

УДК 539.538: 539.621

DOI: 10.18372/0370-2197.3(96).16832

М. В. ЧЕРНЕЦЬ, А. О. КОРНІЄНКО, Ю. М. ЧЕРНЕЦЬ

*Національний авіаційний університет, Київ***ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОРИГУВАННЯ ЗУБІВ ЦИЛІНДРИЧНИХ КОСОЗУБИХ МЕТАЛОПОЛІМЕРНИХ ПЕРЕДАЧ НА НЕСІВНУ ЗДАТНІСТЬ ТА ДОВГОВІЧНІСТЬ: ЧАСТ. 2. ДОВГОВІЧНІСТЬ ПЕРЕДАЧ**

*Згідно авторського методу розрахунку металевих і металоолімерних зубчастих передач проведено дослідження впливу висотного коригування зачеплення циліндричних косозубих передач на довговічність. При різних кутах нахилу зубів і коефіцієнтах коригування зубів проведено оцінку довговічності металоолімерних передач з колесом з двох видів поліамідів. Встановлено кількісні і якісні закономірності впливу обох чинників на мінімальну довговічність з урахуванням парності зачеплення зубів. Встановлено, що у передачі з колесом з поліамідного композиту PA6+30CF довговічність буде до 2.4 рази вищою, ніж з ненаповненого поліаміду PA6 і не залежатиме від величини коефіцієнтів коригування зубів. На довговічність передачі суттєво впливають як коригування зачеплення, так і кут нахилу зубів. Отримано кількісні і якісні закономірності цього впливу. Встановлено наявність оптимуму коефіцієнтів коригування зубів, при якому довговічність передачі буде найвищою.*

**Ключові слова:** *сухе тертя, металоолімерні циліндричні косозубі передачі, поліамід PA6 та вуглекомполімер PA6+30CF, висотне коригування зачеплення, довговічність передач*

**Вступ.** При коригуванні зачеплення зубчастих передач відбувається зниження контактних та згинальних напружень, а також підвищується їх довговічність. Проте у літературі відсутні методи її розрахункової оцінки у випадку некоригованих, а тим більше коригованих металоолімерних (МП) передач. Лише у [1, 2] було розглянуто спрощений метод розрахунку зносостійкості некоригованої МП передачі при сухому терті з використанням закону абразивного зношування Архарда. У працях [3, 4] методом скінчених елементів досліджено зношування металевої передачі з висотним коригуванням зачеплення.

Оскільки дослідження впливу коригування зачеплення циліндричних МП передач на їх довговічність є важливим для інженерної практики, то було розроблено відповідний метод їх розрахунку [5, 6]. Він є модифікацією методів дослідження металевих зубчастих передач [7 – 14], які, в свою чергу, базуються на методології дослідження зносостійкості матеріалів при терті ковзання [15 – 17] за фрикційно – втомним механізмом. У літературі [3, 4] натомість для дослідження зношування таких передач використовують закон адгезійно – абразивного зношування Архарда, яке, як правило, не є характерним для цієї триботехнічної системи.

У статті наведено результати дослідження МП передач з шестернею зі сталі 45 та зубчастим колесом – з ненаповненого поліаміду PA6 або його композиту PA6+30CF, наповненого короткими вуглеволокнами.

Згідно розробленого методу розрахунку МП зубчастих передач на їх несівну здатність, зносостійкість і довговічність проведено комплексне дослідження впливу висотного коригування зачеплення циліндричних косозубих передач на

вказані службові характеристики. При цьому враховано вплив на них таких важливих чинників, як умови зачеплення зубів та їх зношування у процесі експлуатації. У результаті такого моделювання при проектуванні МП зубчастих передач можливо провести їх оптимізацію за критеріями: контактної міцності зубів, їх зношування, довговічності. Методи, що дозволяють вирішити задачу дослідження цих зубчастих передач з урахуванням умов зачеплення зубів, коригування зачеплення та впливу зношування зубів на вказані контактні і триботехнічні характеристики у літературі відсутні.

