

УДК 629.454.2

ДО ПИТАННЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ВІДМОВ БУКС ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ

Д-р техн. наук І. Е. Мартинов, канд. техн. наук А. В. Труфанова,
аспіранти О. М. Литовченко, Д. В. Фрейліх

ON THE ISSUE OF FORECASTING FAILURES OF FREIGHT WAGON AXLE BOXES

Dr. Sc. I. Martynov, PhD (Tech.) A. Trufanova,
postgraduate student O. Lytovchenko, postgraduate student D. Freilih

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.212.2025.336478>



Анотація. У статті розглянуто розподіл відчеплень вантажних вагонів через відмови роликів букс протягом календарного року. Доведено, що кількість розподілу відчеплень необхідно розглядати як випадкову величину, яка в часі може бути передбачена за допомогою функції, що зумовлює вплив тенденції, сезонності та випадковості. Визначено основні тенденції їхнього розвитку.

Для аналізу використано метод часових рядів. На підставі статистичних даних про відмови буксових вузлів на залізницях України запропоновано модель прогнозу відчеплень вантажних вагонів щодо нагрівання буксового вузла. Отримані результати можуть бути використані як обґрунтування необхідних обсягів справних колісних пар на ПТО для організації своєчасного ремонту вагонів.

Ключові слова: вантажний вагон, буксовий вузол, відмова, прогнозування, сезонні коливання.

Abstract. The article examines the distribution of freight car uncouplings due to roller bearing failures over the course of a calendar year. Data on car uncouplings from 2017 to 2023 have been analyzed. It was established that the number of freight car uncouplings caused by bearing unit overheating has an uneven structure throughout the year, with seasonal fluctuations observed.

It has been proven that the distribution of uncoupling events should be considered a random variable that can be predicted over time using a function influenced by trends, seasonality, and randomness. The main trends in their development have been identified.

For the analysis, the time series method was used, which makes it possible to characterize the patterns of change in the phenomenon over time. Based on time series over several years—broken down monthly or quarterly—seasonal fluctuations can be observed. These fluctuations are characterized by regular intra-annual repetitions in level changes from month to month (or quarter to quarter).

A multiplicative model is proposed, where the value of the dynamic series is presented as the product of components depending on the theoretical levels of the dynamic series, seasonal coefficients, and random influences.

Smoothing of the series levels was performed using the moving average method, with a smoothing period of one year.

Based on statistical data on bearing unit failures on Ukrainian railways, a predictive model for freight car uncouplings due to bearing unit overheating is proposed. The obtained results can be used as justification for the required number of serviceable wheelsets at inspection and repair points (PTO) to ensure timely maintenance of freight cars.

Keywords: freight car, axle boxes, failure, forecasting, seasonal fluctuations.

Вступ. Залізниці України з моменту їх утворення виконують переважну частину вантажообігу у промисловому комплексі країни. Особливо важлива їхня роль у перевезенні сировини та продукції металургійної промисловості, а також продукції сільського господарства. Але переважна більшість вантажних вагонів уже вичерпала свій ресурс. Вагонний парк потребує масштабного оновлення. Тому перед вагонобудівниками постає завдання розроблення нових інноваційних технічних рішень у конструкціях рухомого складу.

Вагон є складною технічною системою, яка у свою чергу складається з ряду підсистем. Серед останніх необхідно виділити ходові частини, які працюють у надважких умовах. Тому надійній роботі ходових частин і їхніх елементів завжди приділяли особливу увагу. Це повною мірою стосується буксових вузлів вагонів.

Як вантажні, так і пасажирські вагони на залізницях України вже кілька десятиріч обладнані буксовими вузлами з двома циліндричними роликовими підшипниками [1, 3]. Але їхня надійність недостатня для забезпечення руху. Так, на залізницях України у вантажних вагонів під час руху на шляху прямування до 70 % відчеплень через відмови різних елементів конструкції були викликані саме відмовами та надмірним нагріванням роликових букс [3]. Крім того,

тисячі випадків відмов буксових вузлів вагонів виявляють засобами дистанційного контролю під час руху або оглядачами вагонів.

