

УДК 621.651

**МЕТОДИКА ТА ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ РАЦІОНАЛЬНОГО РЕСУРСУ
АКСІАЛЬНО-ПЛУНЖЕРНИХ ГІДРОМАШИН МОБІЛЬНОЇ ТЕХНІКИ**

Д-р техн. наук С. В. Воронін, канд. техн. наук В. О. Стефанов,
аспіранти Р. С. Васянович, Т. В. Трифонов, магістр С. О. Півоваров

**METHODOLOGY AND EXAMPLE OF CALCULATING THE RATIONAL RESOURCE
OF AXIAL-PISTON HYDRAULIC MACHINES OF MOBILE EQUIPMENT**

Dr. Sc. (Tech.) S. Voronin, PhD (Tech.) V. Stefanov, postgraduate student R. Vasianovych,
postgraduate student T. Tryfonov, master S. Pivovarov

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.208.2024.308140>



Анотація. У статті наведено методику розрахунку раціонального ресурсу аксіально-плунжерних гідромашин мобільної техніки, що побудована на основі вибраної моделі оптимізації довговічності простих технічних систем і враховує закономірності зношування плунжерних пар і залежності для розрахунку сумарного граничного зносу. Також наведено результати порівняльного розрахунку раціонального ресурсу регульованого аксіально-плунжерного насоса гідравлічної системи одноковшового екскаватора для двох рівнів протизношувальної властивості оливи.

Ключові слова: аксіально-плунжерна гідромашина, зношування, технічне обслуговування, питомі витрати, раціональний ресурс.

Abstract. The article analyzes approaches for creating models for optimizing the durability of mobile machine units. On the basis of the selected model, in which the target function is the total specific costs of purchasing the machine and the costs of maintaining its working condition, a method of calculating the rational resource of axial-plunger hydraulic machines has been developed for the condition when the resource of the hydraulic machine is limited by the resource of only its plunger pairs. The methodology, built on the basis of the chosen model for optimizing the durability of simple technical systems, takes into account the patterns of wear of plunger pairs under certain operating conditions, and also takes into account the proposed dependencies for calculating their total wear limit. The methodology consists of five consecutive operations, namely: determining the total marginal wear; obtaining experimental patterns of wear of plunger pairs over time in the form of regression equations; calculation of the number and periodicity of technical maintenance of the hydraulic machine for the inter-repair cycle; calculation of the rational resource of the hydraulic machine.

The results of the comparative calculation of the rational resource of the adjustable axial-plunger pump 321.224 of the hydraulic system of the single-bucket excavator EO-3323 according to the developed method are also given.

The total marginal wear of the pump was determined according to the criterion of reducing its efficiency, namely from the condition of a drop due to the wear of its volume coefficient of useful action by 30 %.

To obtain the patterns of wear of the pump's plunger pairs, the results of previous operational tests of the pump were used for two variants of its lubrication: lubrication with ordinary hydraulic oil and lubrication with oil whose anti-wear properties are activated by an external electric field.

Specific costs for the purchase of the pump, which are included in the durability optimization model in the form of depreciation deductions, were calculated for the inter-repair cycle. The specific costs of maintaining the working condition of the pump were equal to the costs of its maintenance, during which hydraulic oil and filters are replaced, that is, the pattern of wear of plunger pairs is returned to the starting point.

Keywords: axial-plunger machine, wear, technical maintenance, specific costs, rational resource.

Вступ. Аксіально-плунжерні гідромашини (АПП), насоси і гідромотори обертової дії з поступовим рухом плунжерів набули широкого застосування в силових передачах енергонасичених мобільних машин і пливних системах дизельних двигунів [1, 2]. Їхня надійність визначена конструктивними особливостями, режимами навантаження, якістю робочої рідини [1]. Унаслідок впливу великої кількості факторів прогнозування показників надійності АПП на етапі експлуатації є складним завданням, вирішення якого дасть змогу підвищити ефективність застосування машин та організації робіт з їхнього обслуговування і ремонтів, особливо за планово-попереджувальної системи.

