

*А. В. ГАЙДАКА, В. В. КЛИТНОЙ, В. В. КЛИТНОЙ***СТРУКТУРНО-ФУНКЦІОНАЛЬНА МОДЕЛЬ ВАЛЬНИЦЬ ОПОРНИХ ВУЗЛІВ РЕЙКОВОГО ТРАНСПОРТУ**

Тип роликів вальниць букс (опорних вузлів) рейкового транспорту (РВБРТ) залежить від умов експлуатації в тій чи іншій державі. У Великобританії, США, Японії, Польщі залізничні вагони оборудують колісними парами з дворядними конічними роликівими вальницями. Для вагонів Австрії, Німеччини, України застосовують вузли з двома циліндричними роликівими вальницями, а для Швеції типовим є буксовий вузол з двома сферичними роликівими вальницями. Базовою конструкцією для структурно-функціонального аналізу вибрано найбільш масові серійні циліндричні РВБРТ, що застосовують в українських вантажних і пасажирських вагонах (майже 99 % від загальної кількості). Виконано структурну декомпозицію базових вузлів вальниць, відповідно до функцій призначення. За побудованою структурно-функціональною моделлю циліндричної вальниці, виявлено функціональні взаємозв'язки між елементами її конструкції, проаналізовано функції сепаратора щодо усування його перекосу, зменшення сил взаємодії з роликами і опорним кільцем, зменшення проковзування роликів. Це дозволило обґрунтувати зміни в конструкції сепаратора – збільшити кількість вікон, змінити форму бокових поверхонь перемичок і перерізу кільця сепаратора для підвищення технічного рівня РВБРТ в межах заданого габариту.

Ключові слова: технічний рівень, роликіві вальниці букс рейкового транспорту, структурно-функціональна модель вальниці, функції і конструкція сепаратора.

*A. GAYDAMAKA, V. KLITNOI, V. KLITNOY***STRUCTURAL AND FUNCTIONAL MODEL OF BEARING ASSEMBLIES IN LOAD-BEARING UNITS OF RAIL TRANSPORT SYSTEMS**

The type of roller bearings used in axleboxes (supporting units) of rail transport systems (RBSRT) varies depending on the operating conditions specific to each country. In the United Kingdom, the United States, Japan, and Poland, railcars are equipped with wheelsets fitted with double-row tapered roller bearings. In Austria, Germany, and Ukraine, bearing units typically comprise two cylindrical roller bearings, while in Sweden, axlebox assemblies with two spherical roller bearings are standard. For structural and functional analysis, the most common series-produced cylindrical RBSRT units used in Ukrainian freight and passenger rolling stock—representing nearly 99% of the total—were selected as the baseline design. A structural decomposition of the primary bearing assemblies was performed in accordance with their functional roles. Based on the developed structural and functional model of the cylindrical roller bearing, functional interrelations between the bearing components were identified. The analysis focused particularly on the functions of the cage (separator), including prevention of skewing, reduction of interaction forces with the rollers and bearing ring, and minimization of roller slippage. These insights supported the rationale for design modifications of the cage—specifically, increasing the number of windows, altering the shape of the side surfaces of the bridges, and optimizing the cross-section of the cage rings—to enhance the technical performance of RBSRT while maintaining dimensional compatibility.

Key words: technical level, roller bearings of rail transport axleboxes, structural and functional model of the bearing, functions and design of the cage.

Вступ.

В сучасній системі «ринок виробництва–споживач» основна роль належить останньому. Випуск продукції, що відповідає вимогам споживача, є необхідною умовою її конкурентоздатності. В повній мірі це стосується роликівих вальниць букс рейкового транспорту (РВБРТ) і, зокрема, вантажних та пасажирських вагонів, які знаходяться під дією високих і різко змінних навантажень ($F_r \geq 0,1C$; $F_a \leq F_r$; $n_b \leq 0,3 n_{гр}$; $a \leq 50g$; F_r, F_a – відповідно радіальна і осьова сили; C – радіальна динамічна вантажність; $n_b, n_{гр}$ – відповідно номінальна і гранична частоти обертання внутрішнього кільця вальниці; a, g – відповідно прискорення вузла і вільного падіння). Вихід з ладу РВБРТ завжди був і залишається достатньо високим. Наприклад, частка зняття вантажних вагонів з експлуатації на шляху прямуювання через відмови буксових вузлів у період 2017...2021 рр. склала третину загальної кількості їх відчеплень [1]. Отже, пошук шляхів системного підвищення технічного рівня українських РВБРТ при

проектуванні та модернізації є актуальним і має важливе прикладне значення не тільки для залізничного транспорту, а і для багатьох галузей машинобудування.

