnson, C., & Zhao, T. (2014). Risk assessment of railway transportation systems using timed fault trees. *Quality and Reliability Engineering International*, 32(1), 181-194. DOI: <https://doi.org/10.1002/qre.1738> (in English)
23. Reidemeister, O. G., & Shykunov, O. A. (2018). Sensitivity of stresses to the forces acting on the cast parts of freight-car bogie. *Science and Transport Progress*, 4(76), 125-133. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/141186> (in English)
24. Shaposhnyk, V. Y. (2019). Human factor influence on performing technical maintenance and repair of freight cars. *Science and Transport Progress*, 6(78), 165-175. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/154031> (in English)
25. Shykunov, O. (2017). Three-element bogie side frame strength. *Science and Transport Progress*, 1(67), 183-193. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2017/92535> (in English)
26. Smoczyński, P., & Kadziński, A. (2016). Introduction to the risk management in the maintenance of railway tracks. *Journal of Mechanical and Transport Engineering*, 68(4), 65-80. DOI: <https://doi.org/10.21008/j.2449-920X.2016.68.4.06> (in English)

Надійшла до редколегії: 12.10.2020

Прийнята до друку: 11.02.2021