Головним показником надійності АПП, що потребує прогнозування, є ресурс, який залежить від характеру розвитку зношування відповідальних деталей і встановлений по досягненню граничного зносу [1, 2]. За відомого значення граничного зносу ресурс обернено пропорційно залежить від швидкості зношування відповідальних деталей. Отже, одним із важливих завдань механіків є уповільнення зношування, наприклад, шляхом удосконалення системи технічного обслуговування (ТО) з одночасним покращенням якості мастильних матеріалів і фільтрувальних систем. З іншого боку, головною комерційною метою будь-якого експлуатуючого підприємства є забезпечення максимальної економічної ефективності, що суперечить прагненню до

максимального ресурсу машин. У такій ситуації йтиметься про поняття оптимального (або раціонального) ресурсу, по досягненні якого сумарні витрати на підтримку надійності агрегатів машин протягом життєвого циклу будуть мінімальними. Реалізація такого підходу потребує застосування моделей оптимізації довговічності машин, однак для виконання розрахунків за такими моделями часто невідомими є закономірності зношування АПП, які можуть бути отримані лише експериментальним шляхом.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Усі моделі оптимізації довговічності засновані на аналізі цільових функцій, що встановлюють зв'язок критеріїв економічної ефективності з технічними показниками машини або окремого агрегату за обраної системи ТО. Економічними критеріями можуть бути загальні питомі експлуатаційні витрати [3, 4] або сукупний дохід від роботи машини, або її економічна ефективність за певних умов підтримання якості [5]. У будь-якому випадку ресурс технічної системи, як головний показник довговічності, набуває свого оптимального значення в точці мінімуму загальних питомих витрат на придбання машини та підтримку її працездатного стану, як показано на рис. 1.

Якщо за ресурс машини прийняти її напрацювання до капітального ремонту, як це запропоновано в роботах [3, 4], тоді цільову функцію питомих сумарних витрат можна подати як

$$\sum C = \left(-\frac{AM}{T}\right) + \left(-\frac{P}{T} - T^{MM}\right) + \sum_{i=1}^n \frac{C_{TOi}}{\tau_{TOi}} \rightarrow \min, \quad (1)$$

де C_{AM} – середня величина амортизаційних відрахувань за один ремонтний цикл машини;

C_P – витрати на усунення відмов і несправностей у процесі ремонтів за один ремонтний цикл;

C_{MM} – витрати на компенсацію втрат внаслідок зниження продуктивності та збільшення витрат на ММ при зношуванні

головних конструктивних вузлів машини протягом одного ремонтного циклу;

T – періодичність виконання капітального ремонту (ресурс);

C_{TOi} – витрати на технічне обслуговування за видами;

τ_{TOi} – періодичність проведення технічного обслуговування;

n – кількість технічних обслуговувань за міжремонтний цикл.

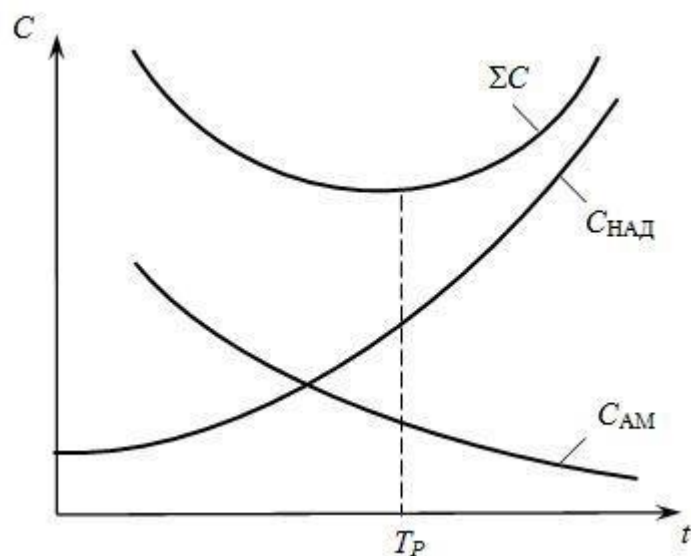


Рис. 1. Визначення раціонального ресурсу за питомими витратами [2, 3]:
 ΣC – загальні питомі витрати; $C_{НАД}$ – питомі витрати на підтримку працездатного стану;
 C_{AM} – питомі витрати на придбання (амортизація)

Досвід експлуатації парків машин різного призначення показав, що дійсні закономірності зношування їх АПГ на стадії нормальної роботи мають різний характер, за якого знос ΔU_i за малий проміжок часу $\Delta t_i < \Delta t$ зростає як лінійно, так і нелінійно, тобто коли швидкість зношування $V_U \neq const$ або $V_U = f(t)$. На рис. 2 наведені приклади таких закономірностей [6, 7].