Момент виникнення відмови (нагрівання) буксового вузла є випадковою подією, тому що спричиняє затримку поїзда на шляху прямування. Це викликає затримку поїзда та економічні збитки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. З моменту початку впровадження роликових букс у вантажних вагонах науковці та фахівці вагонного господарства розпочали спостереження за експлуатацією їх. Аналіз перших результатів дав змогу визначитися з основними причинами відмов [4, 5] і напрямами удосконалення конструкції. Зусилля фахівців були зосереджені на виборі раціональних значень радіальних та осьових зазорів у підшипниках, покращенні технологій проведення монтувально-демонтувальних робіт, удосконаленні конструкції самих підшипників (виготовлення бортів не перпендикулярно до поверхні кочення, а під деяким нахилом, використання поліпшених марок сталей) [6, 7]. Ряд досліджень присвячені підвищенню надійності торцевого кріплення [8, 9]. Автори дослідження [10] пропонують використовувати в циліндричних роликових підшипниках

поліамідний сепаратор удосконаленої конструкції з підвищеною міцністю.

Спостереження за результатами експлуатації буксових вузлів із циліндричними підшипниками були продовжені фахівцями УкрДУЗТ [11-15]. Проведений аналіз засвідчив, що частка відмов роликів букс вагонів зменшується в абсолютних значеннях. Але, якщо враховувати зменшення вантажообігу та кількість вагонів у робочому парку, надійність буксових вузлів залишається практично незмінною та потребує підвищення.

Подібний аналіз був проведений у дослідженнях [16-19]. Автори детально аналізують причини відмов буксових підшипників вантажних вагонів і пропонують заходи з їх усунення.

Очевидно, що кількість наукових робіт, присвячених аналізу різних аспектів експлуатації та надійності буксових вузлів із циліндричними роликівими підшипниками, досить значна. Лише у статтях [6, 7] зазначено, що переважна більшість відмов роликів букс відбувається в період із листопада по березень. Очевидно, що питання розподілу відмов роликів букс з урахуванням часу використання залишилося поза увагою дослідників.

Мета і завдання дослідження. Метою статті є розроблення методики прогнозування кількості відмов вантажних вагонів, пов'язаних із нагріванням буксового вузла протягом року, на основі застосування методу сезонної декомпозиції випадкової величини.

Основна частина дослідження. Прогнозування – це оцінювання майбутнього з урахуванням глибокого аналізу тенденцій розвитку явищ і його взаємозв'язків. Процес прогнозування передбачає виявлення можливих альтернатив розвитку в перспективі для обґрунтованого їх вибору та ухвалення оптимального рішення.

Прогнозують з урахуванням використання широкого спектра інформації.

Але вихідний етап прогнозування завжди пов'язаний з аналізом часових рядів, щоб охарактеризувати закономірність зміни явища в часі. За часовими рядами за кілька років у помісячному чи поквартальному розрізі можна спостерігати сезонні коливання.

Сезонні коливання – це різновид періодичних коливань. Їм притаманні характерні внутрішньорічні повторювання з місяця на місяць (із кварталу на квартал), зміни в рівнях. Іншими словами, сезонні коливання – регулярні підйоми, що повторюються, і зниження рівнів динамічного ряду всередині року протягом року років.

Рівень часового ряду доцільно розглядати як функцію тенденції, сезонності та випадковості. Відповідно за мультиплікативної моделі рівень динамічного ряду можна подати як

$$Z_i = Z_t \times K_c \times K_{\text{вип}}, \quad (1)$$

де Z_i – фактичні значення рівнів динамічного ряду;

Z_t – теоретичні значення рівнів динамічного ряду;

K_c – коефіцієнт сезонності;

$K_{\text{вип}}$ – коефіцієнт впливу випадковості.

Вихідні дані за роками подані в табл. 1.

Зважаючи на те, що сезонність характеризує внутрішньорічні коливання зі згладжуванням рівнів ряду (z_i) методом ковзної середньої, період ковзання має дорівнювати року. Тоді вдасться погасити вплив сезонності. Для випадку, коли рік сприймають як 12-місячний період, це означає, що згладжування низки має бути проведено дванадцятичленною ковзною середньою. Іншими словами, ковзну середню визначають за виразом

