

УДК 539.3 539.538: 539.621

DOI: 10.18372/0370-2197.3(96).16831

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. 1. НЕСІВНА ЗДАТНІСТЬ**

З використанням авторського методу розрахунку металевих і металополімерних зубчастих передач проведено дослідження впливу висотного коригування зачеплення циліндричних косозубих передач на контактні тиски та довговічність. Для шестерні вибрано сталь 45, а для зубчастого колеса ненаповнений поліамід РА6 або його композит РА6+30CF, наповнений короткими вуглеволокнами. При різних кутах нахилу і коефіцієнтах коригування зубів проведено оцінку максимальних контактних тисків у зачепленні. Встановлено кількісні і якісні закономірності впливу обох чинників на контактні тиски з урахуванням умов зачеплення зубів (парності). Коригування приводить до зниження контактних тисків на різну величину залежно від точки контакту зубів у зачепленні. Встановлено, що у передачі з колесом з РА6+30CF тиски у 1.29 рази будуть вищими, ніж з РА6 і не залежатимуть від величини коефіцієнтів коригування зубів.

**Ключові слова:** *сухе тертя, металополімерні циліндричні косозубі передачі, поліамід РА6 та вуглекомпозит РА6+30CF, висотне коригування зачеплення, максимальні контактні тиски у зачепленні*

**Вступ.** Область застосування різного виду металополімерних (МП) зубчастих передач неухильно розширюється як у техносфері, так і багатьох інших сферах. Зокрема це машинобудування, авіабудування, приладобудування, автомобілебудування, суднобудування тощо, харчопереробна, фармацевтична, текстильна, паперова – целюозна, хімічна промисловість та інше). Теж вони поширені у побутовій, комп'ютерній, офісній, медичній, вимірювальній техніці та у інших різноманітних областях діяльності людини. Серед них циліндричні прямозубі і косозубі передачі є найбільш вживаними. Подібно як у металевих зубчастих передачах, так і у МП передачах використовують коригування зачеплення з метою підвищення контактної та згинальної міцності зубів, а, окрім того, для забезпечення необхідної міжосьової відстані передачі.

Стосовно аналітичного дослідження МП зубчастих передач, то у літературі обмаль результатів. Лише у окремих працях [1, 2, 3] досліджено аспекти розрахунку контактної та згинної міцності зубів некоригованих циліндричних МП передач. Натомість, як методів (аналітичних чи чисельних), так і результатів дослідження контактних тисків МП зубчастих передач з коригованим зачепленням у літературі немає. Різного змісту дослідження металевих передач з коригованими чи модифікованими зубами наявні у літературі [4 – 9]. Однак їх не було використано для дослідження МП зубчастих передач.

Оскільки дослідження впливу коригування зачеплення циліндричних МП передач на їх несівну здатність є актуальними і практично необхідними, то було розроблено відповідний метод їх розрахунку [10, 11], де враховано особливості контактної взаємодії матеріалів з суттєво відмінними пружними і міцністними характеристиками. Він є модифікацією методів дослідження металевих зубчастих передач [12 – 20].

У статті наведено результати дослідження МП передач з шестернею зі сталі 45 та зубчастим колесом – з ненаповненого поліаміду РА6 або його композиту РА6+30%CF, наповненого короткими вуглеволокнами. Згідно розробленого методу розрахунку МП зубчастих передач на їх несівну здатність проведено комплексне дослідження впливу на цю їх характеристику висотного коригування зачеплення циліндричних косозубих передач. При цьому враховано вплив на неї таких важливих чинників, як умови зачеплення зубів, коригування зачеплення, їх зношування, коригування зачеплення у процесі експлуатації. У результаті такого моделювання при проектуванні МП зубчастих передач можливо також провести їх оптимізацію за критерієм контактної міцності зубів (несівної здатності передачі). Методи, що дозволяють вирішити задачу дослідження цих зубчастих передач з урахуванням умов зачеплення зубів, коригування зачеплення та впливу зношування зубів на несівну здатність у літературі відсутні.

**2. Результати чисельного дослідження.** Загальний вигляд циліндричної косозубої металополімерної передачі показано на рис. 1.