Імовірність розвитку зношування за кожною з наведених на рис. 2 закономірностей залежить від конструкції та умов роботи агрегату. Однак найбільш типовою [1, 7] для деталей АПГ є ступенева залежність 4, яку можна записати так:

$$U(t) = U_{II} + bt^\alpha, \quad (2)$$

де U_{II} – початковий знос;

α – безрозмірний показник ступеня за t ;

b – розмірний коефіцієнт, який за своїм фізичним змістом є швидкістю зношування, але лише у випадку, якщо $\alpha = 1$.

У цих же роботах був встановлений зв'язок між ресурсом і періодичністю виконання ТО, що є дуже важливим, оскільки саме ТО є операціями, спрямованими на підтримку надійності АПГ (заміна оливи, фільтрів, регулювання). Ця залежність за умови, що $U_{II} = 0$, має такий вигляд [7]:

$$T_p = \frac{U_{GP}}{\Delta U_i} \cdot t_{TO} = \frac{U_{GP}}{bt_{TO}^{\alpha-1}}, \quad (3)$$

де U_{GP} – граничний знос;
 t_{TO} – періодичність виконання ТО.

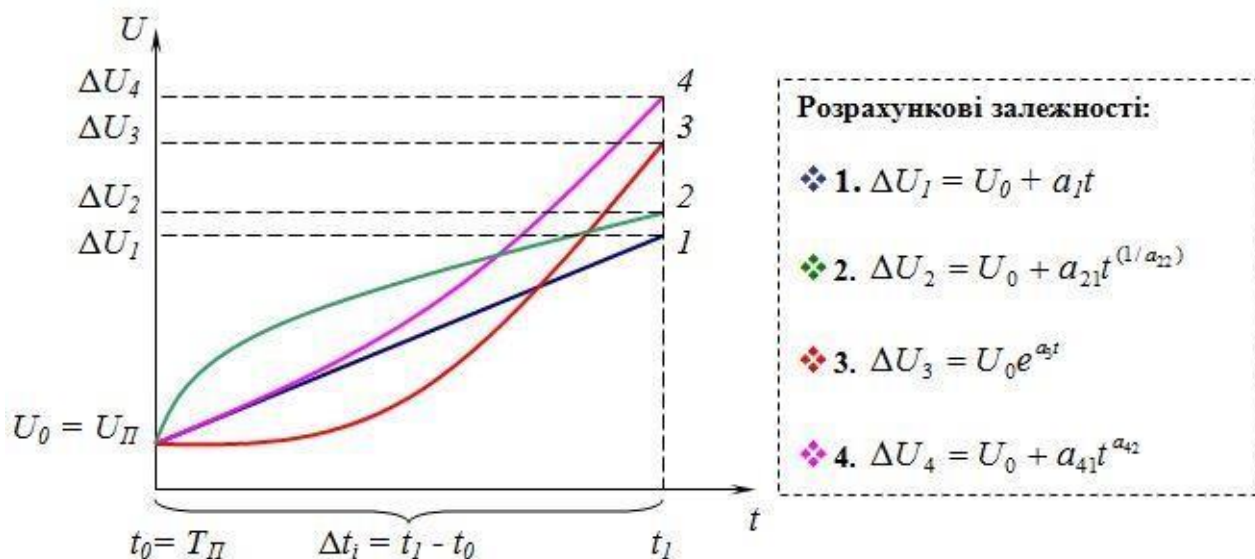


Рис. 2. Дійсні закономірності зношування на стадії нормальної роботи

Поєднання залежностей (1) і (3) у роботі [4] дало змогу отримати модель оптимізації довговічності для простих агрегатів, якими є АПГ, у вигляді такої системи рівнянь:

– раціональний ресурс T_p як добуток раціональної кількості n_p і періодичності t_{TOp} ТО:

$$T_p = n_p \cdot t_{TOp}; \quad (4)$$

– раціональна кількість ТО:

$$n_p = \frac{\beta \cdot (\alpha - 1) \cdot C_{AM}}{C_{TO} \cdot (\beta - 1)}; \quad (5)$$

– раціональна періодичність ТО:

$$t_{TOp} = \left(\frac{U_{GP}}{b \cdot n_p} \right)^{\frac{1}{\alpha}}. \quad (6)$$

Залежності (4)-(6) були отримані з урахуванням таких припущень:

– витрати на ТО в період до капітального ремонту не залежать від періодичності його виконання і прийняті сталими;

– витрати на усунення відмов і несправностей не залежать від напрацювання на відмову та прийняті сталими на весь період до проведення капітального ремонту;

– ТО агрегатів із періодичністю t_{TOp} дає змогу відновити найбільш сприятливі умови зношування, які повертаються до початкових значень.

