

ОХРИМЕНКО О. А., МАЙБОРОДА В. С., ЗАКОВОРОТНИЙ О. Ю., ГАСАНОВ М. І., КЛОЧКО О. О., ГЛУШКО С. С., ФЕДОРЕНКО В. С.

ВИКОРИСТАННЯ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ У ПОБУДОВІ ДОСЛІДНИЦЬКОЇ МОДЕЛІ ІМПУЛЬСНОГО ЗУБОФРЕЗЕРУВАННЯ

Для синхронізації швидкостей обертання приводних двигунів пропонується інтелектуальна система управління швидкістю електропривода з двигуном постійного струму, на базі штучної нейронної мережі. В такій системі управління пропонується використати контролер - нейронну мережу разом з контролером - нейромережевою еталонною моделлю [2]. Основним коригувальним сигналом для цієї системи буде похибка в різниці кутових швидкостей двигунів експериментальної і еталонної моделей. Підвищення ефективності процесів при швидкісному зубофрезеруванні лезовим інструментом обумовлює необхідність поглиблених досліджень фізичних закономірностей, що супроводжують відокремлення шару від заготівлі. Для коректного порівняння показників високошвидкісного зубофрезерування, виконуваного при безперервному обертанні та подачі різця і при імпульсному фрезеруванні, була побудована модель експериментальної установки, що складається з двох блоків. Для глобальної оптимізації параметрів нейромережевої системи використовувався метод генетичного алгоритму (ГА). Розглядаючи її як єдиний набір параметрів, ГА здатна здійснювати його оптимальну настройку при розмірах пошукового простору, достатніх для вирішення більшості практичних завдань. У той же час спектр розглянутих додатків значно перевищує можливості алгоритму зворотного поширення. Точність вимірювання вихідних параметрів забезпечується синхронізацією еталонного і випробуваного двигунів за рахунок використання нейро-мерелінного контролера.

Ключові слова: швидкісне зубофрезерування, нейромережевий контролер, інтелектуальна система управління, штучна нейронна мережа, імпульсне фрезерування, режими різання, деформація, метод генетичного алгоритму

OKHRIMENKO O., MAYBORODA V., ZAKOVOROTNIY O., GASANOV M., KLOCHKO O., GLUSHKO S., FEDORENKO V. USE OF NEURAL NETWORKS IN CONSTRUCTION OF A RESEARCH MODEL OF PULSE GEAR MILLING

To synchronize the rotation speeds of the drive motors, an intelligent speed control system for an electric drive with a DC motor is proposed, based on an artificial neural network. In such a control system, it is proposed to use a controller - a neural network together with a controller - a neural network reference model [2]. The main corrective signal for this system will be the error in the difference in the angular velocities of the motors of the experimental and reference models. Increasing the efficiency of processes in high-speed gear milling with a blade tool necessitates in-depth studies of the physical laws that accompany the separation of the layer from the workpiece. For a correct comparison of the indicators of high-speed gear milling performed with continuous rotation and feed of the cutter and with pulse milling, a model of an experimental installation was built, consisting of two blocks. For global optimization of the parameters of the neural network system, the genetic algorithm (GA) method was used. Considering AI as a single set of parameters, GA is able to perform its optimal tuning with the search space sizes sufficient to solve most practical problems. At the same time, the range of applications considered significantly exceeds the capabilities of the backpropagation algorithm. The accuracy of measurement of output parameters is ensured by synchronization of the reference and test engines through the use of a neuro-merelin controller.

Keywords: high-speed gear milling, neural network controller, intelligent control system, artificial neural network, pulse milling, cutting modes, deformation, genetic algorithm method