Рис. 1. Металополімерна передача

Дослідження проведено згідно розрахункового методу дослідження циліндричних косозубих МП передач на несівну здатність, зносостійкість і довговічність, поданого у [10, 11, 21].

У передачах з висотним коригуванням зачеплення коефіцієнти коригування  $x_1 = -x_2$ , сумарний коефіцієнт  $x_2 = x_1 + x_2 = 0$ , 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 такими ж, як і некоригованої передачі.

Для розрахунку прийнято такі дані:  $T_{ном} = 4000$  Нмм – номінальний крутний момент,  $n_1 = 700$  об/хв – число обертів шестерні;  $K_g = 1.2$  – коефіцієнт динамічності;  $m = 4$  мм – модуль зачеплення,  $u = 3$  – передавальне відношення,  $z_1 = 20$  – число зубів шестерні,  $z_2 = 60$  – число зубів колеса,  $b = 50$  мм – ширина шестерні,  $\beta = 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ$  – кут нахилу зубів;

коефіцієнти висотного коригування  $x_1 = -x_2 = 0, 0.1, 0.2, 0.3$ ;  $a = 160$  мм – міжосьова відстань,  $\alpha = 20^\circ$  – нормальний кут зачеплення.

Характеристики матеріалів коліс МП зубчастих передач:

– Шестерня: сталь 45 нормалізація,  $E_1 = 2.1 \cdot 10^5$  МПа – модуль Юнга,  $\nu_1 = 0.3$  коефіцієнт Пуассона.

– Зубчасте колесо: поліамід РА6,  $E_2 = 2300$  МПа,  $\nu_2 = 0.4$ ; поліамідний композит РА6+30CF, наповнений 30% дрібного вуглеволокна,  $E_2 = 3300$  МПа,  $\nu_2 = 0.41$ .

Результати досліджень впливу коригування зачеплення та кута  $\beta$  нахилу зубів на максимальні контактні тиски  $p_{jmax}$  протягом циклу їх зачеплення (кут  $\Delta\phi$ ) у вибраних  $j = 0, 1, \dots, 5$  точках подано на рис. 2 – 4. У залежності від параметрів передачі, зокрема від кута нахилу зубів, ширини коліс та коефіцієнтів коригування  $x_1 = -x_2$  будуть змінюватись умови зачеплення зубів: дво – одно – двопарного чи три – дво – трипарного.

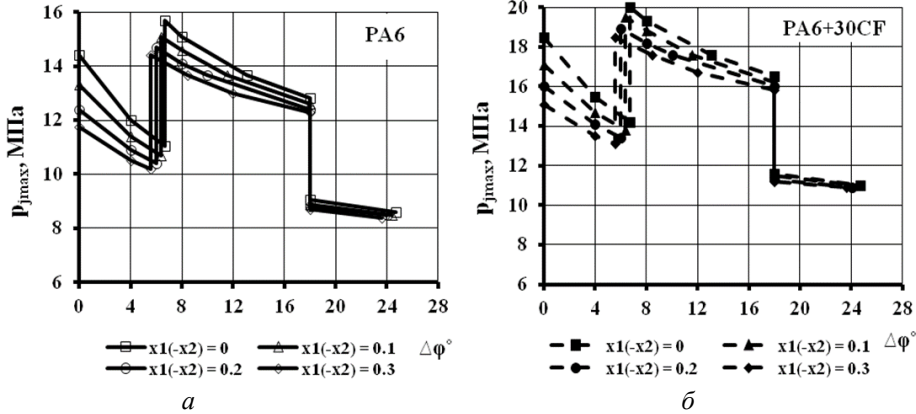


Рис. 2. Максимальні контактні тиски у зачепленні при  $\beta = 0^\circ$ : а – PA6, б – PA6+30CF