$$\bar{z}_i = \frac{1}{12} \sum z_{12} . \quad (2)$$

Таблиця 1

Вихідні дані для прогнозування за роками

Місяць	Рік					$\bar{z}_{si} = \frac{1}{n} \sum z_{ij}$
	1	2	.....	n-1	n	
1	z_{11}	z_{12}	.....	z_{1n-1}	z_{1n}	$\bar{z}_{s1}$
2	z_{21}	z_{22}	.....	z_{2n-1}	z_{2n}	$\bar{z}_{s2}$
3	z_{31}	z	.....	z_{3n-1}	z_{3n}	$\bar{z}_{s3}$
4	z_{41}	z_{42}	.....	z_{4n-1}	z_{4n}	$\bar{z}_{s4}$
5	z_{51}	z	.....	z_{5n-1}	z_{5n}	$\bar{z}_{s5}$
6	z_{61}	z_{62}	.....	z_{6n-1}	z_{6n}	$\bar{z}_{s6}$
7	z_{71}	z	.....	z_{7n-1}	z_{7n}	$\bar{z}_{s7}$
8	z_{81}	z_{82}	.....	z_{8n-1}	z_{8n}	$\bar{z}_{s8}$
9	z_{91}	z_{92}	.....	z_{9n-1}	z_{9n}	$\bar{z}_{s9}$
10	z_{101}	z_{102}	.....	z_{10n-1}	z_{10n}	$\bar{z}_{s10}$
11	z_{111}	z_{112}	.....	z_{11n-1}	z_{11n}	$\bar{z}_{s11}$
12	z_{121}	z_{122}	.....	z_{12n-1}	z_{12n}	$\bar{z}_{s12}$
Разом	$\sum z_i$	$\sum z_i$	$\sum z_i$	$\sum z_i$	$\sum z_i$	$\bar{z} = \frac{1}{n} \sum \bar{z}_{si}$

Згладжені рівні ($\bar{z}_i$) характеризують рух кількості відчеплень вагонів, у якому погашено вплив сезонності. Слід вимірювати сезонність у вигляді абсолютної величини $S_i = z_i - \bar{z}_i$ і коефіцієнта сезонності $K_{S_i} = z_i / \bar{z}_i$. Оскільки аналізують дані протягом ряду років, на кожен вагон за період року припадає кілька коефіцієнтів сезонності (табл. 2). Тому розраховують середні показники сезонності як

$$\bar{K}_j = \frac{1}{n} \sum K_{S_i} . \quad (3)$$

Сезонні коливання взаємно погашаються протягом року. Тому сума

коефіцієнтів (для 12-місячної моделі) дорівнює 12. За практичних розрахунків ця рівність може бути незначно порушена. Тому корегують сезонну компоненту.

Видалення сезонності дає змогу отримати більш чітку картину тенденції. Щоб видалити сезонну компоненту, необхідно поділити фактичний рівень коефіцієнта сезонності. Отже, отримують значення рівнів ряду, зумовлені тенденцією разом із випадковою складовою.

Далі проводять аналітичне вирівнювання цих даних і отримують рівняння тренду – більш чіткий опис власне тенденції низки з елімінуванням як сезонності, так і випадкової складової.

Таблиця 2

Порядок визначення коефіцієнтів сезонності

Місяць	Рік					$\bar{K}_j = \frac{1}{n} \sum \frac{z_i}{\check{z}_i}$
	1	2	.....	$n-1$	n	
1	-	$z_{12}/\check{z}_{12}$	.....	$z_{1n-1}/\check{z}_{1n-1}$	$z_{1n}/\check{z}_{1n}$	$\bar{K}_1$
2	-	$z_{22}/\check{z}_{22}$	.....	$z_{2n-1}/\check{z}_{2n-1}$	$z_{2n}/\check{z}_{2n}$	$\bar{K}_2$
3	-	$z_{32}/\check{z}_{32}$	.....	$z_{3n-1}/\check{z}_{3n-1}$	$z_{3n}/\check{z}_{3n}$	$\bar{K}_3$
4	-	$z_{42}/\check{z}_{42}$	.....	$z_{4n-1}/\check{z}_{4n-1}$	$z_{4n}/\check{z}_{4n}$	$\bar{K}_4$
5	-	$z_{52}/\check{z}_{52}$	.....	$z_{5n-1}/\check{z}_{5n-1}$	$z_{5n}/\check{z}_{5n}$	$\bar{K}_5$
6	-	$z_{62}/\check{z}_{62}$	.....	$z_{6n-1}/\check{z}_{6n-1}$	$z_{6n}/\check{z}_{6n}$	$\bar{K}_6$
7	$z_{71}/\check{z}_{71}$	$z_{72}/\check{z}_{72}$	.....	$z_{7n-1}/\check{z}_{7n-1}$	-	$\bar{K}_7$
8	$z_{81}/\check{z}_{81}$	$z_{82}/\check{z}_{82}$	.....	$z_{8n-1}/\check{z}_{8n-1}$	-	$\bar{K}_8$
9	$z_{91}/\check{z}_{91}$	$z_{92}/\check{z}_{92}$	.....	$z_{9n-1}/\check{z}_{9n-1}$	-	$\bar{K}_9$
10	$z_{101}/\check{z}_{101}$	$z_{102}/\check{z}_{102}$	.....	$z_{10n-1}/\check{z}_{10n-1}$	-	$\bar{K}_{10}$
11	$z_{111}/\check{z}_{111}$	$z_{112}/\check{z}_{112}$	.....	$z_{11n-1}/\check{z}_{11n-1}$	-	$\bar{K}_{11}$
12	$z_{121}/\check{z}_{121}$	$z_{122}/\check{z}_{122}$	.....	$z_{12n-1}/\check{z}_{12n-1}$	-	$\bar{K}_{12}$
Разом						$\sum K_i = 12$