Аналіз останніх досягнень та публікацій.

Підвищення технічного рівня роликів вальниць за зносом і контактною витривалістю в межах заданого габариту конструктивним шляхом досягається поліпшенням розподілу радіального і осьового навантаження між роликами, оптимізацією геометричної форми роликів, збільшенням кількості роликів. Поліпшення розподілу радіального і осьового навантаження між роликами здійснюють за рахунок удосконалення вузлів вальниць [2]. Для РПБРТ удосконалення вузлів вальниць застосовується обмежено через значну вартість впровадження. Оптимізації торцевого радіуса роликів циліндричних вальниць присвячена публікація [3], а конічних – публікація [4]. Достатньо ґрунтовні дослідження [3, 4] забезпечили надійну роботу торцевих поверхонь роликів і бортів кілець. Разом з тим [3, 4] не враховують зміни в контакті, що пов'язані зі зносом. Вплив збільшення кількості роликів, як одного з найбільш ефективних напрямів підвищення технічного рівня в межах заданого габариту, досліджено для циліндричних вальниць в публікації [5], а для конічних – в [6]. Однак публікації [5, 6] не відповідають на ряд важливих питань, а саме: як впливатиме збільшення кількості роликів на роботоздатність сепаратора, чи з'являться після зміни конструкції сепаратора нові його корисні функції, як змінити конструкцію сепаратора з ефектом покращення якомога більшого показників технічного рівня вальниці.

Найбільш ефективними рішеннями підвищення технічного рівня роликів вальниць букс українських пасажирських та вантажних вагонів визнано використання вальниць касетного типу з конічними (BRESCO – США, TBU 1520 HARP – Україна) і циліндричними (CRU Duplex HARP – Україна) роликами, які також мають збільшену кількість роликів. Вальниці BRESCO, що складають близько 1 % серійних циліндричних роликів вальниць 30-232726E2M і 30-42726E2M, використовуються в Україні з 2008 р. і за даними Укрзалізниці забезпечують підвищення технічного рівня через усунення ушкоджень бортів кілець і торців роликів. Вальниці CRU Duplex HARP, що складають менше 0,3 % українських серійних циліндричних роликів вальниць, введені в експлуатацію з 2012 р. і характеризуються збільшенням на 5 % розрахунковим ресурсом та відповідно меншими витратами на обслуговування у порівнянні з серійними вальницями, однак потребують подальшого підвищення радіальної та осьової вантажності. Отже, запропоновані технічні рішення РПБРТ не в повній мірі задовольняють вимоги споживача, оскільки покращення одного чи декількох показників якості погіршує інші або є не достатньо ефективним.

Недостатня вивченість функціональних взаємозв'язків між структурними елементами РПБРТ на роботоздатність сепаратора, від конструкції якого залежать, основні показники технічного рівня вальниці (довговічність, вантажність, енергоефективність), обумовлюють актуальність дослідження щодо їх покращення.

Мета та задачі дослідження.

Метою дослідження є встановлення зв'язків між структурними елементами та їх функціями в роликів вальницях і обґрунтування змін конструкції сепаратора для підвищення технічного рівня вальниць.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- побудувати структурно-функціональну модель базової конструкції роликів вальниць;
- обґрунтувати конструктивні зміни сепаратора для підвищення технічного рівня вальниці.

Вибір базової конструкції і методу дослідження.

Структура і функціональні зв'язки деталей серійних найбільш масових циліндричних роликів вальниць букс вантажних і пасажирських вагонів українських потягів наведені на рис. 1.