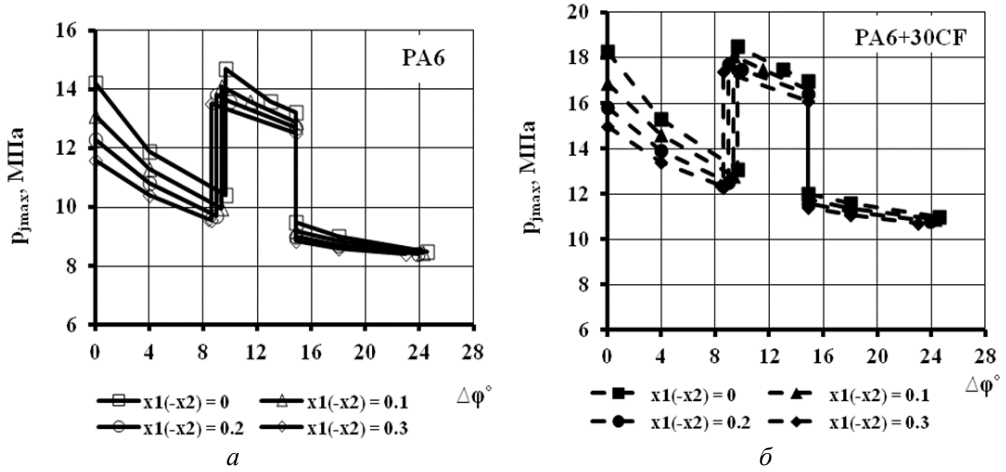


Рис. 3. Максимальні контактні тиски у зачепленні при  $\beta = 5^\circ$ : а – PA6, б – PA6+30CF

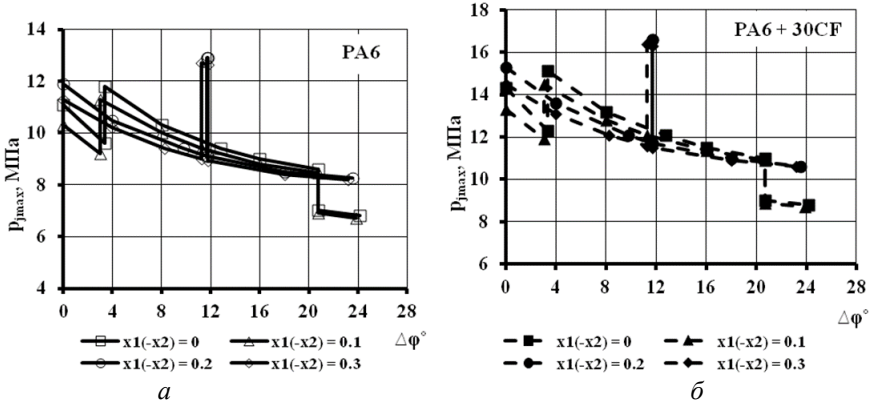


Рис. 4. Максимальні контактні тиски у зачепленні при  $\beta = 10^\circ$ : а – PA6, б – PA6+30CF

Аналіз наведених результатів показує, що найбільші контактні тиски  $p_{jmax}$  виникають на вході у однопарне зачеплення. Вони будуть близько 1.29 рази вищими у передачі з колесом з РА6+30CF, ніж з колесом з РА6 незалежно від величини коефіцієнтів коригування  $x_1 = -x_2$ . Коригування знижує контактні тиски  $p_{jmax}$  по різному у процесі зачеплення зубів. При кутах нахилу зубів  $\beta = 0^0, 5^0$  (рис. 2, 3) має місце дво – одно – двопарне зачеплення і тут коригування виявляє найбільший вплив на зниження тисків на вході у ліву фазу двопарного зачеплення  $\approx$  у 1.225 рази, а у наступному воно знижується до 1.144 рази. Також зниження тисків є ще достатньо помітним у початковій фазі однопарного зачеплення. У правій фазі двопарного зачеплення воно стає незначним.