Наведена модель оптимізації довговічності (залежності (4)-(6)) буде застосована в цьому дослідженні для побудови методики розрахунку раціонального ресурсу АПГ.

Для проведення розрахунків за наведеною моделлю оптимізації невідомим залишається закономірність розвитку зносу деталей АПГ у часі, потрібна для

встановлення коефіцієнтів α та b . Для встановлення такої закономірності скористаємося результатами експлуатаційних випробувань АПГ, результати яких наведені в роботі [8].

Мета та завдання дослідження.

Метою дослідження є розроблення методики розрахунку раціонального ресурсу АПГ на основі вибраної моделі оптимізації довговічності з урахуванням закономірностей зношування плунжерних пар за різних умов мащення.

Завданнями дослідження є:

- розроблення методики розрахунку раціонального ресурсу АПГ;
- проведення порівняльних розрахунків раціонального ресурсу на прикладі насоса 321.224 для різних закономірностей зношування;
- оцінювання впливу покращення якості оливи на величину раціонального ресурсу обраного насоса.

Методика розрахунку раціонального ресурсу АПГ. Методика заснована на моделі оптимізації довговічності (залежності (4)-(6)), враховує експериментальні закономірності зношування плунжерних пар у часі роботи і має таку послідовність дій:

1. *Визначення сумарного граничного зносу $U_{ГР}$.* Для АПГ граничний знос визначають за критерієм зменшення його ефективності, наприклад урахування лише зносу плунжерних пар, – граничний знос слід встановлювати за допустимим значенням об'ємного коефіцієнта корисної дії (ККД) $\eta_{ГР}$, оскільки його визначають через величину зазорів у плунжерних парах.

За умови рівномірного зношування всіх плунжерних пар сумарний граничний знос дорівнює

$$U_{ГР} = N_{ПЛ}(\delta_{ГР} - \delta_0), \quad (7)$$

де $N_{ПЛ}$ – кількість плунжерних пар;

δ_0 – початковий зазор, м;

$\delta_{ГР}$ – граничний зазор, м.

Зв'язок між граничним зазором та об'ємним ККД встановлений через величину витрат оливи за зазором $Q_{ВТ}$ на робочому ході плунжера. Об'ємний ККД насоса пов'язаний із витратами рідини в ньому такою залежністю:

$$\eta_{Об} = \frac{Q_{ПЛ}}{Q_0} = \frac{Q_0 - Q_{ВТ}}{Q_0} = 1 - \frac{Q_{ВТ}}{Q_0}, \quad (8)$$

де $Q_{ПЛ}$ – подавання насоса за номінального тиску та частотою обертів, м³/с;

Q_0 – подавання насоса за мінімального тиску в напірній магістралі та номінальною частотою обертів, м³/с.

За теорією кільцевих ущільнень [9] (власне, зазор у плунжерній парі є кільцевим ущільненням), існує такий зв'язок між витратами рідини та зазором:

$$Q_{ВТ} = \frac{\pi \cdot \kappa \cdot N \cdot \Delta p \cdot d \cdot \delta^3}{12 \cdot \mu \cdot l_{ПЛ}}, \quad (9)$$

де κ_e – коефіцієнт, що враховує ексцентриситет розташування плунжера відносно осі отвору в блоці, $\kappa_e = 1,75$;

Δp – перепад тиску на насосі за номінальної частоти обертів, МПа;

$d_{ПЛ}$ – діаметр плунжера, м;

μ – динамічна в'язкість оливи, Па·с;

$l_{ПЛ}$ – середня довжина зазора, м.

Із залежностей (8) і (9) отримаємо зв'язок між зазором і ККД:

$$\delta = \sqrt[3]{\frac{12 \cdot Q_0 \cdot \mu \cdot l_{ПЛ}}{\pi \cdot \kappa_e \cdot N_{ПЛ} \cdot \Delta p \cdot d_{ПЛ}} (1 - \eta_{Об})}. \quad (10)$$

За залежністю (10) можна визначити значення початкового зазора та граничного зазора. Для цього необхідно замість $\eta_{об}$ підставити відповідні значення початкового та граничного ККД.