**Метод дослідження.** Дослідження проведено згідно розрахункового методу циліндричних косозубих МП передач на несівну здатність, зносостійкість і довговічність, поданого у [5, 6, 18].

У передачах з висотним коригуванням зачеплення коефіцієнти коригування  $x_1 = -x_2$ , сумарний коефіцієнт  $x_\Sigma = x_1 + x_2 = 0$ , міжосьова відстань  $a = r_1 + r_2$  та торцевий кут зачеплення  $\alpha$ , залишаються такими, як у косозубій передачі без зміщення. Змінюються тільки радіуси виступів зубів

$$r_{a1} = r_1 + (1 + x_1)m, \quad r_{a2} = r_2 + (1 + x_2)m, \quad (1)$$

де  $r_1, r_2$  – відповідно, радіуси ділільних кіл шестерні і колеса.

Усі інші параметри передачі є, як у некоригованій передачі.

При експлуатації зубчастої передачі внаслідок проковзування зубів у зачепленні неминуче виникає їх зношування, що приводить до зниження початкових максимальних контактних тисків  $p_{j\max}$ . При дослідженні довговічності МП зубчастої передачі ця обставина враховується шляхом використання двох процедур:

- 1) За умови  $p_{j\max} = \text{const}$  протягом першої контактної взаємодії зубів, а надалі вони змінюватимуться при кожній наступній взаємодії.
- 2) За умови  $p_{j\max} = \text{const}$  протягом певної кількості взаємодій зубів (блоці взаємодій).

Перша процедура забезпечує точне рішення. Однак тривалість обчислень є значною. Друга процедура є раціональнішою, бо дає достатньо близьке до точного рішення задачі при суттєво меншій тривалості обчислень.

Для кількості обертів  $n_{1s}$  шестерні і  $n_{2s}$  колеса, яким відповідатиме відповідна кількість блоків  $B$  взаємодії прийнятого розміру зі сталими умовами контакту, сумарні лінійні зношування  $h_{1jn}$  та  $h_{2jn}$  зубів коліс в  $j$ -их точках співдотику розраховано за формулами

$$h_{1jn} = \sum_1^{n_{1s}} h_{1jB}, \quad h_{2jn} = \sum_1^{n_{2s}} h_{2jB}, \quad (2)$$

де  $n_{2s} = n_{1s} / u$ ;  $h_{kjB} = \sum h'_{kj}$  – зношування зубів в кожному блоці їх взаємодії; відповідно їх величини протягом окремого акту контакту обчислюють за методикою [10 - 12, 14, 18].

Тоді при зміні початкових контактних тисків  $p_{j\max}$  внаслідок зношування зубів тривалість роботи передачі  $t_B$  при кількості обертів  $n_{1s}$  чи  $n_{2s}$  коліс розраховано таким чином:

$$t_B = n_{1s} / 60n_1 = n_{2s} / 60n_2. \quad (3)$$

**Результати чисельного дослідження.** Прийнято такі дані для розрахунку:  $T_{nom} = 4000$  Нмм – номінальний крутний момент,  $n_1 = 700$  об/хв – число обертів шестерні;  $n_{2s} = n_{1s} / u$  – число обертів шестерні;  $m = 4$  мм – модуль зачеплення,  $u = 3$  – передавальне відношення передачі,  $z_1 = 20$  – число зубів шестерні,  $z_2 = 60$  – число зубів колеса,  $b = 50$  мм – ширина шестерні,  $\beta = 0^0, 5^0, 10^0$  – кут нахилу зубів;  $h_{2*} = 0.5$  мм – допустиме зношування зубів полімерного колеса. Коефіцієнти висотного коригування  $x_1 = -x_2 = 0, 0.1, 0.2, 0.3$ ;  $a = 160$  мм – міжосьова відстань,  $\alpha = 20^0$  – нормальний кут зачеплення.

