

*Я. В. ВАСИЛЬЧЕНКО, О. Є. МИРОНЕНКО***ПІДВИЩЕННЯ МІЦНОСТІ ПРИВІДНИХ ШЕСТЕРЕН БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ**

Пропоновано застосування асиметричних зубчастих коліс для надійного обертання гвинтів безпілотних літальних апаратів (БПЛА) необхідно забезпечення кінематичну точність привідних шестерень, норми плавності, норми бокового зазору і одне з головних вимог це міцність зубів шестерень. Розроблені асиметричні зубчасті передачі для модернізації безпілотних літальних апаратів дозволяють підсилити вантажопідйомність для використання більш потужніших двигунів. Підвищення міцності зубів привідних шестерень дає можливість виготовляти їх з поліамідних матеріалів. Заміна спочатку використаних симетричних зубчастих коліс для зубчастих передач з асиметричними зубами дозволила використовувати потужніші та економічні двигуни без модернізації корпусу привода. Розроблені інтегровані підпрограми для порівняння симетричних та асиметричних навантажень на вигин зубів. Представлені приклади фінішної сітки та ізотропії напруги

Ключові слова: асиметричні зубчасті колеса, безпілотні літальні апарати, поліамідні матеріали.

Y. VASYLCHENKO, O. MYRONENKO**ENHANCING THE STRENGTH OF DRIVE GEARS IN UNMANNED AERIAL VEHICLES**

The use of asymmetric gear wheels has been proposed to ensure reliable rotation of propellers in unmanned aerial vehicles (UAVs). This requires maintaining the kinematic accuracy of drive gears, compliance with smoothness standards, and proper backlash tolerances, with one of the primary requirements being the strength of the gear teeth.

The developed asymmetric gear transmissions for UAV modernization make it possible to increase payload capacity and integrate more powerful engines. Improved tooth strength in the drive gears enables the use of polyamide materials for their manufacture. Replacing the originally used symmetric gears with asymmetric-tooth gear systems has made it possible to utilize more powerful and fuel-efficient engines without modifying the drive housing.

Integrated subprograms have been developed to compare bending loads on symmetric and asymmetric teeth. Examples of final mesh models and stress isotropy are presented.

Keywords: asymmetric gears, unmanned aerial vehicles, polyamide materials.

Вступ. Конструкції безпілотних літальних апаратів (БПЛА), або дронів, включають в себе кілька ключових елементів: корпус (фюзеляж), джерело енергії, рухову установку, та систему навігації. Додатково, в залежності від призначення, дрони можуть мати різне обладнання, таке як камери, датчики, та системи зв'язку. Рухова установка: включає в себе двигуни, гвинти, привідні шестерні та інші елементи, які забезпечують рух дрона. Для надійного обертання гвинтів апарату необхідно забезпечення кінематичну точність привідних шестерень, норм плавності, норми бокового зазору і одне з головних вимог це міцність зубів шестерень.

Мета дослідження. Визначити вплив окремих конструктивно-технологічних факторів на показники якості привідних шестерень безпілотних літальних апаратів (БПЛА), або дронів, які виготовлюються з асиметричним профілем зуба за допомоги математичного аналізу у вигляді нелінійної багатофакторної математичної залежності.

Викладання основного матеріалу та результати. Дослідження та розробка асиметричних зубчастих передач для модернізації безпілотних літальних апаратів (БПЛА), або дронів, дозволяє підсилити його вантажопідйомність для використання більш потужніших двигунів, у т.ч. і турбованих, та дає можливість підвищити надійності роботи апаратів. Підвищення міцності зубів привідних шестерень дає можливість виготовляти їх з поліамідних матеріалів.

Застосування асиметричних зубчастих передач для приводів безпілотних літальних апаратів дозволяє значно збільшити щільність передачі потужності, потенційно збільшуючи їх вантажопідйомність та зменшуючи розміри та вагу. Однак практичних реалізацій таких передач не так багато. Одне з таких застосувань асиметричних передач в приводів безпілотних літальних апаратів.

Щоб підвищити вантажопідйомність у межах існуючих розмірів, ваги та терміну служби, зберігаючи достатні фактори безпеки та надійності було пропоновано впровадження циліндричних зубчастих передач з асиметричними профілями зуба[1,3,4,5].