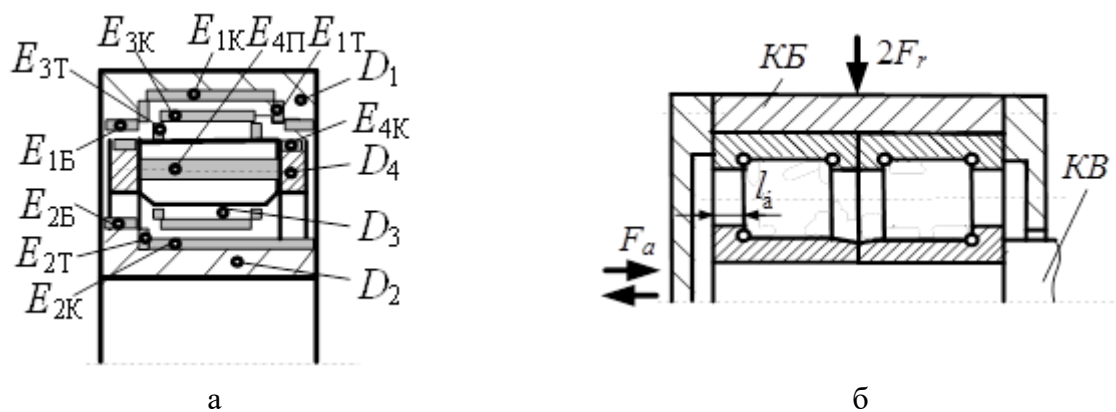


Рис. 1 – Базова конструкція РПБРТ: а – структура; б – вальниці в складі букси (KB – колісна вісь; KB – корпус букси; F_r , F_a – радіальне і осьове навантаження)

Зовнішнє радіальне навантаження $2F_r$ на РВБРТ прийнято рівномірно розподіленим між вальницями, а осьове F_a діє вздовж осі колісної пари. Кожна з вальниць складається із зовнішнього D_1 , наприклад з двома буртами, і внутрішнього D_2 , наприклад з одним буртом, кільця, роликів D_3 , сепаратора D_4 . Елементами кільця є доріжки кочення E_{1K} , E_{2K} , торцеві E_{1T} , E_{2T} і базуючі $E_{1Б}$, $E_{2Б}$ поверхні буртів, елементи роликів – поверхні E_{3K} кочення (циліндрична, конічна, сферична) і торцева E_{3T} поверхня (плоска, опукла), елементи сепаратора рамної конструкції – поверхні кільця E_{4K} і перемички $E_{4П}$ відповідної форми. Зовнішнє кільце D_1 може бути спільним для обох підшипників.

У вальниці радіальне навантаження F_r передається через бігову доріжку E_{1K} зовнішнього D_1 кільця на радіальні поверхні E_{3K} роликів D_3 і на бігову доріжку E_{2K} внутрішнього D_2 кільця; осьове навантаження F_a , що діє наприклад, з ліва направо, передається від торцевої поверхні E_{2T} борта внутрішнього кільця D_2 на торцеві поверхні E_{3T} ролика D_3 і на торцеві поверхні E_{1T} бортів зовнішнього кільця D_1 .

При обертанні вальниці роликів D_3 через поверхню кочення E_{3K} входять в силову взаємодію з поверхнями $E_{4П}$ перемичок сепаратора D_4 і переміщують його; перемички жорстко пов'язані з кільцями сепаратора, які в свою чергу спираються (базуються) своїми зовнішніми поверхнями тертя E_{4K} на поверхні ковзання $E_{1Б}$ бортів зовнішніх кільць D_1 (базування сепаратора на двобортівне зовнішнє кільце) або на поверхні ковзання $E_{2Б}$ бортів внутрішнього кільця D_2 (базування сепаратора на двобортівне внутрішнє кільце).

При заданій структурі вальниці уточнення відомих і виявлення нових взаємозв'язків елементів деталей з функціями призначення виконують на основі структурно-функціонального аналізу [8], який дозволяє скорегувати їх конструкції. Удосконалення функцій базової конструкції РВБРТ для підвищення технічного рівня здійснено на прикладі вальниць колісних пар залізничних вагонів. Структурно-функціональний метод системного аналізу вальниць включає побудову моделей структури і функціонування, а також структурно-функціональної моделі, визначення вагових коефіцієнтів функцій, удосконалення функцій базової конструкції.

Модель структури базової конструкції сепаратора.

Базова конструкція РПБРТ, як складальна одиниця, включає внутрішнє і зовнішнє кільця, роликів (циліндричні, конічні, сферичні) і сепаратор.