Для розв'язку задачі тут використано блокову процедуру розрахунку, засади реалізації якої подано у [5, 6, 12, 18]. Прийнято блок незмінних умов роботи  $B = 420000$  обертів шестерні (10 годин роботи).

Характеристики матеріалів коліс МП зубчастих передач:

– Шестерня: сталь 45 нормалізація, шліфування,  $E_1 = 2.1 \cdot 10^5$  МПа – модуль Юнга,  $\nu_1 = 0.3$  коефіцієнт Пуасона;  $C_1 = 10^9$ ,  $m_1 = 2$  – характеристики зносостійкості,  $\tau_{s1} = 365$  МПа – границя міцності при зрізі.

– Зубчасте колесо: поліамід РА6,  $E_2 = 2300$  МПа,  $\nu_2 = 0.4$ ;  $C_2 = 1.34 \cdot 10^6$ ,  $m_2 = 1.15$ ,  $\tau_{s2} = 40$  МПа;  $f = 0.23$  – коефіцієнт тертя; поліамідний композит РА6+30CF, наповнений 30% дрібного вуглеволокна,  $E_2 = 3300$  МПа,  $\nu_2 = 0.41$ ;  $C_2 = 3.67 \cdot 10^6$ ,  $m_2 = 1.15$ ,  $\tau_{s2} = 40$  МПа;  $f = 0.25$ .

Зносостійкість матеріалів металополімерних трибопар була встановлена за схемою pin-on-disk в умовах сухого тертя згідно стандарту ISO 7148-2 ( $T = 23 \pm 1^0\text{C}$ , відносна вологість повітря  $50 \pm 5\%$ ).

Результати досліджень впливу коригування зачеплення та кута  $\beta$  нахилу зубів на мінімальну довговічність  $t_{Bmin}$  МП передач з обох видів поліамідів подано на рис. 1. Мінімальною довговічністю є довговічність у точці зачеплення зубів, де досягається задане допустиме лінійне зношування  $h_{2*} = 0.5$  мм зубів полімерного колеса.

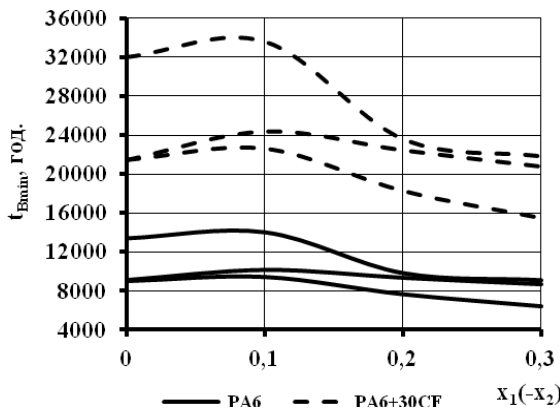


Рис. 1. Вплив коригування зубів на  $t_{Bmin}$  МП передач при нахилі зубів:  $\beta = 0^0$  – нижні криві,  $\beta = 5^0$  – середні криві,  $\beta = 10^0$  – верхні криві; суцільна лінія – колесо з РА6, штрихова – колесо з РА6+30CF

Різновидність поліаміду колеса значно впливає на довговічність МП передачі. Суттєво більшими (у 2,4 рази) будуть довговічності  $t_{B\min}$  передачі з колесом з PA6+30CF, ніж з PA6 при усіх кутах нахилу зубів незалежно від коефіцієнтів коригування  $x_1 = -x_2$ . При коригуванні наявний оптимум коефіцієнтів, при якому довговічність передачі буде найвищою. При усіх кутах нахилу зубів це спостерігається при  $x_1 = -x_2 = 0.1$ .