2. *Встановлення закономірності зношування плунжерних пар у часі.* Ця закономірність має бути встановлена у вигляді рівняння (2), однак для її практичного застосування слід мати функцію зносу в явному вигляді, тобто з визначеними значеннями коефіцієнтів α та b . Така закономірність може бути отримана лише експериментальним шляхом за проведення стендових або експлуатаційних випробувань АПГ.

3. *Розрахунок раціональної кількості ТО АПГ пр.* Розрахунок виконують за залежністю (5).

4. *Розрахунок раціональної періодичності ТО АПГ т_{то}.* Розрахунок виконують за залежністю (6).

5. *Розрахунок раціонального ресурсу АПГ Т_р.* Розрахунок виконують за залежністю (4).

За розробленою методикою проведено розрахунок раціонального ресурсу аксіально-плунжерного насоса марки 321.224, встановленого як основний агрегат гідравлічної системи екскаватора ЕО-3323. Як вихідні дані застосовували результати експлуатаційних випробувань насоса [8]. Зазначимо, що дані випробування були метою визначення впливу активації робочої рідини електричною обробкою, що призвело до уповільнення зменшення об'ємного ККД насоса внаслідок уповільнення зношування плунжерних пар. Отже, дані роботи [8] дали змогу виконати порівняльний розрахунок раціонального ресурсу насоса для двох фізичних станів робочої рідини: звичайної та активованої електричним полем.

Розрахунок виконували в послідовності, наведений вище. Граничний знос насоса встановлювали за умови падіння його об'ємного ККД на 30 %. Він розрахований за залежністю (7) і має

однакове значення для обох варіантів експлуатації.

Закономірності зношування плунжерних пар насосу встановлювали перерахуванням вимірюваних у випробуваннях значень об'ємного ККД у значення сумарного зносу плунжерних пар на початку та наприкінці випробувань. Для цього використовували залежності (7) і (10). У результаті встановили такі закономірності зношування насоса:

– для варіанта 1 (робота на звичайній оливі)

$$U(t) = 0,0253 t^{1,13}; \quad (11)$$

– для варіанта 2 (робота на активованій оливі)

$$U(t) = 0,0159 t^{1,09}. \quad (12)$$

Остаточні результати розрахунку зведено в таблицю.

Розрахункові значення кількості обслуговувань, періодичності ТО та раціонального ресурсу АПГ отримані для двох варіантів якості робочої гідравлічної оливи. Значення раціонального ресурсу, особливо для варіанта 1, менші за паспортні значення міжремонтного циклу обраного насоса майже вдвічі. Це свідчить про те, що за штатної експлуатації насоса підприємство зазнає додаткових витрат на підтримку працездатного стану. Покращення якості оливи, наприклад її протизношувальних властивостей, шляхом електричної обробки підвищує раціональний ресурс насоса приблизно на 85 %, що підтверджує актуальність забезпечення якості оливи. Зазначимо, що за розрахунків амортизаційних відрахувань одноразові витрати на систему електричної обробки не враховували, але за відносно малої вартості такої системи результати розрахунків за варіантом 2 зміняться незначно.

Результати розрахунку ресурсу насоса

Номер з/п	Параметр	Значення параметра	
		Варіант 1 (звичайна олива)	Варіант 2 (активована олива)
1	2	3	4
Вихідні дані			
1	Амортизаційні відрахування C_{AM} , грн	5000	5000
2	Частка витрат (враховують лише витрати на ТО насоса від загальних) на виконання одного ТО $C_{ТО}$, грн	90	90
3	Коефіцієнти: - α - β - b	1,13 2,5 0,0253	1,09 2,5 0,0159
4	Граничний знос $U_{ГР}$, мкм	68,6	68,6
Розрахункові значення			
5	Кількість обслуговувань за раціональний ресурс n_p	12	8
6	Раціональна періодичність ТО $t_{ТОp}$, год	118	326
7	Раціональний ресурс T_p , год	1416	2608
Приріст раціонального ресурсу за використання електричної обробки оливи склав $\Delta T_p = 1192$ год			

Висновки

1. Розроблена методика розрахунку раціонального ресурсу аксіально-плунжерних гідромашин враховує модель оптимізації довговічності «простих» технічних систем, закономірності зношування відповідальних деталей, а також залежності для розрахунку їхнього граничного зносу.

2. Отримані розрахункові дані підтверджують можливість практичного застосування запропонованої методики визначення раціонального ресурсу АПГ.

Методика може бути застосована для всіх типів АПГ – гідравлічних насосів і моторів, насосів високого тиску паливних систем дизельних двигунів та інших аналогічних гідромашин.

