

УДК 629.4.014.2:621.89

РОЗРАХУНОК ПОДАВАННЯ МАСТИЛЬНОГО МАТЕРІАЛУ В МОТОРНО-ОСЬОВИЙ ПІДШИПНИК ЛОКОМОТИВА ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ПРИМУСОВОГО ЗМАЩЕННЯ

Канд. техн. наук В. О. Стефанов, асп. А. Д. Савченко

CALCULATION OF LUBRICANT SUPPLY TO THE MOTOR-AXLE BEARING OF A LOCOMOTIVE USING FORCED LUBRICATION

PhD (Tech) V. Stefanov, postgraduate student A. Savchenko

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.212.2025.336422>



Анотація. Моторно-осьовий підшипник (МОП) тягового електродвигуна локомотива є одним із найбільш навантажених вузлів екіпажної частини, що працює в умовах високих динамічних навантажень, температурних коливань і вібрацій. Встановлено, що недостатній рівень подавання мастильного матеріалу спричиняє порушення гідродинамічного режиму

мащення, що веде до інтенсивного зношування вкладишів, зниження несучої здатності мастильного шару та, як наслідок, скорочення ресурсу підшипника. Це може призвести до його аварійного виходу з ладу, що унеможливорює подальшу експлуатацію локомотива і створює загрозу порушення безпеки руху. У статті розглянуто питання розрахунку оптимального подавання осьової оливи в моторно-осьові підшипники тягових електродвигунів тепловоза серії 2ТЕ116. Запропоновано підхід для формування математичної моделі з визначення необхідних витрат мастильного матеріалу з урахуванням умов експлуатації локомотива, таких як швидкість руху та інтенсивність адсорбційних процесів на поверхнях тертя. Наведено результати чисельних розрахунків, які можуть бути використані для вдосконалення сучасних систем подавання мастила та підвищення надійності роботи моторно-осьових підшипників у тягових електродвигунах.

Ключові слова: моторно-осьовий підшипник, підшипник ковзання, мастильна плівка, система змащування.

Abstract. The motor-axle bearing (MAB) of a locomotive traction motor represents one of the most critically loaded elements of the locomotive's running gear, experiencing substantial dynamic loads throughout its operational life. Continuous exposure to these loads, particularly under varying locomotive speeds and operational conditions, imposes strict requirements on the effectiveness of the bearing's lubrication system. Insufficient supply of lubricant has been identified as a major factor leading to accelerated wear of the bearing liners, a significant decrease in service life, and, consequently, premature bearing failure. Such failures compromise the reliability and operational capability of the locomotive as a whole, resulting in increased maintenance costs and potential operational downtime.

This article addresses the problem of determining the optimal axial oil supply rate to motor-axle bearings in the traction motors of the 2TE116 diesel locomotive. A comprehensive mathematical model has been developed, which allows for the calculation of the required oil flow rate based on critical operational parameters, including locomotive speed, load variations, and ambient conditions, as well as considering the structural characteristics of the lubrication system. The model integrates key tribological principles, including hydrodynamic lubrication theory and bearing surface protection under real-world operational conditions.

The study presents detailed calculation results, highlighting the relationships between operational modes and lubricant consumption rates. The findings demonstrate the importance of adjusting the lubrication supply dynamically in accordance with the locomotive's operational profile. Implementation of the proposed methodology could lead to significant improvements in lubrication efficiency, reduction in bearing wear, and substantial extension of the motor-axle bearing service life. Furthermore, the outcomes of this research provide practical recommendations for optimizing existing lubrication systems and inform the design of more reliable bearing assemblies for future locomotive models.

Keywords: motor-axial bearing, sliding bearing, oil film, lubrication system.

Вступ. Деталі моторно-осьових підшипників (МОП) тягових електродвигунів локомотивів є одними з найбільш відповідальних елементів екіпажної частини рухомого складу, що безпосередньо впливають на його технічний стан, надійність і безпеку експлуатації. Протягом усього періоду роботи

локомотива, включно з пусковими режимами, прискоренням, рівномірним рухом і гальмуванням, МОП зазнають значних змінних динамічних навантажень, характерних для широкого діапазону швидкостей — від 0 до 80 км/год.