Вступ. Для вивчення ефективності імпульсного зубчастого фрезерування необхідно побудувати експериментальну модель, що складається з 2 блоків. Перший блок є еталонною моделлю і виконує зубофрезерування за класичною схемою, де фреза приводиться в рух двигуном з постійною швидкістю обертання і із заданою швидкістю подачі. Другий блок має ідентичні характеристики механічної частини, але робочий орган виконує фрезерування зубчастих коліс в імпульсному режимі. Поставлена задача синхронізації швидкості обертання електродвигунів обох агрегатів для того, щоб дати можливість порівняти вихідні параметри зубчастого фрезерування електричної частини.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Раніше була запропонована модель дослідження енергоефективності імпульсного швидкісного зубофрезерування з урахуванням атомного підходу [1]. Для коректного аналізу вихідних даних необхідно порівняти її з аналогічною системою, що працює в постійному режимі. Для синхронізації швидкостей обертання приводних двигунів пропонується інтелектуальна система управління швидкістю електропривода з двигуном постійного струму, на базі штучної нейронної мережі. В такій системі управління пропонується використати контролер - нейронну мережу разом з контролером - нейромережевою еталонною моделлю [2]. Основним коригувальним сигналом для цієї системи буде похибка в різниці кутових швидкостей двигунів експериментальної і еталонної моделей. Підвищення ефективності процесів при швидкісному зубофрезеруванні лезовим інструментом обумовлює необхідність поглиблених досліджень фізичних закономірностей, що супроводжують відокремлення шару від заготівлі [6].

Основна частина. Для коректного порівняння показників високошвидкісного зубофрезерного фрезерування, виконуваного при безперервному обертанні та подачі різця і при імпульсному фрезеруванні, була побудована модель експериментальної установки, що складається з 2 блоків, структурна схема яка представлена на Рис.1.

Обидва блока мають однаковий робочий орган (фреза Ф), яка фрезерує один і той же тип матеріалу з однаковою швидкістю подачі. Силowym агрегатом в даній установці є двигун постійного струму (ДПС₁ і ДПС₂). У еталонній моделі передача крутного моменту від ДПС₁ до Ф здійснюється безпосередньо, в досліджуваній моделі схема реалізована із залежного обертання 2-х мас, в якій ДПС₂ обертається з постійною швидкістю на номінальній потужності, а електромагнітна муфта ЕМ управляється осцилюючим сигналом і має 2 положення.

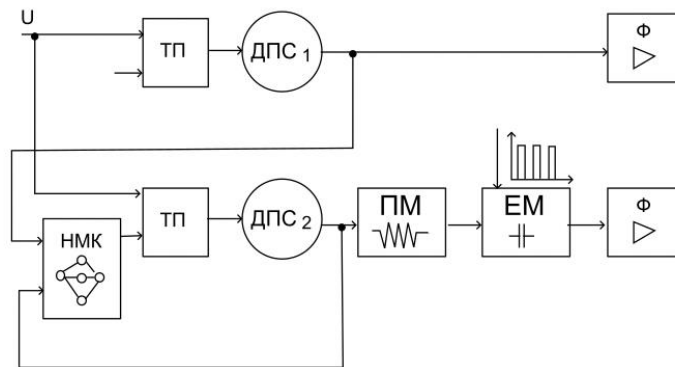


Рис.1 – Структурна схема експериментальної установки імпульсного швидкісного зубофрезерування з використанням пружної та електромагнітної муфти та нейромережевого контролера керування двигуном постійного струму

Коли ЕМ замкнута, механічна передача обертаючого моменту від двигуна на фрезу заблокована і проходить накопичення обертаючого моменту за рахунок обертання валу в пружній муфті. У момент розмикання ЕМ накопичена енергія передається на фрезу Ф і використовується для її подальшого просування в заготовці.[1]

Для управління обертанням електродвигунів використовується тиристорний перетворювач ТП. В еталонній моделі керуючий сигнал забезпечує безперервну, задану швидкість обертання ДПС₁. У досліджуваній моделі швидкість обертання ДПС₂ синхронно с ДПС₁ забезпечує нейромережевий контролер НМК.

Застосування інтелектуальних систем управління, з використанням нейромережевого контролера управління швидкістю забезпечує стійке управління електроприводом з Запропонована система дозволяє контролювати реальну швидкість ротора для виконання точного відслідковування сигналів еталонної моделі в широкому діапазоні експлуатаційних умов. Використання похибки між вихідними сигналами швидкості еталонної моделі та реального електродвигуна забезпечує зміну вагових коефіцієнтів та коефіцієнтів опорних сигналів зміщень [2]