У прямозубій передачі з  $\beta = 0^\circ$  коригування зачеплення буде доцільним лише з коефіцієнтами  $x_1 = -x_2 = 0.1$  і тоді  $t_{B\min}$  передачі зросте у 1,054 рази. У косозубій передачі з  $\beta = 5^\circ$  приріст довговічності складає 1.12 рази при  $x_1 = -x_2 = 0.1$  і лише 1.026 рази при  $x_1 = -x_2 = 0.2$ . У косозубій передачі з  $\beta = 10^\circ$  коригування зачеплення буде доцільним лише при  $x_1 = -x_2 = 0.1$  при три – дво – трипарному зачепленні зубів і збільшення довговічності складатиме 1.05 рази. Надалі при переході до дво – одно - двопарного зачеплення збільшення  $x_1 = -x_2$  приводить до суттєвого зниження довговічності передачі. Наведені результати свідчать що лише при куті нахилу зубів  $\beta = 5^\circ$  можливий помітніший приріст довговічності коригованої передачі при коефіцієнтах  $x_1 = -x_2 = 0.1$ .

На рис. 2 наведено діаграми залежності довговічності прямозубих і косозубих МП передач з різними кутами нахилу зубів при коригуванні зачеплення.

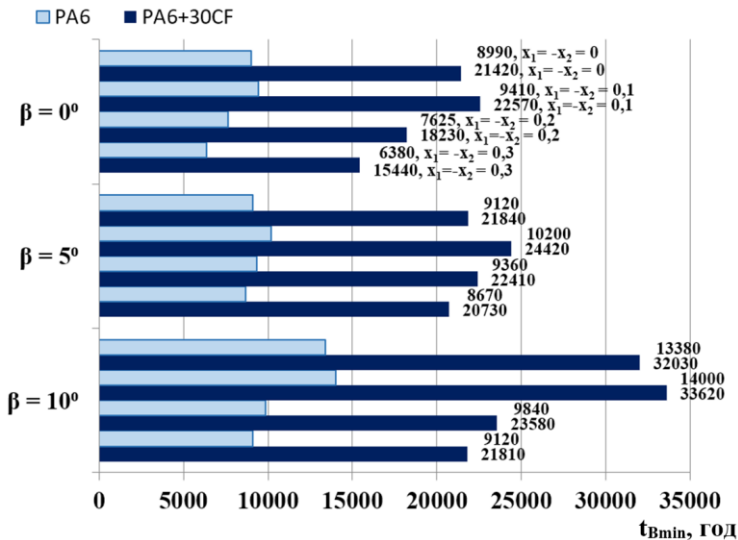


Рис. 2. Об'єднана діаграма залежності довговічності коригованих МП передач при різних кутах нахилу зубів

Довговічність  $t_{B\min}$  некоригованої передачі з кутом нахилу зубів  $\beta = 10^\circ$  зростає близько у 1.49 ... 1.47 рази у порівнянні з передачами з кутом нахилу  $\beta = 0^\circ$ ,  $\beta = 5^\circ$ . При оптимальних коефіцієнтах коригування це відношення складає, відповідно, 1.47...1.38 рази.

**3. Висновки.** У результаті проведених аналітичних досліджень згідно авторського методу встановлено основні якісні закономірності впливу висотного коригування зацеплення на довговічність МП передач:

1. При коригуванні зацеплення спостерігається оптимальні величини коефіцієнтів коригування, при яких довговічність передачі буде найвищою. Їх величина не залежить від кута нахилу зубів і складає  $x_1 = -x_2 = 0.1$ .

2. Подальше збільшення коефіцієнтів коригування спричиняє зниження довговічності передачі до рівня нижчого, як у некоригованій передачі. Передача з колесом з РА6+30CF матиме суттєво вищу довговічність, ніж з колесом з РА6 внаслідок значно вищої зносостійкості РА6+30CF.

Встановлені кількісні і якісні закономірності впливу кута нахилу зубів та коригування зацеплення циліндричних МП передач надають можливість на стадії проектного розрахунку провести оптимізацію передачі за критеріями контактної міцності, зношування зубів, довговічності, видом полімерного матеріалу. Також можливо здійснити її поліоптимізацію за кількома критеріями.