Функціональне призначення сепараторів вальниць полягає в усуненні контакту тіл кочення між собою і утриманні їх на певній відстані одне від другого. Іноді сепаратори мають елементи, що фіксують тіла кочення в вальниці від випадання з вікон при знятих внутрішньому чи зовнішньому кільцях. Полімерні сепаратори додатково вирішують задачі покращення умов змащування деталей вальниці, демпфірування динамічних навантажень, зменшення проковзування тіл кочення, вібрацій та шуму.

Структурна модель сепаратора РПБРТ представлена на рис. 2.



Рис. 2 – Модель структури сепараторів

Найбільш поширеним типом конструкції сепараторів є рамна (масивна). Поняття масивної конструкції було введено для металевих сепараторів, виготовлення яких здійснювалося з прутків, труб або заготовок, і вимагало певної жорсткості для механічної обробки. Рамною називають деякі конструкції як металевих так і полімерних сепараторів, однак в останньому випадку вимога жорсткості вже не пов'язана з будь-якою механічною обробкою. На відміну від корончатих конструкцій рамна охоплює тіла кочення з усіх боків. Вибір рамної чи корончатої конструкції визначається типом вальниці, умовами її складання та експлуатації.

Складові конструкції сепаратора (рамні напівсепаратори, рамні секційні, сепаруючі елементи) доцільно застосовувати для вальниць великих габаритів з $d \geq 100$ мм при умові, що заміна цільної конструкції сепаратора на складову не обмежує швидкісний параметр вальниці.

Поверхнями тертя сепаратора є поверхні вікон (вікна утворюються перемичками і кільцями), що стикаються з тілами кочення, а також опорні поверхні кілець, які стикаються з поверхнями, що базуються по бортах зовнішніх або внутрішніх кілець вальниці. У разі, якщо сепаратор базується по роликах, поверхні тертя перемичок виконують відповідної форми (циліндричні, конічні, сферичні). Плоскі бічні поверхні прямих перемичок служать для сприйняття навантажень з боку циліндричних роликів при базуванні сепаратора по бортах одного з кілець вальниці. При базуванні сепаратора по бортах зовнішнього кільця досягається краще змащування поверхонь контакту, проте момент тертя у вальниці дещо більше через збільшене «плече» сил тертя.

Кільця полімерних сепараторів частіше виконують профільного перетину з метою отримання більш якісної вилівки і розміщення кишень для змащення. Кишені для змащення, а також різні елементи, які полегшують подачу мастила до поверхонь тертя деталей, можуть розташовуватися і на перемичках.

Форма вікна сепаратора часто відрізняється від форми тіла кочення. Наприклад, для поліпшення плавності роботи, зниження вібрації і шуму деяких швидкісних вальниць передбачають незначне шахове взаємне розташування вікон сепаратора. Вплив форми вікон частіше досліджувався для швидкісних ($n_b \geq n_{гр}$) і переважно кулькових вальниць. Для РВБРТ питання впливу конструкції елементів сепаратора (вікон і кілець) досліджено недостатньо.

Встановлено, що значно зменшити і навіть усунути явище перекосу сепаратора в роликівій вальниці можна за рахунок зміни прямокутної геометрії вікон на криволінійну з опуклістю сторін до центру вікна, що відповідає новій функції сепаратора. Друга нова функція сепаратора пов'язана зі зменшенням сил взаємодії сепаратора з роликами і сепаратора з базуючим кільцем вальниці, яка залежить від жорсткості перемичок і кілець. Зменшення жорсткості перших досягається збільшенням кількості вікон, а жорсткості кілець – шляхом заміни прямокутного перерізу профільним. Додаткове зменшення жорсткості елементів сепаратора досягається заміною матеріалу сепаратора – металу на полімер. З фактором жорсткості конструкції

сепаратора пов'язана третя нова функція – функція зменшення проковзування роликів по доріжкам кочення кілець вальниці.

Модель функціонування РПБРТ. Функціональне призначення вальниць кочення полягає в фіксації рухомих деталей механізмів, сприйнятті навантажень і зменшенні опору обертанню. Тому для РПБРТ, як важко навантаженої системи, характерні три рівня функцій (рис. 3).