Дрон може пересуватися повітрям, у вод і на землі. Дрон програмується на виконання завдань за задалегідь заданими алгоритмами. Дронами можна назвати безпілотні автомобілі, роботехнічні комплекси (роботи-сапери, роботи-розвідники). До дронів відносяться всі безпілотники - квадрокоптери (мультикоптери), літаки (БПЛА), наземні платформи (танки, машини, роботи), човни, безкіпажні морські катери із запрограмованими діями чи зі штучним інтелектом. Сучасні дрони розрізняються за способом польоту та його дальністю, вагою корисного навантаження та іншими характеристиками. Поєднання практичних властивостей в одному апараті робить його використання ефективним у різних видах діяльності, починаючи від бойових дій та закінчуючи будівництвом.

Види дронів приведена на рис. 1

Сучасні дрони розрізняються за способом польоту та його дальністю, вагою корисного навантаження та іншими характеристиками. Поєднання практичних властивостей в одному апараті робить його використання ефективним у різних видах діяльності, починаючи від бойових дій та закінчуючи будівництвом.

Види дронів приведена на рис. 1

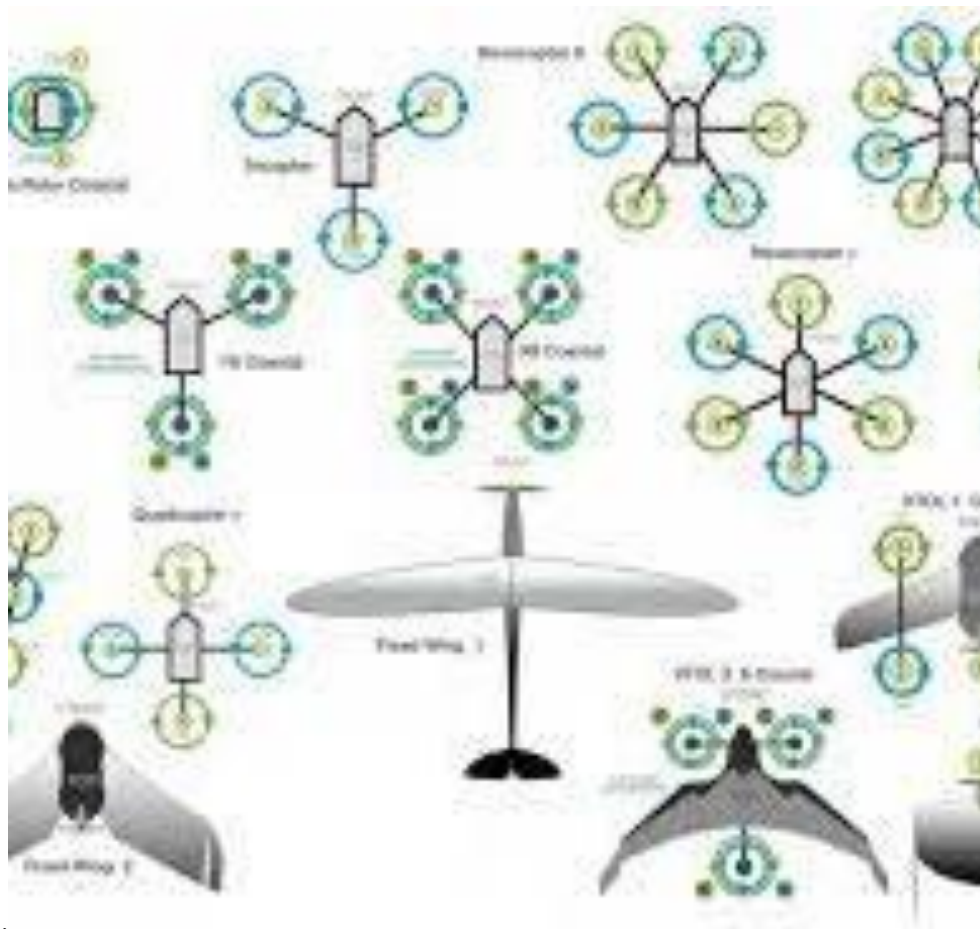


Рис. 1- Види дронів

Дрони класифікують за різними критеріями: кількістю та розташуванням гвинтів або крил, мети використання, дальності польоту, маси корисного навантаження, базового механізму, привідних шестерень та ін.