Структурно-алгоритмічна схема експериментальної установки представлена на Рис.2

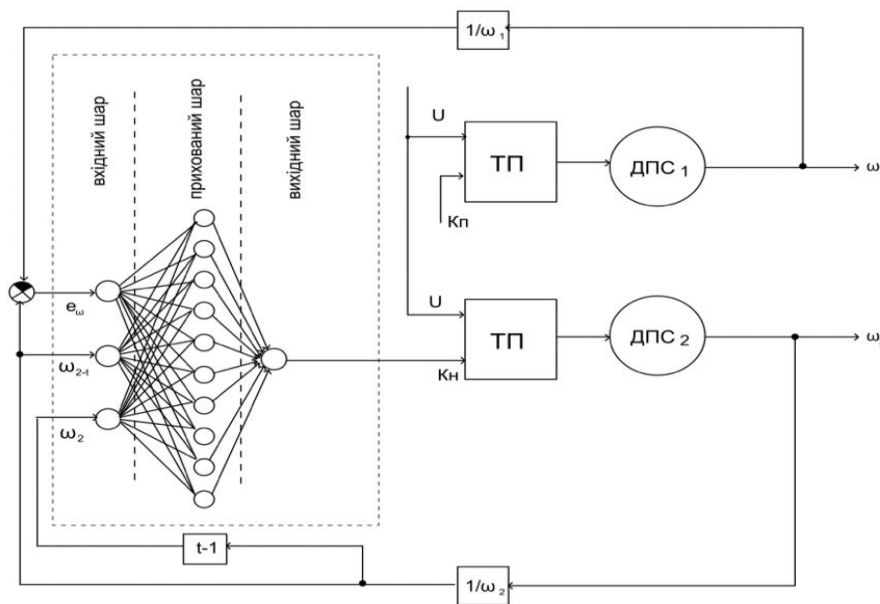


Рис.2 – Структурно-алгоритмічна схема експериментальної установки з використанням нейромережевого контролера керування електродвигуном постійного струму

Як показали раніше проведені дослідження [3, 12, 20], для реалізації систем управління замкнутим циклом з нейромережевим регулятором для управління електродвигуном постійного або змінного струму цілком достатньо одного зворотного зв'язку по швидкості ω_2 , з дискретизацією часу і однієї ланки чистої затримки $\omega_2 \cdot t$. Таким чином, у НС буде 3 вхідних нейрона, на які подається вектор вхідних сигналів у вигляді сигналу завдання, поточна і попередня частота обертання двигуна ДПС₂. Сигналом завдання є похибка різниці кутових швидкостей еталонного двигуна ω_1 і досліджуваної моделі ω_2 .

Таким чином, нейронна мережа матиме 3 вхідних нейрона, на які подається вектор вхідних сигналів у вигляді сигналу завдання, поточного та попереднього значення швидкості другої маси. Мінімально-достатня кількість нейронів прихованого шару таких систем дорівнює 10 – 20, а вихідних нейронів у разі потрібно один. На цьому вихідному нейроні і формуватиметься керуючий вплив для частотного перетворювача. Нейронні мережі такого типу позначаються NN3–20–1 [8, 13, 14, 15]

Завдання синтезу нейронних мереж полягає у визначенні ваг і сигналів зсуву нейронів прихованого і вихідного шарів, які б забезпечували необхідний контроль [3]. Для вирішення цієї проблеми зазвичай використовується алгоритм зворотного поширення (Backpropagation) [4], який по суті є методом градієнтного спуску і тому має відомий недолік – локалізацію області мінімізації. Між тим, простір синтезованих параметрів має настільки велику розмірність (51 параметр), що вимагає застосування методів глобальної оптимізації.

Для глобальної оптимізації параметрів нейромережевої системи необхідно використовувати метод генетичного алгоритму (ГА) [5, 9, 10]. Розглядаючи її як єдиний набір параметрів, ГА здатна здійснювати його оптимальну настройку при розмірах пошукового простору, достатніх для вирішення більшості практичних завдань. У той же час спектр розглянутих додатків значно перевищує можливості алгоритму зворотного поширення.