Використовуючи потім рівняння тренду для прогнозування, включаємо в прогнозування показник сезонності, тобто сумарно прогнозуємо тренд з урахуванням сезонної складової. Отже, за рівнянням тренду знаходимо теоретичні рівні динамічного ряду, зумовлені впливом тенденції, і далі визначаємо тренд з урахуванням сезонної компоненти:

$$z_s = \check{z}_s \cdot K_j \quad (4)$$

Порядок знаходження коефіцієнтів випадковості подано в табл. 3.

Відповідно, урахуовуючи вищевикладені положення, формулу (1) можна подати як

$$Z_i = Z_t \times \bar{K}_c \times \bar{E}_i \times \bar{L}_j, \quad (5)$$

де Z_i – фактичні рівні динамічного ряду;

Z_t – теоретичні значення рівнів динамічного ряду;

$\bar{K}_c$ – коефіцієнт сезонності;

$\bar{E}_i$ – коефіцієнт впливу випадковості;

$\bar{L}_j$ – середнє значення коефіцієнта впливу тенденції.

На залізницях України у вагонному господарстві в найбільш несприятливі роки кількість відчеплень вантажних вагонів через відмови роликівих букс досягала 51,2 % із загальної кількості відчеплень через технічні несправності. Переважна більшість несправностей буксового вузла пов'язана з підвищенням його нагрівання з різною інтенсивністю.

Контроль стану буксових вузлів в експлуатації проводять візуально на пунктах технічного обслуговування оглядачі вагонів, а на перегонах і підходах до пунктів технічного обслуговування (ПТО) – за допомогою підлогових безконтактних засобів теплового контролю інфрачервоного випромінювання від букс поїздів, що проходять. Фактично КТСМ

(АСДК) є основними апаратними засобами контролю буксових вузлів на залізницях.

Дані системи контролю технічного стану рухомого складу дають змогу своєчасно виявляти несправності ходових частин рухомого складу, що з'являються в процесі експлуатації, і тим самим попереджати виникнення незворотних відмов, здатних призвести до аварій і катастроф.

Проаналізовано інформацію про розподіл кількості відчеплень вагонів із

2017 по 2023 рр., внаслідок чого встановлено, що кількість відчеплень вантажних вагонів через нагрівання буксового вузла має нерівномірну структуру розподілу за сезонами року або, іншими словами, сезонні коливання, а також тенденцію розвитку.

Залежність зміни кількості відчеплень через відмови роликів букс наведена на рис. 1.