Рис. 2 –Привідні шестерні з асиметричним профілем зубів безпілотних літальних апаратів (БПЛА)

Оригінальні зубчасті пари мають достатню вантажопідйомність, щоб витримувати підвищену потужність нових двигунів і не потребують модернізації. Циліндричні зубчасті передачі були перероблені для зниження рівня контактної напруги та достатньої міцності на поверхні зубця (Рис. 2).

Основні параметри розроблених та модернізованих циліндричних зубчастих передач представлені у таблиці 1.

Таблиця 1- Основні параметри розроблених та модернізованих циліндричних зубчастих переда

Геометрія колеса		Оригінальна	Модернізація
Профіль зуба		Симетричний	Асиметричний
Кількість зубів	Шестерня	7-15	7-15
	Колесо	14-37	14-37
Основний модуль стійки		0,5 – 0,9	0,5 – 0,9
Модифікація додавання	Шестерня	0.25	N/A
	Колесо	0.08	AS
Робочий модуль		0,5 – 0,9	0,5 – 0,9
Основний кут тиску у стійці		20°	AS
Кут робочого тиску		21,02°	30°/20°*
Коефіцієнт робочого контакту		1.35	1.22/1.48*
Геометрія колеса		Оригінальна	Модернізація
Профіль зуба			Асиметричний
Кількість зубів	Шестерня	7-15	7-15
	Колесо	14-37	14-37
Основний кут тиску у стійці		28°	AS
Кут робочого тиску		29.28	32°/20°*
Коефіцієнт робочого контакту		1.20	1.30/1.57*

Параметри асиметричних зубів були обрані для забезпечення таких вимог:

- кут нахилу фланця приводу не повинен перевищувати 30°, щоб обмежити максимальне радіальне навантаження та зберегти оригінальні підшипники;
- мінімальний коефіцієнт контакту фланця приводу – 1,3;
- мінімальний кут тиску бічної поверхні берега на 2-му ступені становить 20°, так як бічні поверхні однієї з гілок коробки передач використовується для передачі крутного моменту на хвостовий гвинт;
- фінішна обробка кореня зуба не подрібнюється, його профіль не повинен заважати траєкторії шліфувального круга.

Перед чистовою обробкою зубці зубчастої передачі було, залишено шліфувальний шар близько 0,05 мм на боках зубців та забезпечивши остаточний профіль асиметричних зубів. В кореневій частині зубів виникають залишковою напруги, які зникають після шліфування, що збільшує міцність на вигин зуба. Для цього потрібні зубчасті вали з виступом. Однак через низьку кількість зубців шестірні звичайні модульні фрези не могли забезпечити необхідний профіль поверхні кореня зуба, що зменшує локальну концентрацію напруги і ймовірність виникнення мікротріщин[7]. Це відбувається через те, що поверхня профіля зуба передач з шістьма низькими зубцями генерується з меншою кількістю розрізів ніж одна для зубчастих передач з великою кількістю зубів. Щоб вирішити цю проблему, бічні поверхні шестерні були оброблені звичайними модульними фрезами (без виступів), а потім перед фінішною обробкою зубчастих коліс було вирівняно корінь впадини зуба[2]. Зубчасті профілі перед та після фінішної обробки показані на рис. 3.

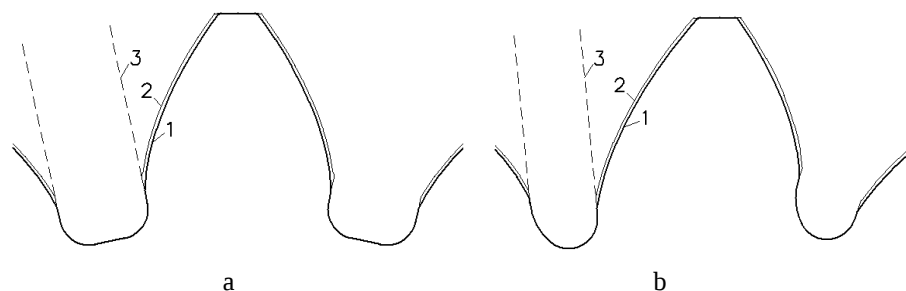


Рис. 3 - Зубчасті профілі ступеня; а – оригінальна симетрична, б – асиметрична; 1 - після формування профіля спеціальною фрезою с протуберанцем, 2 - до фінішного формоутворення евольвентної поверхні, 3 – фінішне формоутворення асиметричної евольвентної поверхні

Перед фінішною обробкою шестірні як другого, так і третього ступеня були оброблені за допомогою валиків виступів. Зубчасті профілі зубчастих коліс 3-го ступеня до, та після фінішної обробки показані на рис. 4.