Як показали раніше проведені моделювання, [2, 11, 18], запропонована інтелектуальна система управління, яка складається з НМК, забезпечує надійний контроль швидкості і стійкі характеристики регулювання при невизначеності параметрів і зовнішнього навантаження. (Рис.3)

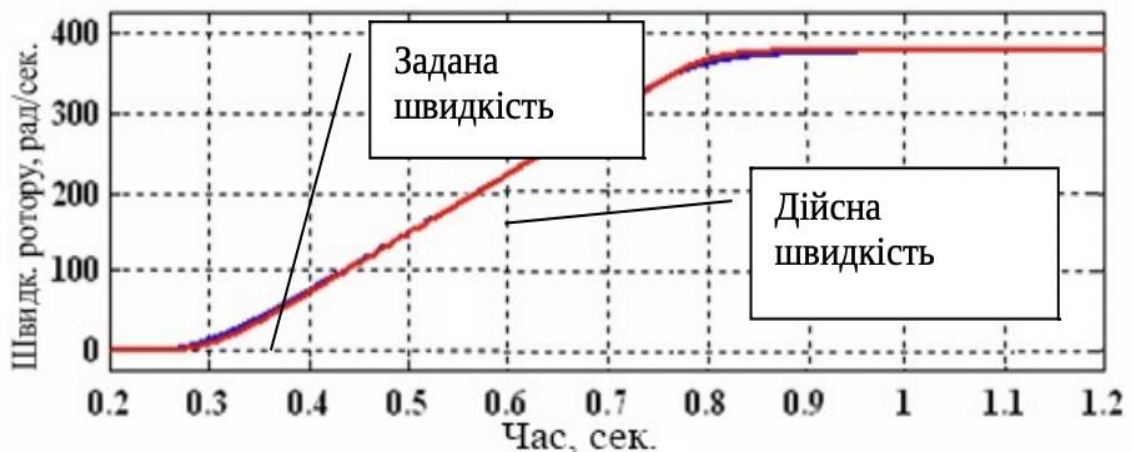


Рис.3 – Швидкість обертання еталонного і дослідного електродвигуна в момент пуску з управлінням НМК

Слід зазначити, що в процесі досліджень, незважаючи на однакову швидкість обертання електродвигунів, оброблювані матеріали можуть зазнавати різні види деформацій з утворенням різного роду стружки.

Схильність оброблюваних матеріалів до деформаційного зміцнення залежить від їхньої електронної та дислокаційної структури, наявності домішок, швидкості деформування, температури, типу кристалічної решітки, радіуса заокруглення ріжучої кромки r , а також від швидкості перебігу процесів розміцнення [6]

Дислокаційні уявлення у різанні металів викладено у ряді робіт, наприклад, у [7, 16, 19]. Сучасні методи дослідження дислокаційної структури виконують за допомогою високовольтної електронної мікроскопії тонких фольг. Імпульсне фрезерування може мати інший вплив на оброблюваний метал, ніж безперервне фрезерування.

Так, ране було доказано що зі збільшенням швидкості, отже, і температури формується зливна стружка. Цьому сприяють дифузійні процеси на межах зерен, що полегшують поворот зерен та міжзеренну деформацію. При цьому ступінь пластичної деформації стружки знижується. При подальшому зростанні швидкості різання формування елементарної стружки пов'язане із запізненням 15 пластичних деформацій. [6]

Висновок. Побудова 2-х блочної установи відкриває широкі можливості для дослідження високошвидкісного імпульсного зубчастого фрезерування в широкому діапазоні вхідних параметрів, таких як швидкість обертання робочої фрези, швидкість подачі, частота імпульсів фрезерування. Точність вимірювання вихідних параметрів забезпечується синхронізацією еталонного і випробуваного двигунів за рахунок використання нейро-мерелінного контролера. Інтелектуальна система управління забезпечує повну синхронізацію електродвигунів.