На сучасному етапі розвитку тягового рухомого складу систему змащення

моторно-осьових підшипників тепловозів серії 2TE116 вважають однією з найбільш ефективних серед наявних аналогічних рішень. Вона базована на принципах примусового змащення за допомогою шестеренних насосів, що забезпечують подавання мастильного матеріалу безпосередньо до зон найбільшого тертя.

Однак, попри високий рівень технічної реалізації зазначеної системи, у її конструкції та експлуатаційних характеристиках залишаються певні недоліки, що обмежують ефективність роботи МОП за тривалих експлуатаційних умов. Однією з основних проблем є недостатня інтенсивність подавання мастильного матеріалу до зон безпосереднього контакту робочих поверхонь тертя. Це спричиняє формування мастильної плівки критичної або недостатньої товщини, яка не може повною мірою виконувати свої функції зменшення тертя і запобігання зносу.

Така ситуація призводить до прискореного зношення вкладишів підшипників, розвитку мікропошкоджень контактних поверхонь і зниження загального експлуатаційного ресурсу моторно-осьових підшипників. Крім того, виникає ризик розвитку втомних дефектів, які можуть суттєво впливати на безпечність експлуатації локомотивів.

Через виявлені недоліки існує об'єктивна необхідність у подальшому вдосконаленні системи змащення МОП локомотивів серії 2TE116. Основними напрямками покращення мають стати оптимізація витрат мастильного матеріалу, забезпечення його стабільного подавання незалежно від зовнішніх умов експлуатації, а також використання новітніх мастильних матеріалів із підвищеними антифрикційними властивостями і здатністю утворювати стійкі адсорбційні плівки на поверхнях тертя. Упровадження таких заходів дасть змогу суттєво підвищити надійність, довговічність і ремонтпридатність моторно-осьових

підшипників у складних умовах експлуатації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Упродовж останніх років у галузі залізничного транспорту проведено велику кількість досліджень, спрямованих на вивчення закономірностей процесів змащування моторно-осьових підшипників локомотивів. Отримані наукові результати свідчать, що сучасні конструкції систем змащення не завжди забезпечують стабільне підтримання оптимального режиму мащення в зонах тертя робочих поверхонь, що теж негативно впливає на надійність, довговічність і безпеку експлуатації підшипникових вузлів рухомого складу, зокрема за важких умов змінних навантажень і широкого діапазону робочих швидкостей [1].

У ряді досліджень [2, 3] науковці акцентують на перспективності впровадження примусових насосних систем для забезпечення подавання мастильного матеріалу безпосередньо в зону контакту поверхонь тертя. Застосування подібних систем спрямоване на створення стійкої мастильної плівки необхідної товщини, яка здатна мінімізувати явища сухого тертя, знижувати рівень контактних напружень і, відповідно, зменшувати інтенсивність зносу. Однак слід зазначити, що більшість проведених досліджень зосереджені переважно на підшипниках, які працюють у відносно сприятливих умовах із невисокими навантаженнями та помірною швидкістю ковзання.

За специфічних умов експлуатації моторно-осьових підшипників тягових електродвигунів тепловозів серії 2TE116, які зазнають значних змінних навантажень і впливу вібрацій, спостерігають режим граничного змащення з частковим руйнуванням адсорбційного шару мастильного матеріалу. За даними роботи [4], часткове руйнування адсорбованого мастильного шару розглядають як один із основних чинників, що призводить до прогресуючого зносу контактних поверхонь

підшипників і скорочення їхнього експлуатаційного ресурсу.

Нині на залізничному транспорті України у процесі експлуатації тепловозів 2ТЕ116 широко застосовувана система циркуляційного змащення моторно-осьових підшипників. Проте аналіз експлуатаційних характеристик цієї системи виявляє низку суттєвих недоліків: недостатню інтенсивність подавання мастильного матеріалу до критичних зон тертя, високу ймовірність забруднення мастила, поступову деградацію мастилопровідних властивостей гнотових елементів, чутливість до сезонних коливань температури, що може призводити до загусання чи навіть замерзання мастильного матеріалу в зимовий період.