Таблиця 3

Порядок знаходження коефіцієнтів випадковості

Місяць	Рік					$\bar{E}_j = \frac{1}{n} \sum \frac{z_i}{z_s}$
	1	2	.....	$n-1$	n	
1	z_{11}/z_s	z_{12}/z_s	.....	z_{1n-1}/z_s	z_{1n}/z_s	$\bar{E}_1$
2	z_{21}/z_s	z_{22}/z_s	.....	z_{2n-1}/z_s	z_{2n}/z_s	$\bar{E}_2$
3	z_{31}/z_s	z_{32}/z_s	.....	z_{3n-1}/z_s	z_{3n}/z_s	$\bar{E}_3$
4	z_{41}/z_s	z_{42}/z_s	.....	z_{4n-1}/z_s	z_{4n}/z_s	$\bar{E}_4$
5	z_{51}/z_s	z_{52}/z_s	.....	z_{5n-1}/z_s	z_{5n}/z_s	$\bar{E}_5$
6	z_{61}/z_s	z_{62}/z_s	.....	z_{6n-1}/z_s	z_{6n}/z_s	$\bar{E}_6$
7	z_{71}/z_s	z_{72}/z_s	.....	z_{7n-1}/z_s	z_{7n}/z_s	$\bar{E}_7$
8	z_{81}/z_s	z_{82}/z_s	.....	z_{8n-1}/z_s	z_{8n}/z_s	$\bar{E}_8$
9	z_{91}/z_s	z_{92}/z_s	.....	z_{9n-1}/z_s	z_{9n}/z_s	$\bar{E}_9$
10	z_{101}/z_s	z_{102}/z_s	.....	z_{10n-1}/z_s	z_{10n}/z_s	$\bar{E}_{10}$
11	z_{111}/z_s	z_{112}/z_s	.....	z_{11n-1}/z_s	z_{11n}/z_s	$\bar{E}_{11}$
12	z_{121}/z_s	z_{122}/z_s	.....	z_{12n-1}/z_s	z_{12n}/z_s	$\bar{E}_{12}$
Разом	$\bar{F}_1$	$\bar{F}_2$		$\bar{F}_{n-1}$	$\bar{F}_n$	$\bar{L} = \frac{1}{n} \sum \bar{E}_j = \frac{1}{12} \sum \bar{F}_n$

На рис. 2. подані результати згладжування динамічного ряду методом ковзної середньої порівняно з апроксимуючою кривою. Ці дані визначають загальну тенденцію поведінки

випадкової величини. Очевидно, що теоретична крива незначно відрізняється від емпіричної кривої.

Рівняння теоретичної апроксимуючої кривої має такий вигляд:

$$V(t) = -0,00006t^4 + 0,0128t^3 - 0,8435t^2 + 17,619t + 159,55. \quad (4)$$

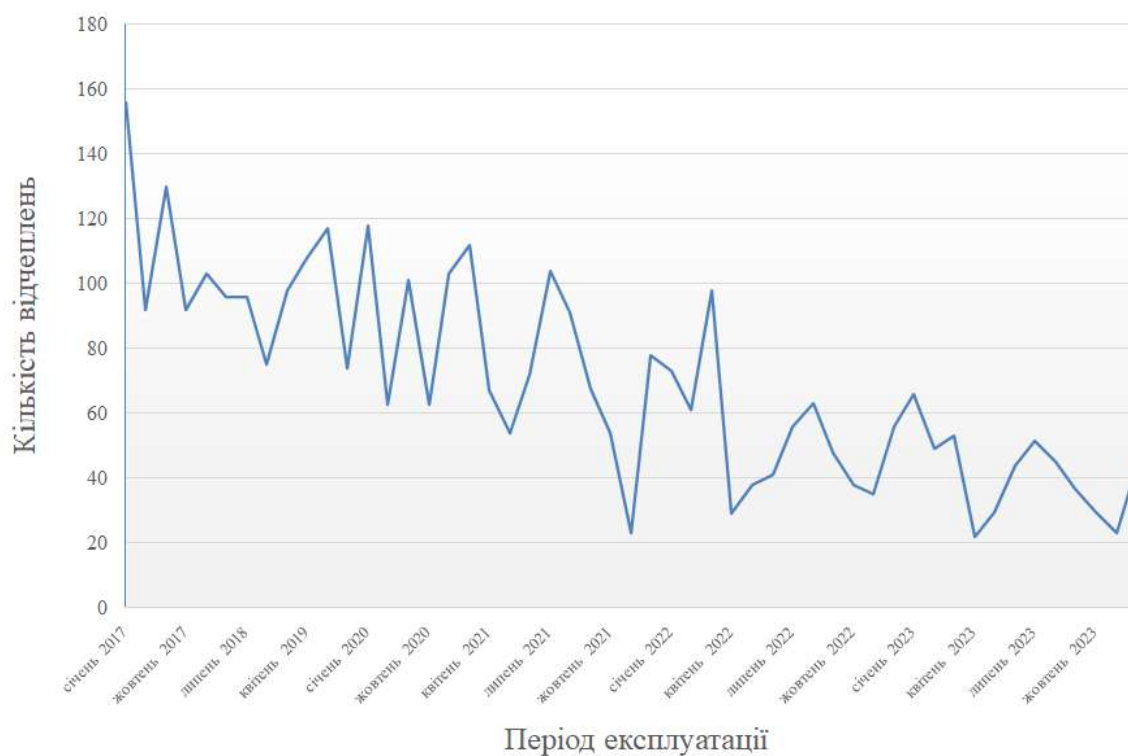


Рис. 1. Динамічний часовий ряд відчеплень вантажних вагонів через нагрівання буксових вузлів