Список використаних джерел

1. Гасанов М.І., Пермьяков О.А., Заковоротний О.Ю., Клочко О.О., Охрименко О.А., Майборода В.С., Глушко В.С. Енергоефективність імпульсного швидкісного зубофрезерування з урахуванням атомного підходу // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a machine industry: зб. наук.пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Харків : НТУ «ХПІ», 2024. № 2 (10) 2024. – С. 102–106. – ISSN 2079-004X, ISSN 2786-7587, DOI: 10.20998/2079-004X.2024.2(10).11.
2. Б.Л. Тишевич, Д.Д. Мугенов Інтелектуальна система управління швидкістю на базі нейронної мережі для електроприводів з синхронним двигуном з постійними магнітами // Електрифікація та автоматизація гірничих робіт Випуск №30 УДК 681.515+62-551.453
3. Обруч І. В. Керування нейронною мережею двомасової електромеханічної системи з розривом у кінематичних передачах // Збірник наукових праць, тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика», т.1, Вісник НТУ «ХПІ», No 5, 2002, с. 1-11. 302 – 304.
4. Rumelhart D. E., Hinton G. E., Williams R. J. Learning representation by back-propagating errors // Nature. – 1986. – vol. 323. – pp. 533 – 536.
5. De Jong K. A. Genetic Algorithms: A 10 Year Perspective //In: Procs of the First Int. Conf. on Genetic Algorithms, 1985. – pp. 167 – 177.
6. Клочко О.О., Гасанов М.І., Заковоротний О.Ю., Майборода В.С., Охрименко О.О., Федоренко В.С. Технологічні передумови деформації і рушення зрізуемого шару при швидкісному зубофрезеруванні загартованих циліндричних зубчатих коліс на основі атомного підходу // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a machine industry: зб. наук.пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Харків : НТУ «ХПІ», 2022. – № 1 (5) 2022. – С. 10–20. – ISSN 2079-004X, DOI: 10.20998/2079-004X.2022.1(5).02.
7. Gasanov M.I., Klochko A.A., Cherkashina G.I., Perminov E.G. Gruppyv'e marshrutny'e tekhnologicheskije procesy` vosstanovleniya krupnogabaritny`kh zubchaty`kh koles na osnove imitacionogo modelirovaniya s uchetoм progressiruyushhikh vidov iznosa // Nadi`jni`st` i`nstrumentu ta optimi`zaczi`ya tekhnologi`chnikh sistem: zб.nauk. pr. – Kramatorsk : DDMA, 2018. – Vip. 42. – S. 28–36.
8. Я. Кириленко, Б. Воробйов, С. Сенченко, Ю. Кутувий, Лю Хань Розробка системи керування тягового асинхронного електроприводу на основі нейромережі // Технічні науки та технології №3(33) 2023 DOI: 10.25140/2411-5363-2023-3(33)-198-204
9. Kovalev Viktor D, Vasilchenko Yana V., Klochko Alexander A., Gasanov Magomedemin I. Technology of restoration of large gear boxes. Dašić, P. (editor): Modern trends in metalworking, Vol. 1: Vrnjačka Banja: SaTCIP Publisher Ltd., 2018. – P. 43–63. ISBN 978-86-6075-065-7.
10. Klochko, O., Okhrimenko, O., & Shapovalov, M. (2021). Initial instrumental surface of modular millings on the basis of one-band hyperboloid for the manufacture of gear wheeled wheels. *Mechanics and Advanced Technologies*, 5(3), 374–380. <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2021.5.3.250168>.
11. Полонський, Л. Г., Клочко, О. О., Охрименко, О. А., Бецко, Ю. М., Коваль, Б. Г., & Храбан, Д. В. (2024). Особливості визначення профілю інструменту для гвинтових поверхонь за допомогою САД-систем. *Технічна інженерія*, (1(93), 70–80. [https://doi.org/10.26642/ten-2024-1\(93\)-70-80](https://doi.org/10.26642/ten-2024-1(93)-70-80)
12. Гасанов М.І., Заковоротний О.Ю., Клочко О.О., Рябченко С.В. Перспектива дослідження процесу швидкісного абразивного зубофрезерування циліндричних зубчастих коліс // Сучасні питання виробництва та ремонту в промисловості і на транспорті: Матеріали Міжнародного науково-технічного семінару, 26–27 березня 2024 р. – Київ: АТМ України, 2024. – С. 24 –25.
13. Гасанов М.І., Клочко О.О., Заковоротний О.Ю., Пермінов Є.В. Технологічний регламент оптимізації систем відновлення функціональних властивостей великогабаритних відкритих зубчатих передач // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні – Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: Techniques in a machine industry: зб. наук. пр. / Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». – Харків : НТУ «ХПІ», 2018. – № 6 (1282) 2018. – С. 107–112. – ISSN 2079–004X.
14. Клочко А.А., Гасанов М.І., Басова Е.В. Регламент выбора и назначения параметров состояния поверхностного слоя закаленных зубчатых колес. Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології у машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 33 (1205). – С. 145–157. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079–004X.
15. Клочко О.О., Гасанов М.І., Заковоротний О.Ю., Майборода В.С., Охрименко О.О., Федоренко В.С. Технологічні передумови деформації і рушення зрізуемого шару при швидкісному зубофрезеруванні загартованих циліндричних зубчатих коліс на основі атомного підходу // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a machine industry: зб. наук.пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Харків : НТУ «ХПІ», 2022. – № 1 (5) 2022. – С. 10–20. – ISSN 2079-004X, DOI: 10.20998/2079-004X.2022.1(5).02
16. M. Ciavarella, On the significance of asperity models predictions of rough contact with respect to recent alternative theories, *ASME J. Tribol.* 139 (2017) 021402–1–11
17. Нежебовський В.В., Дергоусов В.М., Пермьяков О.А., Клочко О.О., Устиненко О.В., Рябченко С.В.