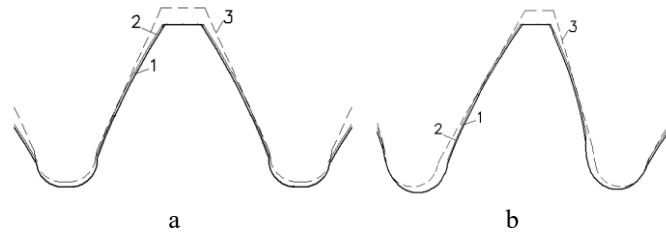


Рис 4.- Формоутворення асиметричної евольвентної поверхні а – оригінальна симетрична, б – асиметрична; 1 - після формування профіля спеціальною фрезою с протуберанцем,, 2 - до фінішної обробки, 3 - остаточне формоутворення асиметричного профіля

Геометрія асиметричних зубів не дозволяє використовувати традиційне рівняння для визначення напруги вигину зуба[6]. Підпрограма, інтегрована у програмне забезпечення яке використовувалося для порівняння симетричних та асиметричних навантажень на вигин зубів. Кінцеві елементи дозволяють адекватно описати все різноманіття конструкцій і деталей. Метод кінцевих елементів відноситься до варіаційних методів теорії пружності і дозволяє оцінювати напружено-деформований стан плоских і об'ємних елементів конструкцій. Для моделювання деформованого стану зуба в даній роботі були використані модулі пакету APM WinMachine: APM Structure3D. Модель зуба формувалася шляхом вирізання зуба із зубчастого колеса двома площинами, проведеними через середини сусідніх западин і вісь обертання. Отриманий сектор відсікався площиною, перпендикулярною осі симетрії зуба на відстані від його основи, що дорівнює приблизно двом модулям зачеплення, що менше мінімальної рекомендованої товщини обода зубчастого колеса. Кінцеві елементи формувалися площинами, проведеними з певним кроком по довжині зуба і перпендикулярно осі симетрії зуба. Був закладений варіант навантаження, що відповідає послідовному застосуванню розподіленого навантаження по висоті зуба. У першому наближенні навантаження по довжині зуба вважалося рівномірно розподіленим. Характер об'ємної деформації зуба, отриманої при застосуванні методу кінцевих елементів, представлений на рис. 5.

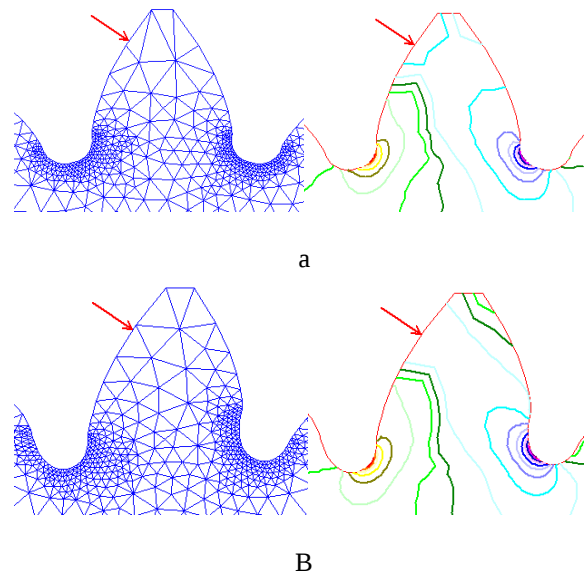


Рис. 5. Схема об'ємної деформації зуба при експлуатації зубчастого колеса 3-го ступеня та ізоотропії напруг; а – оригінальна симетрична, б – асиметрична

Підбиваючи підсумок викладеному, можна констатувати, що найбільш ефективно забезпечення експлуатаційних властивостей асиметричних зубчастих коліс здійснюється із застосуванням комплексних параметрів стану контактуючих поверхонь.

Всі шестерні виконані із полімідних матеріалів, текстоліту марок ПТ та ПТК, капролону, поліформальдегіду, фенолону та ін..

Положення заготовки шестірні під час обробки повинно забезпечувати асиметричні зубці, спрямовані у певному напрямку за годинниковою стрілкою. При базуванні заготовки та її закріпленні повинен дотримуватися принципу єдності баз.

Асиметричні передачі потребують спеціального налаштування та зубооброблюючого інструменту для формоутворення евольвентного профілю зубців.