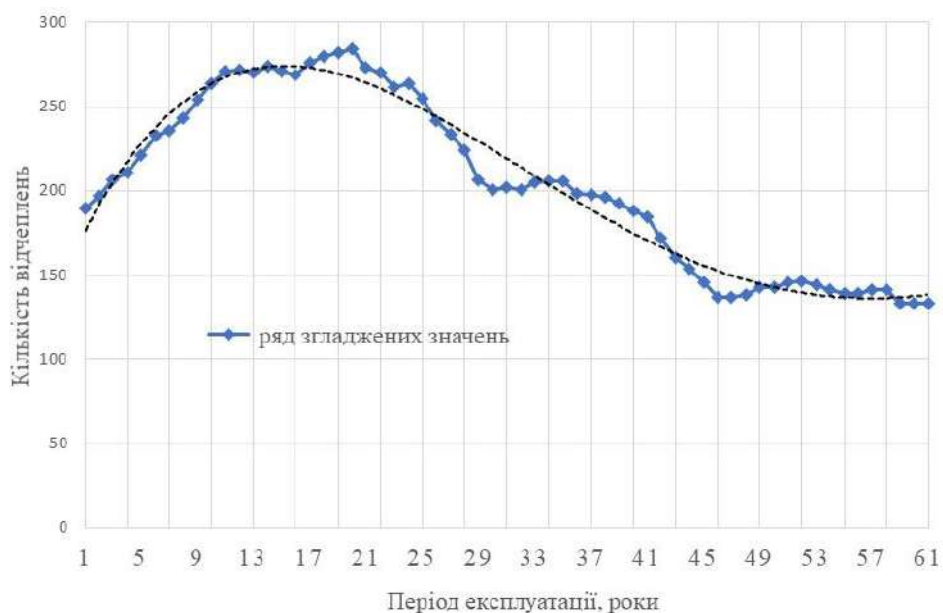


Рис. 2. Фактичний ряд згладжених значень відчеплень вагонів через відмови роликів букс порівняно з теоретичною кривою

У табл. 4 наведені значення коефіцієнтів сезонності. Результати прогнозування подано на рис. 3.

Таблиця 4

Значення коефіцієнтів сезонності

	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	Середній показник сезонності
Січень		0,9101	1,0118	1,2124	1,268	1,157	1,4175	1,1628
Лютий		1,1419	1,2372	1,0105	0,945	1,0322	1,0597	1,0711
Березень		1,5538	1,25788	1,4906	1,3788	1,7265	1,1846	1,4320
Квітень		0,9401	1,0499	0,6864	0,8342	0,5258	0,5023	0,7548
Травень		0,8838	0,8672	0,6091	0,6766	0,7054	0,6818	0,7373
Червень		0,9930	1,0117	0,9957	0,9361	0,7478	1,0469	0,9552
Липень	1,0162	0,9735	1,1114	1,1559	1,3836	1,0567		1,1359
Серпень	1,2225	0,7943	1,2623	1,0914	1,2523	1,2019		1,1375
Вересень	0,9579	0,9021	0,89969	0,9269	0,9436	0,9335		0,9273
Жовтень	0,8010	0,7878	0,7012	0,7654	0,7675	0,7965		0,7692
Листопад	0,6767	0,6861	0,7666	0,665	0,3433	0,7433		0,6469
Грудень	1,0208	1,0906	1,1231	1,1991	1,1876	1,2077		1,1382