3. За результатами порівняльного розрахунку підтверджено актуальність напрямів підвищення раціонального ресурсу АПГ шляхом покращення якості гідравлічних олив в експлуатаційних умовах, до яких належать електрична обробка, дозоване уведення присадок, очищування від механічних домішок і води.

Список використаних джерел

1. Фінкельштейн З. Л., Андренко П. М., Дмитрієнко О. В. Експлуатація, обслуговування та надійність гідравлічних машин і гідроприводів : навч. посіб. / за ред. П. М. Андренка. Харків: Видавничий центр НТУ «ХПІ», 2014. 308 с.

2. Design and experimental studies of a novel double-row radial piston pump / Zh. Shengdun, T. Guo, Y. Yu and oth. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. 2015. Vol. 231(10). P. 1884–1896. DOI: 10.1177/0954406215623309.

3. Optimization maintenance performance level through collaboration of overall equipment effectiveness and machine reliability / F. Rahman, S. Sugiono, A. A. Sonief, O. Novareza. *Journal of Applied Engineering Science*. 2022. Vol. 20(3). P. 1-20. DOI: 10.5937/jaes0-35189.

4. Шейнин А. М., Шейнин В. А. Алгоритмы и программы решения оптимальных задач надежности машин. Москва: МАДИ, 1981. 112 с.

5. Farahani A., Tohidi H., Shoja A. An integrated optimization of quality control chart parameters and preventive maintenance using Markov chain. *Advances in Production Engineering & Management*. 2019. Vol. 14(1). P. 5–14. DOI: 10.14743/apem2019.1.307.

6. Vukovic M., Murrenhoff H. The next generation of fluid power systems. *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 106. P. 2-7. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.06.002.

7. Зорин В. А. Основы долговечности строительных и дорожных машин. Москва: Машиностроение, 1986. 248 с.

8. Лисіков Є. М., Воронін С. В. Експлуатаційні випробування аксіально-поршневих насосів в умовах обробки РР зовнішнім ЕП. *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*. Харків: УкрДАЗТ, 2004. Вип. 58. С. 58-62.

9. Lorenz B., Persson B. N. J. Leak rate of seals: Comparison of theory with experiment. *EPL (Europhysics Letters)*. 2009. Vol. 86(4):44006. DOI: 10.1209/0295-5075/86/44006.

Воронін Сергій Володимирович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту.

ORCID iD: 0000-0001-8443-3222. Тел.: +38(095)500-81-59. E-mail: voronin.sergey@ukr.net.

Стефанов Володимир Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри машинобудування та

технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту.

ORCID iD: 0000-0002-7947-2718. Тел.: +38(068)819-84-27. E-mail: vstef@ukr.net.

Васянович Роман Сергійович, аспірант кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0003-8582-151X. Тел.: +38(097)288-28-46. E-mail: vas.romuch@gmail.com.

Трифонов Тарас Вікторович, аспірант кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0006-1415-8767. Тел.: +38(050)401-45-48. E-mail: ttrifonov81.tt@gmail.com.

Півоваров Сергій Олександрович, магістр з галузевого машинобудування. ORCID iD: 0009-0005-7813-3537. Тел.: +38(067)414-26-88. E-mail: pivovarov.s.ua@gmail.com.

Voronin Serhii, Dr. Sc. (Tech.), professor, Head of the Department of Mechanical Engineering and Technical Service of Machines, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0001-8443-3222. Tel.: +38 (095)500-81-59. E-mail: voronin.sergey@ukr.net.

Stefanov Volodymyr, PhD (Tech), associate professor, Department of Mechanical Engineering and Technical Service of Machines, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-7947-2718.

Tel.: +38 (068)819-84-27. E-mail: vstef@ukr.net.

Vasianovych Roman, postgraduate student, department of mechanical engineering and technical service of machines, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0009-0003-8582-151X. Tel.: +38(097)288-28-46. E-mail: vas.romuch@gmail.com.

Tryfonov Taras, postgraduate student, department of mechanical engineering and technical service of machines, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0009-0006-1415-8767. Tel.: +38(050)401-45-48.

E-mail: ttrifonov81.tt@gmail.com.

Pivovarov Sergii, master's degree in industrial mechanical engineering. ORCID iD: 0009-0005-7813-3537.

Tel.: +38(067)414-26-88. E-mail: pivovarov.s.ua@gmail.com.

Статтю прийнято 14.05.2024 р.