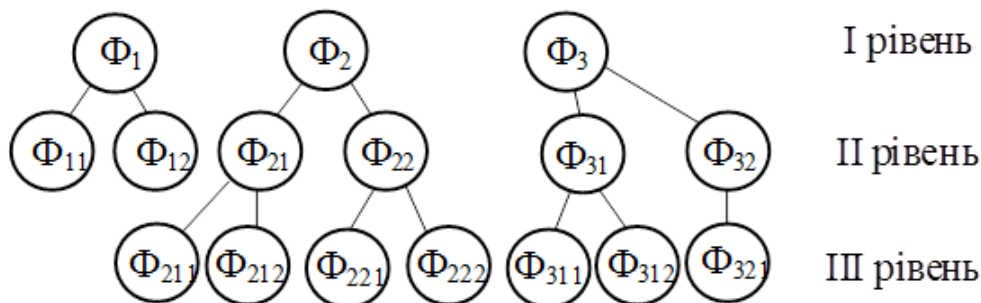


Рис. 3 – Модель функціонування РПБРТ

Перший рівень функціональної моделі включає дві основні функції – фіксація деталей колісних пар (Φ_1) і сприйняття навантажень (Φ_2) та одну допоміжну – зменшення опору обертанню (Φ_3).

Другий рівень моделі визначає функції, для виконання яких застосовано вальниці, – посадку внутрішнього кільця на осі (Φ_{11}) і посадку зовнішнього кільця в корпусі букси (Φ_{12}), сприйняття зовнішнього радіального навантаження (Φ_{21}) і сприйняття зовнішнього осьового навантаження (Φ_{22}), відокремлення роликів (Φ_{31}) і сприйняття навантаження від сепаратора (Φ_{32}).

Третій рівень моделі представлений основними і допоміжними функціями – забезпечення мінімального тертя кочення (Φ_{211}) і проковзування (Φ_{212}) по радіальним поверхням кочення кілець, забезпечення мінімального тертя ковзання по торцевим поверхням бортів кілець (Φ_{221}), забезпечення мінімального тертя проковзування по базуючих поверхнях бортів кілець (Φ_{222}), утримання роликів на рівних відстанях у підшипнику (Φ_{311}), утримання роликів від випадання при знятому кільці (Φ_{312}), забезпечення мінімального тертя ковзання по радіальним поверхням бортів кілець (Φ_{321}). Функції (Φ_{11}) та (Φ_{12}) в цій роботі не аналізуються.

Структурно-функціональна модель базової конструкції РПБРТ. Структурна і функціональна моделі віддзеркалюють сталі статичні зв'язки між елементами та функціями елементів. Дійсні властивості проявляються через динамічні зв'язки, які з'являються в процесі роботи деталей. Саме в процесі функціонування вальниці з'являються нові функції сепаратора – функція усування перекосу його конструкції, функція зменшення сил взаємодії з роликами і базуючим кільцем, функція зменшення проковзування роликів. Тому для визначення функціональності і оцінки якості виконання функцій РПБРТ з перспективною цільною рамною конструкцією сепаратора, необхідно суміщення структурної та функціональної моделей (з урахуванням нових функцій) і побудова структурно-функціональної моделі (рис. 4).