Висновки. Застосування асиметричних зубчастих коліс для надійного обертання гвинтів безпілотних літальних апаратів (БПЛА) забезпечує необхідну кінематичну точність привідних шестерень, норми плавності, норми бокового зору і одне з головних вимог це міцність зубів шестерень.

Розробка асиметричних зубчастих передач для модернізації безпілотних літальних апаратів дозволяє підсилити вантажопідйомність для використання більш потужніших двигунів, Підвищення міцності зубів привідних шестерень дає можливість виготовляти їх з поліамідних матеріалів.

Заміна звичайних симетричних зубчастих коліс для зубчастих передач на зубчасті колеса з асиметричним профілем дозволила використовувати потужніші та економічні двигуни без модернізації корпусу привода.

Список літератури:

- 1 Васильченко Я. В., Мироненко О. Є., Підвищення довговічності важконавантажених зубчастих передач за рахунок зміни профіля на асиметричний // Збірник наукових праць XIII Міжнародної науково-технічної конференції «Прогресивні технології в машинобудуванні». Львів – Звенив (Карпати), 18-21 лютого 2025 року. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2025. – С. 29. 2
- 2 Мироненко О.Є. Профілювання черв'ячних фрез з протуберанцем для обробки асиметричних великомодульних зубчастих коліс // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XXI Міжнародної науково-технічної конференції 28 – 31 травня 2025 року / за заг. ред. В. Д. Ковальова. – Краматорськ-Тернопіль: ДДМА, 2025. – С. 147–149. ISBN 978-617-7893-02-7
- 3 Васильченко Я.В., Мироненко О.Є. Асиметричні зубчасті передачі для редукторів у важкому машинобудуванні. Матеріали VIII міжнар. наук.-практ. конф. (17-19 вересня 2024 р., м. Херсон, м. Хмельницький). С - 135 . ISBN 978-617-8187-33-0 (електронне видання)
- 4 Пасечник В.А., Охрименко О.А., Гасанов М.І., Заковоротний О.Ю., Ключко О.О., Федоренко В.С. Ефективний метод підвищення зносостійкості зубчастих коліс у слідстві рівномірного розподілу локалізованого навантаження // Проблеми інформатики та моделювання (ПІМ-2023). Тези двадцять третьої міжнародної науково-технічної конференції. – Харків: НТУ "ХПІ", 2023. – С. 83–85
- 5 Охрименко О.О., Камчатна-Степанова К.В., Ключко Л.В., Пермяков Є.О., Мироненко О.Є., Іванченко В.В. Аналітичний підхід прогнозування стану міцнісних параметрів асиметричних зубчастих коліс. Вісник НТУ «ХПІ». 2023. № 2 С. 126-133. ISSN 2079-004X(Print), ISSN 2786-7587(Online)
- 6 Майборода В.С., Охрименко О.О., Ключко О.О., Гасанов М.І., Заковоротний О.Ю., Федоренко В.С., Сапон С.П., Манохін А.С., Шаповалов М.В. Процес моделювання контактної взаємодії при швидкісному зубофрезуванні великомодульних зубчастих коліс // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XXI Міжнародної науково-технічної конференції 20–22 червня 2023 року / за заг. ред. В. Д. Ковальова. – Краматорськ-Тернопіль: ДДМА, 2023. – С. 83–85. ISBN 978-617-7889-45-7.
- 7 Васильченко Я.В., Ковальов В.Д., Шаповалов М.В., Мироненко О.Є., Гасанов М.І., Ключко О.О., Заковоротний О.Ю., Виникнення і розвиток тріщин зубчастих коліс. Інформатика ,управління та штучний інтелект . Тези одинадцятої міжнародної науково-технічної конференції. – Харків: НТУ "ХПІ", ,2024. – С. 17-21.
- 8 Основи наукових досліджень. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/162019668.pdf>(дата звернення: 09.01.2025).