#### Список літератури

1. Shil'ko SV and Starzhinskii VE. Prediction of Wear Resistance of Gearing with Wheels Made of Reinforced Composites // Journal of Friction and Wear. – 1993. - Vol. 14, No.3. - pp. 7 – 13.

2. Shil'ko S V, Starzhinsky V E, Petrokovets E M, Chernous D A. Two-Level Calculation Method for Tribojoints Made of Disperse-Reinforced Composites: Part 1. // Journal of Friction and Wear. -2013. -Vol. 34, No. 1. - pp. 65 - 69.

3. Kahraman A., Bajpai P., Anderson N.E. Influence of tooth profile deviations on helical gear wear // J. Mech. Des. – 2005. –Vol. 127, № 4. – pp. 656 - 663.

4. Pasta A., Mariotti Virzi G. Finite element method analysis of a spur gear with a corrected profile // J. Strain Analysis. – 2007. – Vol.42. – pp. 281 - 292.

5. Chernets M. Method of calculation of tribotechnical characteristics of the metal-polymer gear, reinforced with glass fiber, taking into account the correction of tooth // Eksploatacja i Niezawodnosc – Maintenance and Reliability. - 2019. - Vol 21, Issue 4. - pp. 546 – 552.

6. Czerniec M., Kornienko A. Prediction of the Service Life of Metal-Polymer Gears Made of Glass and Carbon Fibre-Reinforced Polyamide, Considering the Impact of Height Correction // Advances in Science and Technology Research Journal. - 2020, Vol. 14, Issue 3. – pp. 15 – 21.

7. Чернець М., Келбінські Ю., Скварок Ю. Оцінка довговічності, зношування та контактної міцності зубчастих передач / Під заг. ред. М.В.Чернеця. – Дрогобич: Вимір, 2002. – 128 с.

8. Чернец М. В., Келбиньски Ю. Расчетная оценка износа и ресурса косозубых эвольвентных цилиндрических передач // Проблемы трибологии. – 2004. - № 3. – С. 61 – 70.

9. Чернець М., Келбінські Ю. Вплив нахилу зубів косозубих циліндричних передач та трибомеханічні, силові на кінематичні характеристики // Проблемы трибологии. – 2006. - №4. – С. 3 – 7.

10. Чернець М.В., Келбінські Ю., Ярема Р.Я. Узагальнений метод оцінки зношування циліндричних евольвентних зубчастих передач // ФХММ. – 2011. – №1. – С. 44 – 49.

11. Чернець М.В., Ярема Р.Я., Чернець Ю.М. Метод оцінки впливу коригування і зношування зубів евольвентної циліндричної передачі на довговічність та міцність. Ч.1. Довговічність та зношування // ФХММ. – 2012. - № 3. – С. 30 - 39.

12. Чернец М.В., Чернец Ю.М. Оценка прочности, износа и ресурса корригированной цилиндрической зубчатой передачи с учетом условий зацепления зубьев // Трение и износ. – 2016. -№1. – С. 89 – 97.

13. Чернец М.В., Чернец Ю.М. Метод расчета триботехнических характеристик цилиндрической косозубой тяговой передачи локомотива ВЛ – 10 // Трение и износ. – 2016. -№6. – С. 728 – 736.

14. Chernets M., Chernets Ju. The simulation of influence of engagement conditions and technological teeth correction on contact strength, wear and durability of cylindrical spur gear of electric locomotive // Proc. IMechE. Part J: Journal of Engineering Tribology. – 2017. - Vol. 231, No 1. – pp.. 57 – 62.

15. Андрейкив А.Е., Чернец М.В. Оценка контактного взаимодействия трущихся деталей машин. – Киев: Наук.думка. - 1991. – 160 с.

16. Niewczas A., Czerniec M., Ignaciuk P. Badania trwałości elementów maszyn współpracujących tarciowo. - Lublin: Wyd. IZT . - 2000.– 236 s.