Новітні процеси обробки зубчастих коліс редукторів вугледобувних комбайнів // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XX Міжнародної науково-технічної конференції 01 – 03 вересня 2022 року / за заг. ред. В. Д. Ковальова. – Краматорськ-Тернопіль: ДДМА, 2022. – С. 162– 163. – ISBN 978-617-7889-20-4..

18. Нежебовський В.В., Бережний Р.А., Пермяков О.А., Ключко О.О., Рябченко С.В., Устиненко О.В. Системи параметрів стану робочих поверхонь і точності розмірів циліндричних загартованих зубчастих коліс очисного комбайну укд200-500 нового покоління // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a machine industry: зб. наук.пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Харків : НТУ «ХПІ», 2022. – № 2 (6) 2022. – С. 7–15. – ISSN 2079-004X, DOI: 10.20998/2079-004X.2022.2(6).02.

19. Ramadani, R., Belsak, A., Kegl, M., Predan, J., & Pehan, S. (2018). Topology optimization based design of lightweight and low vibration gear bodies. *International Journal of Simulation Modelling*, 17(1), 92-104.

20. Gołębski, R., & Ivandic, Z. (2018). Analysis of Modification of Spur Gear Profile. *Tehnicki Vjesnik*, 25(2), 643-648.

References (transliterated):

1. Hasanov M.I., Permiakov O.A., Zakovorotnyi O.Iu., Klochko O.O., Okhrymenko O.A., Maiboroda V.S., Hlushko V.S. Enerhoefektyvnist impulsnoho shvydkisnoho zubofrezeruvannia z urakhuvanniam atomnoho pidkhdou // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Serii: Tekhnolohii v mashynobuduvanni = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a machine industry: зб. наук.пр. / Nats. tekhn. un-t «Kharkiv. politekhn. in-t». – Kharkiv : NTU «KhPI», 2024. № 2 (10) 2024. – S. 102–106. – ISSN 2079-004Kh, ISSN 2786-7587, DOI: 10.20998/2079-004X.2024.2(10).11.

2. B.L. Tyshevych, D.D. Muhenov Intelektualna systema upravlinnia shvydkistiu na bazi neuronnoi merezhi dlia elektropryvodiv z synkhrornym dvyhunom z postiinymy mahnitamy // Elektryfikatsiia ta avtomatyzatsiia hirnychkykh robit Vypusk №30 UDK 681.515+62-551.453

3. Obruch I. V. Keruvannia neuronnoiu merezheiu dvomasovoi elektromekhanichnoi systemy z rozryvom u kinematychnykh peredachakh // Zbirnyk naukovykh prats, tematychnyi vypusk «Problemy avtomatyzovanoho elektropryvodu. Teoriia i praktyka», t.1, Visnyk NTU «KhPI», No 5, 2002, s. 1-11. 302 – 304.

4. Rumelhart D. E., Hinton G. E., Williams R. J. Learning representation by back-propagating errors // *Nature*. – 1986. – vol. 323. – pp. 533 – 536.

5. De Jong K. A. Genetic Algorithms: A 10 Year Perspective //In: Procs of the First Int. Conf. on Genetic Algorithms, 1985. – pp. 167 – 177.

6. Klochko O.O., Hasanov M.I., Zakovorotnyi O.Iu., Maiboroda V.S., Okhrymenko O.O., Fedorenko V.S. Tekhnolohichni peredumovy deformatsii i rushennia zrizuemoho sharu pry shvydkisnomu zubofrezuvanni zahartovanykh tsylindrycheksykh zubchatykh kolis na osnovi atomnoho pidkhdou // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Serii: Tekhnolohii v mashynobuduvanni = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a machine industry: зб. наук.пр. / Nats. tekhn. un-t «Kharkiv. politekhn. in-t». – Kharkiv : NTU «KhPI», 2022. – № 1 (5) 2022. – S. 10–20. – ISSN 2079-004Kh, DOI: 10.20998/2079-004X.2022.1(5).02.