Крім того, слід зазначити, що використання традиційних осьових олів без спеціальних протизношувальних присадок значно обмежує можливості стабільного формування ефективного мастильного шару, що забезпечує надійний захист поверхонь тертя. Застосування спеціальних протизношувальних присадок сприяє покращенню адсорбційних властивостей мастильного матеріалу та забезпечує поступове збільшення товщини захисного шару протягом експлуатації, що позитивно впливає на зносостійкість підшипникових вузлів [5].

У роботі [6] досліджено визначення параметрів контактної взаємодії в підшипниках ковзання, що функціонують у вузлах електровозів. Водночас у межах цього дослідження основну увагу приділено визначенню параметрів контактної взаємодії для підшипникових вузлів тепловоза 2ТЕ116, обладнаного циркуляційною системою змащення. Таке завдання обумовлено відмінностями в конструктивному виконанні та експлуатаційних умовах тепловозного рухомого складу, що безпосередньо впливають на напружено-деформований стан і трибологічні характеристики контактуючих поверхонь.

Ураховуючи викладене, слід зазначити, що результати наведених наукових досліджень мають надзвичайно важливе значення для подальшого розроблення ефективних систем змащення для підшипників ковзання, що працюють у тяжких експлуатаційних умовах підвищених навантажень. Зокрема, моторно-осьові підшипники тепловозів 2ТЕ116 є перспективним об'єктом для впровадження удосконалених методів примусового змащення. Поглиблений аналіз процесів формування, деградації та відновлення мастильної плівки на контактних поверхнях, а також оптимізація системи подавання мастильного матеріалу можуть істотно підвищити надійність, збільшити ресурс і покращити експлуатаційні характеристики підшипникових вузлів у складних умовах експлуатації на залізничному транспорті.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою роботи є визначення оптимального подавання мастильного матеріалу для моторно-осьового підшипника тепловоза 2ТЕ116 з урахуванням адсорбційних процесів, що відбуваються на поверхнях тертя, для забезпечення стабільних умов змащування та підвищення експлуатаційної надійності вузла.

Основна частина дослідження. На тепловозах 2ТЕ116 реалізована циркуляційна система змащування моторно-осьового підшипника (МОП). Ця система має низку істотних недоліків, що обмежують її функціональність та ефективність у складних експлуатаційних умовах. Зокрема, подавання мастильного матеріалу в системі є жорстко залежним від кутової швидкості обертання шийки колісної пари. Особливо критичним є режим запуску, коли подавання мастила насосом починається лише з досягненням локомотивом швидкості 25 км/год. До цього моменту змащування здійснюється виключно польстерною системою, не здатною забезпечити повноцінний захист

від масляного дефіциту в зоні контакту поверхонь тертя, особливо після тривалих зупинок. Це вказує на необхідність вдосконалення системи змащення, зокрема шляхом впровадження масляного насоса примусової дії, функціонування якого не залежить від швидкості обертання колісної пари та дає змогу забезпечити адаптивне подавання мастила відповідно до поточного стану підшипникового вузла. Для цього розраховуємо подавання мастильного матеріалу до МОП.

Визначення режиму подавання мастильного матеріалу в моторно-осьовий підшипник (МОП) тепловоза 2ТЕ116 базовано на детальному врахуванні адсорбційних процесів, які виникають на поверхнях тертя в результаті взаємодії з мастильним матеріалом. Основним критерієм для визначення оптимальних умов є мінімізація концентрації молекул поверхнево-активних речовин (ПАР) у мастильному шарі діаметрального зазора підшипника під час його обертання. Слід зазначити, що на поверхнях тертя колісної пари завдяки руху спостерігають втрату молекул ПАР, що призводить до змін у характеристиках мастильного шару.

Припускають, що за кожен повний оберт осі колісної пари відбувається втрата певного об'єму молекул ПАР із замкненого простору мастильного шару. Цей об'єм критично важливий для підтримання мінімальної необхідної товщини адсорбційної мастильної плівки. Така плівка є необхідною умовою для ефективного захисту поверхонь тертя від прямого контакту, що може спричинити швидке зношування або навіть пошкодження підшипника.

З огляду на конструктивні особливості МОП тепловоза 2ТЕ116, які включають особливості взаємодії осі колісної пари з мастильним матеріалом, для забезпечення належної функціональності підшипників необхідно постійно оновлювати мастильний матеріал. Оновлення має включати підтримку постійної концентрації активних молекул ПАР у мастильному шарі, що дає

змогу забезпечити стабільну роботу підшипників і мінімізувати механічні втрати від тертя.