References (transliterated)

- 1 Vasylenko, Ya. V., & Myronenko, O. Ye. (2025, February 18–21). *Pidvyshchennia dovhovichnosti vazhkonavantazhenykh zubchastykh peredach za rakhunok zminy profilia na asymetrychnyi* [Increasing the durability of heavily loaded gear transmissions by modifying the profile to asymmetric]. In **Proceedings of the 13th International Scientific and Technical Conference "Progressyvi tekhnolohii v mashynobuduvanni"** (p. 29). Lviv: Vydavnytstvo Lvivskoi Politekhniky.
- 2 Myronenko, O. Ye. (2025, May 28–31). *Profiliuvannia cherv'iachnykh frez z protuberantsem dlia obrobky asymetrychnykh velykomodul'nykh zubchastykh koles* [Profiling of worm cutters with protuberance for machining asymmetric large-module gears]. In V. D. Kovalov (Ed.), **Vazhke mashynobuduvannia. Problemy ta perspektyvy rozvytku**. Proceedings of the 21st International Scientific and Technical Conference (pp. 147–149). Kramatorsk–Ternopil: DDMA. ISBN 978-617-7893-02-7.
- 3 Vasylenko, Ya. V., & Myronenko, O. Ye. (2024, September 17–19). *Asymetrychni zubchasti peredachi dlia reduktoriv u vazhkomu mashynobuduvanni* [Asymmetric gear drives for gearboxes in heavy engineering]. In **Proceedings of the 8th International Scientific-Practical Conference** (p. 135). Kherson–Khmelnitskyi. ISBN 978-617-8187-33-0.
- 4 Pasechnyk, V. A., Okhrymenko, O. A., Hasanov, M. I., Zakovorotnyi, O. Yu., Klochko, O. O., & Fedorenko, V. S. (2023). *Efektivnyi metod pidvyshchennia znosostiikosti zubchastykh koles u slidstvi rivnomirnoho rozpodilu lokalizovanoho navantazhennia* [Effective method for improving gear wear resistance through uniform distribution of localized loading]. In **Problems of Informatics and Modeling (PIM-2023). Proceedings of the 23rd International Scientific and Technical Conference** (pp. 83–85). Kharkiv: NTU "KhPI".
- 5 Okhrymenko, O. O., Kamchatna–Stepanova, K. V., Klochko, L. V., Permiakov, Ye. O., Myronenko, O. Ye., & Ivanchenko, V. V. (2023). *Analitichnyi pidkhid prohnozuвання stanu mitsnisnykh parametriv asymetrychnykh zubchastykh*

koles [Analytical approach to predicting the strength parameters of asymmetric gears]. *Visnyk NTU "KhPI"*, (2), 126–133. ISSN 2079-004X (Print), ISSN 2786-7587 (Online).

6 Maiboroda, V. S., Okhrymenko, O. O., Klochko, O. O., Hasanov, M. I., Zakovorotnyi, O. Yu., Fedorenko, V. S., Sapon, S. P., Manokhin, A. S., & Shapovalov, M. V. (2023, June 20–22). *Protses modeliuvannia kontaktnoyi vzaiemodii pry shvydkisnomu zubofrezuvanni velykomodul'nykh zubchastykh koles* [Modeling contact interaction in high-speed gear hobbing of large-module gears]. In V. D. Kovalov (Ed.), **Vazhke mashynobuduvannia. Problemy ta perspektyvy rozvytku. Proceedings of the 21st International Scientific and Technical Conference** (pp. 83–85). Kramatorsk–Ternopil: DDMA. ISBN 978-617-7889-45-7.

7 Vasylenko, Ya. V., Kovalov, V. D., Shapovalov, M. V., Myronenko, O. Ye., Hasanov, M. I., Klochko, O. O., & Zakovorotnyi, O. Yu. (2024). *Vynyknennia i rozvytok trishchyn zubchastykh koles* [Occurrence and development of cracks in gears]. In **Informatyka, upravlinnia ta sztuchnyi intelekt. Proceedings of the 11th International Scientific and Technical Conference** (pp. 17–21). Kharkiv: NTU "KhPI".

8 *Osnovy naukovykh doslidzhen*. (n.d.). Retrieved January 9, 2025, from <https://core.ac.uk/download/pdf/162019668.pdf>

Надійшла (received) 12.02.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Васильченко Яна Василівна (Vasylchenko Yana) – доктор технічних наук, професор, завідувачка кафедри комп'ютеризованих мехатронних систем, інструментів і технологій Донбаської державної машинобудівної академії, м. Краматорськ, Україна; e-mail: wasilchenko.ua@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4566-8827>

Мироненко Олег Євгенович (Myronenko Oleh) – аспірант кафедри комп'ютеризованих мехатронних систем, інструментів і технологій Донбаської державної машинобудівної академії, м. Краматорськ, Україна; e-mail: om7251975@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0002-6626-5629>