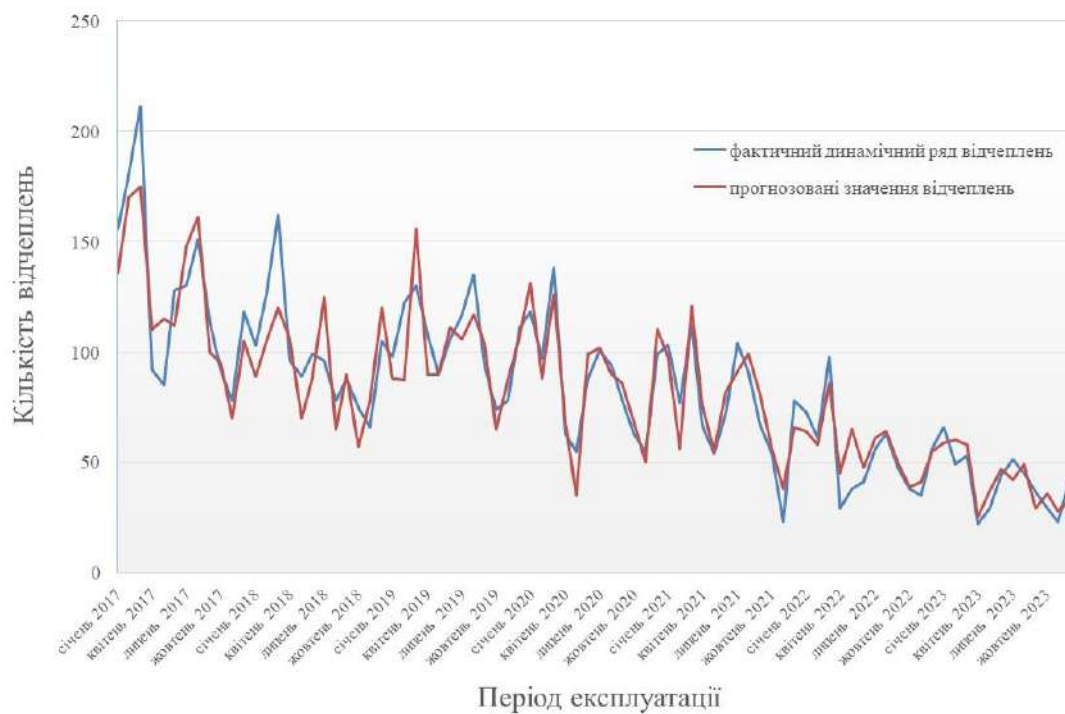


Рис. 3. Фактичний динамічний часовий ряд відчеплень вантажних вагонів через нагрівання буксових вузлів порівняно з прогнозованим рядом відчеплень

Очевидно, що отримана модель вдало описує фактичні рівні вихідного динамічного ряду.

Висновки.

1. Систематизовано дані про розподіл кількості відчеплень вантажних вагонів через надмірне нагрівання буксових вузлів за період 2017-2023 рр.

2. Запропоновано модель прогнозування випадкової величини кількості відчеплень вантажних вагонів через надмірне нагрівання буксових вузлів з урахуванням впливу тенденції, сезонності та випадковості.

3. Показано, що кількість відчеплень вантажних вагонів через нагрівання буксових вузлів можна розглядати як випадкову величину, яка в часі може бути передбачена за допомогою функції, що зумовлює вплив тенденції, сезонності та випадковості.

4. Запропонована математична модель прогнозування кількості відчеплень вантажних вагонів через нагрівання буксових вузлів може бути використана для забезпечення постачання необхідної кількості колісних пар на ПТО для організації своєчасного ремонту вагонів.

Список використаних джерел

1. Мартинов І. Е., Труфанова А. В. Сафронов О. М. Roller bearings of axle boxes of wagons: design and calculations. Кременчук, 2022.
2. Петров В. А., Амелина А. А. Анализ выбора и пути развития конструкций буксового узла для оборудования вагонов магистральных железных дорог СССР. *Труды ВЗИИТа*. 1984. Вып. 122. С. 4-25.
3. Гайдамака А. В. Надійність циліндричних роликподшипників букс вагонів і локомотивів. *Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп.* Харків: УкрДАЗТ, 2013. Вип. 139. С. 103-111.
4. Прилепов Н. Н., Петров В. А. Что показал анализ отказов подшипников качения. *Железнодорожный транспорт*. 1976. № 4. С. 55-57.
5. Цюренко В. Н. Опыт эксплуатации вагонов с буксовыми узлами на подшипниках качения. *Труды ВНИИЖТ*. Москва, 1982. Вып. 654. С. 4-26.
6. Шавшишвили А. Д. Анализ опыта эксплуатации вагонных букс с роликовыми подшипниками / Ростовский институт инженеров железнодорожного транспорта. *Межвуз. темат. сб.* Ростов-на-Дону, 1982. № 167. С. 13-18.
7. Цюренко В. Н., Петров В. А. Надежность роликовых подшипников в буксах вагонов. Москва: Транспорт, 1982. 96 с.
8. Борзилов И. Д., Гапий В. З., Алексеев Ю. А. Распределение нагрузки по виткам резьбовых соединений осевого крепления букс вагонов. Харьковский институт инженеров железнодорожного транспорта. *Межвуз. сб. науч. тр.* Харьков, 1987. Вып. 3. С. 15-17.
9. Борзилов И. Д., Гайдамака А. В., Федорец Е. В. О возможности повышения эксплуатационной надежности торцового крепления букс с роликовыми подшипниками. Ростовский институт инженеров железнодорожного транспорта. *Межвуз. темат. сб.* Ростов-на-Дону, 1982. Вып. 167. С. 66-69.
10. Андриевский В. Г. Буксовый роликподшипник повышенной надежности. *Залізничний транспорт України*. 1998. № 1. С. 62-65.
11. Мартынов И. Э. Анализ опыта эксплуатации цилиндрических роликподшипников букс грузовых вагонов. *Вісник Східноукраїнського державного університету*. 2000. №5 (27). С. 157-159.