При кутах нахилу зубів  $\beta = 10^0$  спочатку при  $x_1 = -x_2 = 0, 0.1$  буде три – дво – трипарне зачеплення з сумарними коефіцієнтами перекриття, відповідно,  $\varepsilon_\gamma = \varepsilon_\alpha + \varepsilon_\beta = 2.033; 2.016$ , а при  $x_1 = -x_2 = 0.2, 0.3$  – дво – одно – двопарне з коефіцієнтами перекриття  $\varepsilon_\gamma = 1.997; 1.974$ . Тут при коефіцієнтах коригування  $x_1 = -x_2 = 0.2, 0.3$  найбільші тиски  $p_{jmax}$  будуть на вході у центральну фазу зачеплення (рис. 4). Тенденція їх зниження внаслідок коригування зубів теж має місце. У кількісному відношенні вона є меншою, як попередньо, навіть на вході зубів у ліву фазу зачеплення. При куті нахилу зубів  $\beta = 10^0$  тиски  $p_{jmax}$  є значно більш зближеними при три – дво – трипарному і дво – одно - двопарному зачепленні (рис. 4). Коригування зачеплення при усіх кутах нахилу зубів приводить до зміщення полюсу зачеплення вліво, а рівень тисків при цьому залишається незмінним.

**Висновки.** У результаті проведених аналітичних досліджень згідно авторського методу встановлено основні якісні закономірності впливу висотного коригування зачеплення на несівну здатність МП передач:

1. Найбільші максимальні контактні тиски  $p_{jmax}$  виникають на вході у центральну фазу зачеплення при усіх кутах нахилу зубів. Деяко нижчими вони будуть на вході зубів у зачеплення та у полюсі зачеплення. Рівень тисків у цих двох точках зачеплення є близьким за величиною. Тиски у передачі з колесом з РА6+30CF будуть до 1.29 разів вищими, ніж з колесом з РА6, незалежно від величини коефіцієнтів коригування  $x_1 = -x_2$  зубів.

2. Коригування зачеплення знижує контактні тиски  $p_{jmax}$  по – різному у точках контакту зубів. Найбільш суттєвий вплив коригування зубів виявляє на тиски на їх вході у зачеплення у його лівій фазі. Вони залишаються найбільшими на вході зубів у центральну фазу зачеплення, деяко знижуючись при збільшенні коефіцієнтів коригування  $x_1 = -x_2$ . При три – дво - трипарному зачепленні косих зубів з кутом нахилу  $\beta = 10^0$  найбільші тиски будуть на вході у праву фазу (тут двопарного) зачеплення.

Встановлені кількісні і якісні закономірності впливу кута нахилу зубів та коригування зачеплення циліндричних МП передач надають можливість на стадії проектного розрахунку провести оптимізацію передачі за критерієм контактної міцності.

#### 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. Cathelin J., Letzelter E., Guingand M., De Vaujany J.P., Chazeau L. Experimental and numerical study a loaded cylindrical PA66 gear // *Journal of Mechanical Design*. -2013. -Vol. 135. – pp. 89 – 98.

4. 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.

5. 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.

6. Zwolak J., Wittek M. Optymalizacja parametrów geometrycznych kół zębatach w aspekcie minimalizacji naprężeń kontaktowych // *Tribologia*. -2011. – Vol. 45, № 6. – S. 283 – 291.

7. Bharat G, Abhishek C, and Gautam V V. Contact stress analysis of spur gear. *International // Journal of Engineering Research and Technology*. - 2012, No.1. – pp. 1 - 7.

8. Miler, D.; Loncar, A.; Žeželj, D.; Domitran, Z. Influence of profile shift on the spur gear pair optimization // *Mech. Mach. Theory*. – 2017. – Vol. 117. – pp. 189 – 197.

9. Bodzás, S. Analysis of the effect of the addendum modification coefficient for contact surfaces of spur gear // *Journal of Mechanical Engineering*. – 2019. - Vol. 69, No.1. - pp. 5 - 16.

10. 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 Niezawodność – Maintenance and Reliability*. - 2019. - Vol 21, Issue 4. - pp. 546 – 552.

11. 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.

12. 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.

13. Чернец М. В., Келбиньски Ю. Расчетная оценка износа и ресурса косозубых эвольвентных цилиндрических передач // *Проблеми трибології*. – 2004. - № 3. – С. 61 – 70.

14. Чернець М., Келбінські Ю. Вплив нахилу зубів косозубих циліндричних передач та трибомеханічні, силові на кінематичні характеристики // *Проблеми трибології*. – 2006. - №4. – С. 3 – 7.

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

16. 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.

17. Чернець М.В., Ярема Р.Я., Чернець Ю.М. Метод оцінки впливу коригування і зношування зубів евольвентної циліндричної передачі на довговічність та міцність. Ч.2. Контактна міцність // *ФХММ*. – 2012. - № 6. – С. 56 - 59.