17. Чернець М., Пашечко М., Невчас А. Методи прогнозування та підвищення зносостійкості триботехнічних систем ковзання. В 3-х томах. Т.1. Дослідження та розрахунок трибосистем ковзання, методи підвищення довговічності і зносостійкості. - Дрогобич: КОЛО. - 2001. – 492 с.

18. Чернець М.В., Корнієнко А.О., Федорчук С.В. Дослідження впливу нахилу зубів металополімерної косозубої циліндричної передачі з поліамідних композитів на контактні тиски та ресурс // Проблеми тертя та зношування, 2021. – № 4 (93). – С. 16 – 24.

Стаття надійшла до редакції 20.07.2022.

**Чернець Мирон Васильович** – докт. техн. наук, професор, Національний авіаційний університет, Київ, Україна; [myron.czerniec@gmail.com](mailto:myron.czerniec@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-5603-9559>.

**Корнієнко Анатолій Олександрович** – канд. техн. наук, доцент, Національний авіаційний університет, Київ, Україна, [anatoliy\\_k@ukr.net](mailto:anatoliy_k@ukr.net), <https://orcid.org/0000-0002-7108-3152>.

**Чернець Юрій Миронович** – магістр, Національний авіаційний університет, <https://orcid.org/0000-0003-3701-9381>.

*M. V. CHERNETS, A. O. KORNIENKO, YU. M. CHERNETS*

## **STUDY OF THE INFLUENCE OF TEETH CORRECTION OF METAL-POLYMER HELICAL GEARS ON BEARING CAPACITY AND DURABILITY: PART. 2. GEARS DURABILITY**

According to the author's method of calculating metal and metal-polymer gears, a study of the effect of height correction of the engagement of helical spur gears on durability was carried out. The durability of metal-polymer gears with a gear made of two types of polyamides was evaluated at different tooth helix angles and tooth shift coefficients. Quantitative and qualitative regularities of the influence of both factors on the minimum durability have been established, taking into account the parity teeth engagement. It was established that in a transmission with a gear made of polyamide composite PA6+30CF, the durability will be up to 2.4 times higher than that of unfilled polyamide PA6 and will not depend on the value of the tooth shift coefficients. The gears durability is significantly affected by both the correction of the engagement and the teeth helix angle. Quantitative and qualitative regularities of this influence were obtained. The existence of an optimum of tooth shift coefficients, at which the durability of the transmission will be the highest, has been established.

**Key words:** dry friction, metal-polymer helical spur gears, PA6 polyamide and PA6+30CF carbon composite, engagement height correction, gears durability