За методикою [6] розраховуємо необхідне подавання мастильного матеріалу для моторно-осьового підшипника:

$$Q = V_{\Delta}/t, \quad (1)$$

де V_{Δ} – об'єм мастильного матеріалу в зазорі, м³;

t – час обертання осі без заміни мастильного матеріалу в зазорі, с.

Об'єм мастильного матеріалу в зазорі визначають як

$$V_{\Delta} = \pi \cdot \Delta \cdot L \cdot (R_{oc} \cdot \frac{\Delta}{4}), \quad (2)$$

де Δ – діаметральний зазор, мм;

L – довжина підшипника, м;

R_{oc} – радіус осі, м.

Час обертання осі без заміни мастильного матеріалу

$$t = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{\omega}, \quad (3)$$

де n – кількість обертів без заміни мастильного матеріалу до досягнення граничної концентрації ПАР;

ω – кутова швидкість обертання осі.

Кількість обертів n без заміни мастильного матеріалу до досягнення граничної концентрації ПАР визначають за методикою [6] і з використанням даних роботи [7]. Результати розрахунку виконано для різної величини діаметрального зазора Δ (рис. 1).

Для розрахунку необхідного подавання мастильного матеріалу до МОП використовуємо такі дані:

- кутова швидкість обертання осі $\omega = 0,39$ рад/с, що відповідає швидкості локомотива в межах 0-80 км/год;
- довжина підшипника $L = 0,16$ м;
- радіус осі $R_{oc} = 0,095$ м;

- кількість обертів n визначаємо за рис. 1 відповідно до величини діаметрального зазора Δ .

Результати розрахунку подавання мастильного матеріалу наведено на рис. 2.

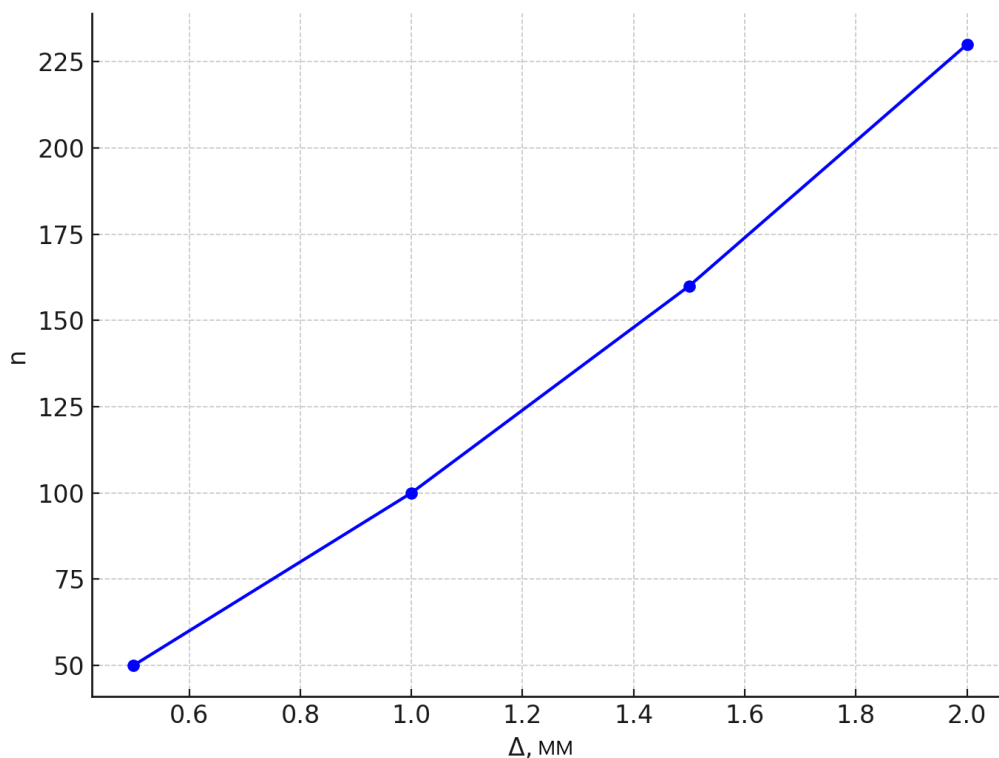


Рис. 1. Графік залежності кількості обертів осі без заміни мастильного матеріалу до досягнення граничної концентрації ПАР залежно від величини діаметрального зазора

Аналіз отриманих результатів, поданих на графіку (рис. 2), свідчить про те, що необхідний об'єм подавання мастильного матеріалу до моторно-осьового підшипника локомотива є функцією двох основних параметрів — швидкості руху та величини діаметрального зазора. Зі зростанням швидкості обертання осі зростає і потреба в мастилі, що зумовлено інтенсифікацією гідродинамічних процесів у зоні тертя.