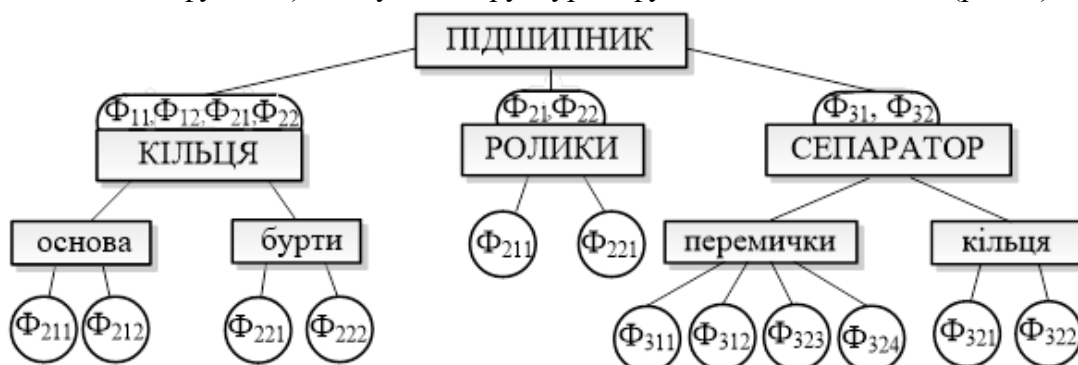


Рис. 4 – Структурно-функціональна модель РПБРТ

На відміну від моделей структури і функціонування вальниць, структурно-функціональна модель включає додатково нові корисні функції сепаратора – функцію усування перекосу його конструкції (Φ_{322}), функцію зменшення сил взаємодії з роликами і базуючим кільцем (Φ_{323}), функцію зменшення проковзування роликів (Φ_{324}).

Вклад матеріального носія. На основі запропонованої структурно-функціональної моделі методом експертної оцінки [9] визначено вклад матеріального носія (МН) – деталі чи елемента деталі РПБРТ в їх функції, які вони реалізують у підшипниках. Нижче подано вагові коефіцієнти виконання функцій деталей РПБРТ (табл. 1).

Таблиця 1 – Вагові коефіцієнти виконання функцій деталей РПБРТ

МН функції	Витрати на МН, від. од.	Індекс функції	Вклад МН в функцію, від. од.
Зовнішнє кільце	0,4	Φ_{21}	0,2
		Φ_{22}	0,2
		Φ_{211}	0,25
		Φ_{212}	0,1
		Φ_{221}	0,25
Внутрішнє кільце	0,4	Φ_{21}	0,2
		Φ_{22}	0,2
		Φ_{211}	0,25
		Φ_{212}	0,1
		Φ_{221}	0,25
Сепаратор	0,15	Φ_{31}	0,1
		Φ_{32}	0,3
		Φ_{311}	0,05
		Φ_{312}	0,05
		Φ_{321}	0,2
		Φ_{322}	0,1
		Φ_{323}	0,1
		Φ_{324}	0,1
Ролики	0,05	Φ_{21}	0,2
		Φ_{22}	0,2
		Φ_{211}	0,3
		Φ_{221}	0,3

В подальшому до уваги беруться вагові коефіцієнти функцій, що пов'язані з сепаратором, оскільки саме вони визначатимуть зміни в його конструкції внаслідок збільшення роликів у підшипнику в межах заданого габариту.

Обговорення результатів дослідження. З аналізу основних функцій сприйняття радіального (Φ_{21}) і осьового (Φ_{22}) навантажень кільцями та роликами постає, що їх реалізація забезпечується достатньо надійно різними конструкціями – двохбортовими і однобортовими. Підвищення ефективності виконання функцій (Φ_{21}), (Φ_{22}) здійснюють шляхом оптимізації геометрії поверхонь роликів і кілець при розв'язанні відповідних контактних задач [8, 9]. Подальше удосконалення функцій (Φ_{21}), (Φ_{22}) потребує збільшення кількості роликів. Допоміжні функції – забезпечення мінімального тертя кочення (Φ_{211}) і проковзування (Φ_{212}) по радіальним поверхням кілець, забезпечення мінімального тертя ковзання по торцевим поверхням бортів кілець (Φ_{221}) при незмінних габаритах, геометричних параметрах, технології виготовлення залежать від кількості роликів у вальниці і умов змащування деталей, а забезпечення мінімального тертя ковзання по базуючих поверхнях бортів кілець (Φ_{222}) визначається матеріалом, жорсткістю і особливостями (властивість накопичувати мастило і

віддавати до поверхонь тертя) конструкції сепаратора. Основна функція (Φ_{31}) в цій роботі не аналізується. Високий вклад функції $\Phi_{32} = 0,3$ у підвищення ефективності вальниці показує потужні можливості оптимізації геометрії робочих поверхонь роликів, кілець і перемичок сепаратора. Вони утримують додатковий об'єм мастила своїми елементами (спеціальні кишені, канали, отвори) і покращують його подачу до деталей, що підтверджено в роботі [10].