### **References**

1. Shil'ko SV and Starzhinskii VE. Prediction of Wear Resistance of Gearing with Wheels Made of Reinforced Composites // *Journal of Friction and Wear*. – 1993. - Vol. 14, No.3. - pp. 7 – 13.
2. Shil'ko S V, Starzhinsky V E, Petrokovets E M, Chernous D A. Two-Level Calculation Method for Tribojoints Made of Disperse-Reinforced Composites: Part 1 // *Journal of Friction and Wear*. -2013. -Vol. 34, No. 1. - pp. 65 - 69.
3. Kahraman A., Bajpai P., Anderson N.E. Influence of tooth profile deviations on helical gear wear // *J. Mech. Des.* – 2005. –Vol. 127, № 4. – pp. 656 - 663.
4. Pasta A., Mariotti Virzi G. Finite element method analysis of a spur gear with a corrected profile // *J. Strain Analysis*. – 2007. – Vol.42. – pp. 281 - 292.
5. Chernets M. Method of calculation of tribotechnical characteristics of the metal-polymer gear, reinforced with glass fiber, taking into account the correction of tooth // *Ekspluatacja i Niezawodnosc – Maintenance and Reliability*. - 2019. - Vol 21, Issue 4. - pp. 546 – 552.
6. Czerniec M., Kornienko A. Prediction of the Service Life of Metal-Polymer Gears Made of Glass and Carbon Fibre-Reinforced Polyamide, Considering the Impact of Height Correction // *Advances in Science and Technology Research Journal*. - 2020, Vol. 14, Issue 3. – pp. 15 – 21.
7. Chernets' M., Kelbin'ski YU., Skvarok YU. Otsinka dovhovichnosti, znoshuvannya ta kontaktnoyi mitsnosti zubchastykh peredach / *Pid zah. red. M.V.Chernetsya*. – Drohobych: Vymir, 2002. – 128 s.
8. Chernets M. V., Kelbyn'sky YU. Raschetnaya otsenka yznosa y resursa kosozubykh evol'ventnykh tsylindrycheskykh peredach // *Problemy trybolohiyi*. – 2004. - № 3. – S. 61 – 70.
9. Chernets' M., Kelbins'ki YU. Vplyv nakhyly zubiv kosozubykh tsylindrychnykh peredach ta trybomekhanichni, sylovi na kinematychni kharakterystyky // *Problemy trybolohiyi*. – 2006. - №4. – S. 3 – 7.
10. Chernets' M.V., Kelbin'ski YU., Yarema R.YA. Uzahal'neny metod otsinky znoshuvannya tsylindrychnykh evol'ventnykh zubchastykh peredach // *FKHMM*. – 2011. – №1. – S. 44 – 49.
11. Chernets' M.V., Yarema R.YA., Chernets' YU.M. Metod otsinky vplyvu koryhuvannya i znoshuvannya zubiv evol'ventnoyi tsylindrychnoyi peredachi na dovhovichnist' ta mitsnist'. CH.1. Dohovichnist' ta znoshuvannya // *FKHMM*. – 2012. - № 3. – S. 30 - 39.

---

12. Chernets M.V., Chernets YU.M. Otsenka prochnosti, yznosa y resursa korryhrovannoy tsylindrycheskoy zubchatoy peredachy s uchetom uslovyy zatseplenyya zub'ev // *Trenye y yznos.* – 2016. -№1. – S. 89 – 97.

13. Chernets M.V., Chernets YU.M. Metod rascheta trybotekhnicheskyykh kharakterystyk tsylindrycheskoy kosozuboy tyahovoy peredachy lokomotyva VL – 10 // *Trenye y yznos.* – 2016. -№6. – S. 728 – 736.

14. Chernets M., Chernets Ju. The simulation of influence of engagement conditions and technological teeth correction on contact strength, wear and durability of cylindrical spur gear of electric locomotive // *Proc. IMechE. Part J: Journal of Engineering Tribology.* – 2017. - Vol. 231, No 1. – pp.. 57 – 62.

15. Andreykyv A.E., Chernets M.V. Otsenka kontaktnoho vzaymodeystvyia trushchykhsya detaley mashyn. – Kyev: Nauk.dumka. - 1991. – 160 s.

16. Niewczas A., Czerniec M., Ignaciuk P. Badania trwałości elementów maszyn współpracujących tarciowo. - Lublin: Wyd. IZT . - 2000.– 236 s.

17. Chernets' M., Pashechko M., Nevchas A. Metody prohnozuvannya ta pidvyshchennya znosostiykosti trybotekhnichnykh system kovzannya. V 3-kh tomakh. T.1. Doslidzhennya ta rozrakhunok trybosystem kovzannya, metody pidvyshchennya dovhovichnosti i znosostiykosti. - Drohobych: KOLO. - 2001. – 492 s.

18. Chernets' M.V., Korniyenko A.O., Fedorchuk S.V. Doslidzhennya vplyvu nakhyly zubiv metalopolimernoyi kosozuboyi tsylindrychnoyi peredachi z poliamidnykh kompozytiv na kontaktni tysky ta resurs // *Problemy tertya ta znoshuvannya, 2021.* – № 4 (93). – S. 16 – 24.