Максимальних значень витрати мастильного матеріалу досягають за швидкості руху локомотива 80 км/год за умови діаметрального зазора $\Delta = 2$ мм, що складають $Q = 0,96$ дм³/хв. Це свідчить про

підвищену інтенсивність витрат мастила за високих швидкостей обертання, що зумовлює необхідність забезпечення відповідного рівня подавання для підтримання безперервного гідродинамічного змащування.

У діапазоні низьких швидкостей (до 25–30 км/год) витрати мастильного матеріалу змінюються в межах $Q = 0,05–0,36$ дм³/хв залежно від величини діаметрального зазора. Отримані результати підтверджують необхідність адаптивного керування подаванням мастила з урахуванням фактичного режиму руху локомотива і стану підшипникового вузла.

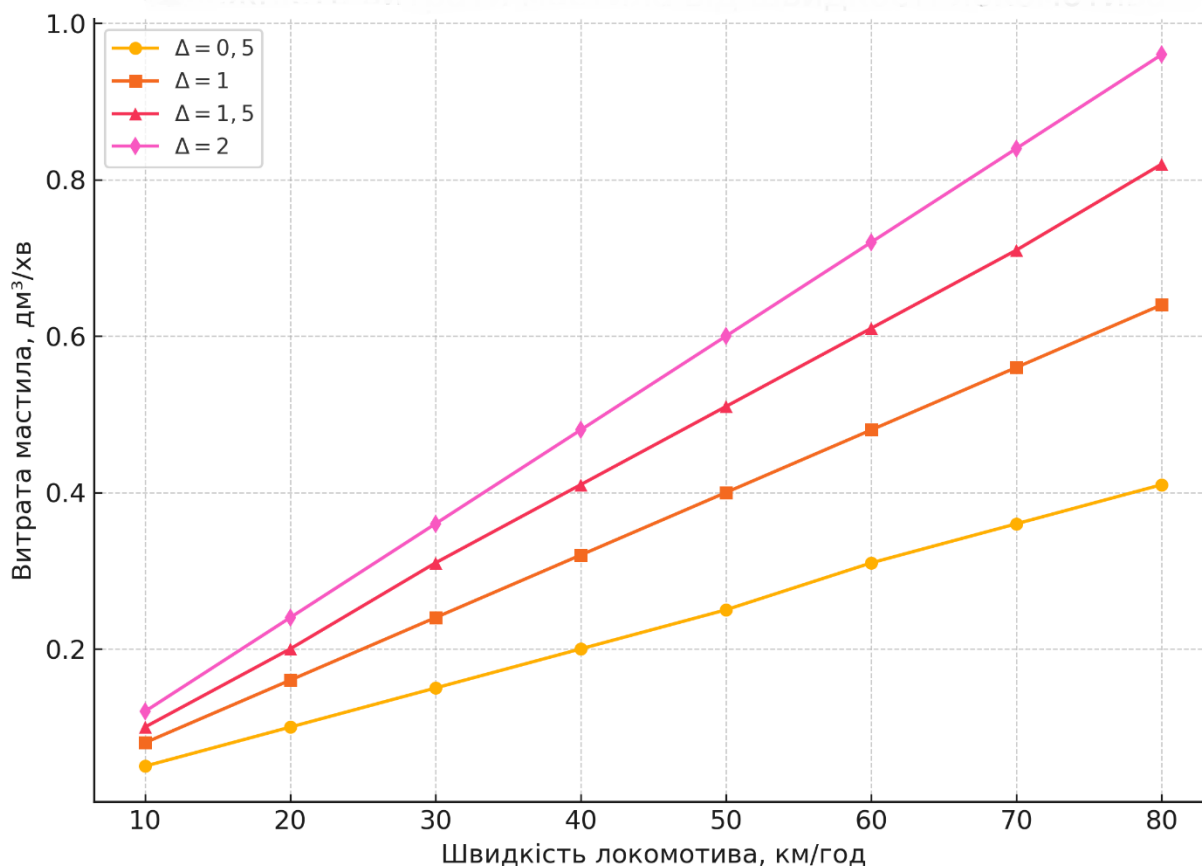


Рис. 2. Графік розрахунку необхідного подавання мастильного матеріалу до МОП залежно від швидкості руху локомотива та величини діаметрального зазора

Висновки. Проаналізовані залежності необхідного об'єму подавання мастильного матеріалу до моторно-осьового підшипника тепловоза 2ТЕ116 від швидкості руху локомотива та величини діаметрального зазора дали змогу встановити критичні умови змащування, що впливають на надійність роботи підшипникового вузла. Встановлено, що зі збільшенням швидкості руху до 80 км/год і величиною діаметрального зазора $\Delta = 2$ мм витрати мастильного матеріалу досягають максимального значення $Q = 0,96$ дм³/хв, тоді як за низьких швидкостей (до 30 км/год) витрати істотно зменшуються до рівня $Q = 0,05\text{--}0,36$ дм³/хв.

Це свідчить про необхідність перегляду принципів подавання мастила в циркуляційній системі змащування МОП, оскільки її робота дуже залежна від швидкості обертання колісної пари та не враховує реальні експлуатаційні навантаження і стан вузла. Для забезпечення стабільного гідродинамічного режиму змащування, особливо за низьких швидкостей і після тривалих зупинок, доцільним є впровадження системи примусового подавання мастильного матеріалу, незалежної від швидкості руху локомотива. Це дасть змогу підвищити ефективність і надійність роботи моторно-осьових підшипників і зменшити ризик їхнього передчасного зносу.

Список використаних джерел