Дослідження зв'язків між структурними елементами та їх функціями в конструкціях роликових вальниць дозволили виявити нові корисні функції сепаратора, за якими можна знизити тертя і знос всіх деталей. Реалізація нових функцій сепаратора можлива після конструктивних змін перемичок і кілець. Вказані результати досягнуто на основі експертної оцінки, яка потребує уточнення. Разом з тим на сьогодні не існує іншого методу оцінювання якості проектування вальниць, яке перевіряється тривалою експлуатацією. Отже, розробка нових чи модернізація відомих конструкцій вальниць в подальшому потребує створення сучасної методології проектування вальниць. Дослідження зв'язків між структурними елементами та їх функціями в конструкціях роликових вальниць є продовженням комплексу теоретичних робіт авторів з кінематики та динаміки деталей вальниць [12], на основі яких вибрано кількість та геометрію вікон, а також жорсткість кілець сепаратора.

Виконані дослідження дали змогу запропонувати удосконалену конструкцію сепаратора з максимально можливою кількістю вікон [13]. Максимальна кількість вікон рамної конструкції сепаратора вибирається за умови виконання монтажно-демонтажних операцій з вальницею. Відповідна циліндрична роликова вальниця типу 2726 для букс українських вагонів з 16-ма роликами (замість 15) і удосконаленими перемичками та кільцями рамної конструкції сепаратора має максимально можливу вантажність в межах заданого габариту [14]. Розрахунковий ресурс вальниці з удосконаленою рамною конструкцією сепаратора за контактною витривалістю поверхонь кочення тільки через збільшення кількості роликів підвищився майже на 19 %. Усування перекошу удосконаленої конструкції сепаратора, зменшення сил взаємодії сепаратора з роликами і базуючим кільцем додатково сприятиме зменшенню тертя і зносу деталей вальниці. Остаточні висновки щодо ефективності запропонованих конструктивних удосконалень сепаратора будуть зроблені після спеціальних досліджень модернізованих вальниць, які автори планують провести в буксових вузлах вагонів.

Висновки. За аналізом структурно-функціональної моделі РПБРТ виявлено нові корисні функції сепаратора – усунення перекошу його конструкції, зменшення сил взаємодії з роликами і базуючим кільцем, зменшення проковзування роликів, які можуть бути реалізовані після конструктивних змін елементів сепаратора: переріз кілець має геометрію зменшеної жорсткості, а перемички виконують овальної форми зі стрілою опуклості в напрямі до середини вікна.

Розрахунковий ресурс роликової вальниці з удосконаленою рамною конструкцією сепаратора за контактною витривалістю поверхонь кочення підвищився майже на 19 %. Енергоефективність вальниці з удосконаленою конструкцією сепаратора може бути встановлена після спеціальних досліджень модернізованих вальниць в буксових вузлах вагонів.

Список літератури:

1. Мартинов І. Е., Труфанова А. В., Шовкун В. О., Шарий О. Л., Мартиросян С. Р. Аналіз технічного стану буксових вузлів вантажних вагонів. Збірник наукових праць УкрДУЗТ 2023, 203. 63–72.
2. Allmaier H. Increase Service Life for Rail Wheel Bearings—A Review of Grease Lubrication for This Application. *Lubricants* 2022, 10(3), 36.
3. Симсон Е., Овчаренко В., Трохман М. Моделирование та оптимізація зносу в зоні торцевого контакту ковзання роликових підшипників. Міжнародна наукова конференція MicroCAD: Математичне моделювання в механіці і системах. НТУ «ХПІ» 2009, № 2. 35–36.
4. Fujiwara H., Tsujimoto T., Yamauchi K. Optimized Radius of Roller Large End Face in Tapered Roller Bearings. *NTN Technical review* 2009, 77. 96–104.