12. Мартинов І. Е., Труфанова А. В., Ильчишин В. М. До питання оцінки надійності буксових вузлів критичних вантажних вагонів. *Зб. наук. праць ХарДАЗТ*. Харків: ХарДАЗТ, 2013. Вип. 143. С. 69-74.
13. Пути повышения безопасности движения в вагонном хозяйстве / В. Н. Самсонкин, Н. Е. Вещева, А. В. Труфанова, А. Ф. Гаврилюк. *Восточноукраинский журнал передовых технологий*. 2003. № 5. С. 30-32.
14. Мартинов І. Е. До питання оцінки надійності буксових вузлів критичних універсальних вагонів. *Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп.* Харків, 2014. Вип. 143. С. 69–74.
15. До питання забезпечення працездатності буксових вузлів вантажних вагонів / І. Е. Мартинов, А. В. Труфанова, В. О. Шовкун та ін. *Комунальне господарство міст: наук.-техн. зб. Серія: технічні науки та архітектура*. 2024. Т. 4, вип. 185. С. 228-234.
16. Аширбаев Г. К., Утепова А. У., Аширбаева И. А. Повышение надежности буксовых узлов колесных пар железнодорожных вагонов. *Вестник КазАТК*. 2021. № 2 (117). С. 7-12.
17. Analysis of failures of bearings of axle box unit with polyamide cages and prospects of increasing their service life / D. V. Butorin, N. G. Filippenko, A. V. Livshits, S. I. Popov. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region (SibTrans-2019)*. 2019. Vol. 760. P. 1-10.
18. Failures of bearings and axles in railway freight wagons / V. Gerdun, T. Sedmak, V. Sinkovec, I. Kovse, B. Cene. *Engineering Failure Analysis*. 2007. Vol. 14(5). P. 884-894.
19. Hermnio M. Analysis of failures of rolling stock railways rolling bearings. Fernandes Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Dissertation in Mestrado Integrado em Engenharia Mecanica. 2017. 107 с.

Мартинов Ігор Ернстович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-0481-3514>. Тел.: 057 730-10-36. E-mail: martinov.hiit@gmail.com.

Труфанова Альона Володимирівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-1702-1054>. Тел.: +38 (050) 520-17-81. E-mail: alena.hiit.vagons@gmail.com.

Литовченко Олександр Миколайович, аспірант кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-1702-1054>. Тел.: +38 050 161-18-48. E-mail: rokada_t@ukr.net.

Фрейліх Денис Вікторович, аспірант кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0002-0797-4513>. Тел.: +38 057 265-48-67. E-mail: rokada_t@ukr.net.

Martynov Igor, Dr. Sc. (Tech). Professor, head department of wagons engineering and product quality, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-0481-3514>. Tel. (057) 730-10-36. E-mail: martinov.hiit@gmail.com.

Trufanova Alena, Associate Professor, Department of wagons engineering and product quality, Ukrainian State University of Railway Transport. <https://orcid.org/0000-0003-1702-1054>. Tel.: (057) 730-10-35. E-mail: alena.hiit.vagons@gmail.com.

Lytovchenko Oleksandr, postgraduate student, department of wagon engineering and product quality. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-1702-1054>. Tel.: +38 050 161-18-48. E-mail: rokada_t@ukr.net.

Freilih Denis, postgraduate student, department of wagon engineering and product quality. ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0002-0797-4513>. Tel.: +38 057 265-48-67.

Статтю прийнято 30.06.2025 р.