1. Стефанов В., Савченко А. Аналіз існуючих систем змащування моторно-осьових підшипників. *Proceedings of the XIV International Scientific and Practical Conference*. Copenhagen, Denmark. 2023. P. 403-404.
2. Lubricant distributions and lubrication state under regular and quantitative oil supply / L. Wenzhe et al. *Tribology International*. 2023. Vol. 43, No. 5. P. 506-516. URL: <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2022002> (last access: 12.04.2025).
3. Zhu J., Li H. Numerical analysis on the start behavior of rough journal bearings during the gear pump meshing cycle. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J*. 2020. Vol. 234, No. 8. P. 1275-1295. URL: <https://doi.org/10.1177/1350650120908116> (last access: 07.04.2025).
4. Li H., Cao J. The tribological properties of bearing alloys under oil lubrication. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C*. 2020. Vol. 234, No. 10. P. 2042-2052. URL: <https://doi.org/10.1177/0954406220902168> (last access: 10.04.2025).
5. Adsorption Characteristics and Mechanical Responses of Lubricants Containing Polymer Additives under Fluid Lubrication with a Narrow Gap / Otsuka M., Nishimura S. et al. *Langmuir*. 2024. Vol. 40, No. 2. P. 215–227. URL: <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.3c03725> (last access: 12.04.2025).
6. Груник І. С. Розрахунок подачі осьової оливи в моторно-осьовий підшипник локомотива з урахуванням адсорбційних явищ на поверхнях тертя. *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*. Харків: УкрДАЗТ 2013. Вип. 136. С. 77-82.
7. Лысыков Е. Н., Косолапов В. Б., Воронин С. В. Расчет толщины адсорбированных слоев молекул ПАВ на поверхностях. *Автомобильный транспорт: збірник наукових праць ХНАДУ*. 2001. № 7-8. С. 95-99.

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.

Савченко Андрій Дмитрович, аспірант кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0005-0418-3945. Тел.: +38(050) 90-58-406. E-mail: 0509058406a@gmail.com.

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.

E-mail: vstef@ukr.net.

Andrii Savchenko, postgraduate student, Department of Mechanical Engineering and Technical Service of Machines, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0009-0005-0418-3945.

E-mail: 0509058406a@gmail.com.

Статтю прийнято 29.05.2025 р.