5. Ozu T. High Load Capacity Cylindrical Roller Bearings. NTN Technical review 2006, 74. 90–95.
6. Ueno T., Matsushita T. Extremely High Load Capacity Tapered Roller Bearings. . NTN Technical review 2009, 77. 73–80.
7. Згуровський М. З., Панкратова Н. Д. Основи системного аналізу. К.: Вид-ча гр. BHV, 2007. 544 с.
8. Гайдамака А.В. Підшипники кочення. Базові знання та напрямки вдосконалення: навч. посіб. Х.: Видавництво «Форт», 2009. 248 с.
9. Harris, T. Rolling bearing analysis. New York, 2006. 481 p.
10. Gaydamaka A., Klitnoi V., Dobrotvorskiy S., Basova Y., Matos D. and Machado J. A Systematic Approach for Energy-Efficient Design of Rolling. Appl. Sci. 2023, 13. 1144.
11. Гайдамака, А. Моделі кінематики та динаміки циліндричних роликових підшипників залізничного транспорту. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2014. Вип. 3 (51). 100–108.
12. Пат. 50093 Україна, МПК F 16C 33/46. Сепаратор роликопідшипника / Гайдамака А., Алефіренко В.; заявник і патентовласник Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». № u200912229; заявл. 27.11.2009; опубл. 25.05.2010, Бюл. № 10.– 2 с.
13. Пат. 91168 Україна, МПК F 16C 33/58. Циліндричний роликопідшипник максимальної вантажності в межах заданого габариту з полімерним сепаратором цільної конструкції / Гайдамака А.; заявник і патентовласник Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». № u201400214; заявл. 13.01.2014; опубл. 25.06.2014; Бюл. № 12.– 3 с.

References (transliterated):

1. Martinov I. E., Trufanova A. V., Shovkun V. O., Sharif O. L., Martirosyan S. R. Analiz tehnicnogo stanu bukovih vuzliv vantazhnih vagoniv / Zbirnik naukovih prac UkrDUZT, 2023, vip. 203. S. 63–72..
2. Allmaier H. Increase Service Life for Rail Wheel Bearings—A Review of Grease Lubrication for This Application. Lubricants 2022, 10(3), 36..
3. Simson, E.A, Ovcharenko, V.V, Trohman, M.V. Modelirovanie i optimizatsij iznosa v zone tortzevogo kontakta skolzhenij rolikovich podshipnikov. International scientific conference MicroCAD. NTU "KPI", 2009, № 2. 35–36.
4. Fujiwara H., Tsujimoto T., Yamauchi K. Optimized Radius of Roller Large End Face in Tapered Roller Bearings. NTN Technical review 2009, 77. 96–104.
5. Ozu T. High Load Capacity Cylindrical Roller Bearings. NTN Technical review 2006, 74. 90–95.
6. Ueno T., Matsushita T. Extremely High Load Capacity Tapered Roller Bearings. NTN Technical review 2009, 77. 73–80.
7. Zgurovskij M. Z., Pankratova N. D. Osnovi sistemnogo analizu. – K.: Vid-cha gr. BHV, 2007. 544 s.
8. Gaydamaka A.V. Pidshipniki kochennya. Bazovi znannya ta napryamki vdoskonalennya: navch. posib. Vidavnictvo «Fort», 2009. – 248 s..
9. Harris, T. Rolling bearing analysis. New York, 2006. 481 p.
10. Gaydamaka A., Klitnoi V., Dobrotvorskiy S., Basova Y., Matos D. and Machado J. A Systematic Approach for Energy-Efficient Design of Rolling. Appl. Sci. 2023, 13. 1144.
11. Gaydamaka, A. Modeli kinematiki i dinamiki tsilindrichnih rolikopodshipnikov zaliznichnogo transporta. Visnyk Dnipropetr. nats.un-tu zalizn. Transp, 2014, 3. 100–108.
12. Pat. Ukraine 50093, MPK F 16C 33/46, (2010). Separator rolikopidshipnika. Gaydamaka, A., Alefirenko, V. Kyiv: Derzhpatent Ukrai'ny, 10.
13. Pat. Ukraine 91168, MPK F 16C 33/58, (2014). Tsilindrichny rolikopodshipnik maximalnoi vantaghnosti v predelah zadanogo gabarita. Gaydamaka, A. Kyiv: Derzhpatent Ukrai'ny, 12.

Надійшла (received) 07.05.2025 р.

Відомості про авторів / About the Authors

Гайдамака Анатолій Володимирович (Anatoly Gaydamaka) – доктор технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри деталей машин та гідропневмосистем, м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6952-4086>; e-mail: gaydamaka.doc@gmail.com

Клітний Володимир Вікторович (Volodymyr Klitnoi) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри деталей машин та гідропневмосистем, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0024-5959>; e-mail: Volodymyr.Klitnoi@khp.edu.ua

Клітний Віктор Володимирович (Viktor Klitnoy) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри деталей машин та гідропневмосистем, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6710-3579>; e-mail: viktor.klitnoi@khp.edu.ua