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

19. 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.

20. 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.

21. 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.

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. 1. BEARING CAPACITY

Using the author's method of calculating metal and metal-polymer gears, a study of the effect of height correction of engagement of helical spur gears on contact pressures and durability was carried out. Steel 45 was selected for the pinion, and unfilled polyamide PA6 or its composite PA6+30CF, filled with short carbon fibers, were selected for the gear. At different helix angles and tooth shift coefficients, the maximum contact pressures in engagement were evaluated. Quantitative and qualitative regularities of the influence of both factors on contact pressures were established, taking into account the conditions of teeth engagement (parity). The correction leads to a decrease in the contact pressures by a different amount depending on the point of contact of the teeth in the engagement. It was established that in a transmission with a gear made of PA6+30CF, the pressures will be 1.29 times higher than with PA6 and will not depend on the value of the shift coefficients.

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

### 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. Cathelin J., Letzelter E., Guingand M., De Vaujany J.P., Chazeau L. Experimental and numerical study a loaded cylindrical PA66 gear // *Journal of Mechanical Design*. -2013. -Vol. 135. – pp. 89 – 98.
4. 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.
5. 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.
6. Zwolak J., Wittek M. Optymalizacja parametrów geometrycznych kół zębatych w aspekcie minimalizacji naprężeń kontaktowych // *Tribologia*. -2011. – Vol. 45, № 6. – S. 283 – 291.
7. Bharat G, Abhishek C, and Gautam V V. Contact stress analysis of spur gear. *International // Journal of Engineering Research and Technology*. - 2012, No.1. – pp. 1 - 7.
8. Miler, D.; Loncar, A.; Žeželj, D.; Domitran, Z. Influence of profile shift on the spur gear pair optimization // *Mech. Mach. Theory*. – 2017. – Vol. 117. – pp. 189 – 197.
9. Bodzás, S. Analysis of the effect of the addendum modification coefficient for contact surfaces of spur gear // *Journal of Mechanical Engineering*. – 2019. - Vol. 69, No.1. - pp. 5 - 16.
10. Chernets M. Method of calculation of tribotechnical characteristics of the metal-polymer gear, reinforced with glass fiber, taking into account the correction of tooth // *Eksplatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*. - 2019. - Vol 21, Issue 4. - pp. 546 – 552.
11. 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.
12. 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.

13. Chernets M. V., Kelbyn'sky YU. Raschetnaya otsenka yznosa y resursa kosozubykh évol'ventnykh tsylindrycheskykh peredach // Problemy trybolohiyi. – 2004. - № 3. – S. 61 – 70.
14. Chernets' M., Kelbins'ki YU. Vplyv nakhylu zubiv kosozubykh tsylindrychnykh peredach ta trybomekhanichni, sylovi na kinematychni kharakterystyky // Problemy trybolohiyi. – 2006. - №4. – S. 3 – 7.
15. Chernets' M.V., Kelbin'ski YU., Yarema R.YA. Uzahal'neny metod otsinky znoshuvannya tsylindrychnykh evol'ventnykh zubchastykh peredach // FKHMМ. – 2011. – №1. – S. 44 – 49.
16. 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 // FKHMМ. – 2012. - № 3. – S. 30-39.
17. 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.2. Kontaktna mitsnist' // FKHMМ. – 2012. - № 6. – S. 56 - 59.
18. Chernets M.V., Chernets Yu.M. Otsenka prochnosty, yznosa y resursa korryhrovannoy tsylindrycheskoy zubchatoy peredachy s uchetom uslovyy zatseplenyaya zub'ev // Trenye y yznos. – 2016. -№1. – S. 89 – 97.
19. 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.
20. 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.
21. Chernets' M.V., Korniyenko A.O., Fedorchuk S.V. Doslidzhennya vplyvu nakhylu zubiv metalopolimernoyi kosozuboyi tsylindrychnoyi peredachi z poliamidnykh kompozytiv na kontaktni tysky ta resurs // Problemy tertya ta znoshuvannya. – 2021. – № 4 (93). – S. 16 – 24.

**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>.