7. Gasanov M.I., Klochko A.A., Cherkashina G.I., Perminov E.Г. Gruppyv`e marshrutny`e tekhnologicheskije procsy` vosstanovleniya krupnogabaritny`kh zubchaty`kh koles na osnove imitaczionogo modelirovaniya s uchetom progressiruyushhikh vidov iznosa // Nadi`jni st` i`nstrumentu ta optimi`zacii`ya tekhnologi`chnik system: зб.наук. пр. – Kramatorsk : DDMA, 2018. – Vip. 42. – S. 28–36.

8. Ia. Kyrylenko, B. Vorobiov, S. Senchenko, Yu. Kutovy, Liu Khan Rozrobka systemy keruvannia tiahovoho asynkhrornoho elektropryvodu na osnovi neiromerezhi // Tekhnichni nauky ta tekhnolohii №3(33) 2023 DOI: 10.25140/2411-5363-2023-3(33)-198-204

9. Kovalev Viktor D, Vasilchenko Yana V., Klochko Alexander A., Gasanov Magomedemin I. Technology of restoration of large gear boxes. Dašić, P. (editor): *Modern trends in metalworking*, Vol. 1: Vrnjačka Banja: SaTCIP Publisher Ltd., 2018. – R. 43–63. ISBN 978-86-6075-065-7.

10. Klochko, O., Okhrymenko, O., & Shapovalov, M. (2021). Initial instrumental surface of modular millings on the basis of one-band hyperboloid for the manufacture of gear wheeled wheels. *Mechanics and Advanced Technologies*, 5(3), 374–380. <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2021.5.3.250168>.

11. Polonskyi, L. H., Klochko, O. O., Okhrymenko, O. A., Betsko, Yu. M., Koval, B. H., & Khraban, D. V. (2024). Osoblyvosti vyznachennia profilu instrumentu dlia hvyntovykh poverkhon za dopomohoiu CAD-system. *Tekhnichna inzheneriia*, (1(93), 70–80. [https://doi.org/10.26642/ten-2024-1\(93\)-70-80](https://doi.org/10.26642/ten-2024-1(93)-70-80)

12. Hasanov M.I., Zakovorotnyi O.Iu., Klochko O.O., Riabchenko S.V. Perspektyva doslidzhennia protsesu shvydkisnoho abrazyvnoho zubofrezeruvannia tsylindrychnykh zubchastykh kolis // Suchasni pytannia vyrobnytstva ta remontu v promyslovosti i na transporti: Materialy Mizhnarodnoho naukovy-tekhnichnoho seminaru, 26–27 bereznia 2024 r. – Kyiv: ATM Ukrainy, 2024. – S. 24 –25.

13. Hasanov M.I., Klochko O.O., Zakovorotnyi O.Iu., Perminov Ye.V. Tekhnolohichni rehlement optymizatsii system vidnovlennia funktsionalnykh vlastyvostei velykohabarytnykh vidkrytykh zubchatykh peredach // Visnyk

Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Serii: Tekhnologii v mashynobuduvanni – Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: Techniques in a machine industry: zb. nauk. pr. / Natsionalnyi tekhnichniy universytet «Kharkivskiy politekhnichniy instytut». – Kharkiv : NTU «KhPI», 2018. – № 6 (1282) 2018. – S. 107–112. – ISSN 2079-004Kh.

14. Klochko A.A., Hasanov M.Y., Basova E.V. Rehlament vybora y naznacheniya parametrov sostoianiya poverkhnostnoho sloia zakalennykh zubchatykh koles. Visnyk NTU «KhPI». Serii: Tekhnologii u mashynobuduvanni. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2016. – № 33 (1205). – S. 145–157. – Biblyohr.: 7 nazv. – ISSN 2079-004Kh.

15. Klochko O.O., Hasanov M.I., Zakovorotnyi O.Iu., Maiboroda V.S., Okhrymenko O.O., Fedorenko V.S. Tekhnolohichni peredumovy deformatsii i rushennia zrizuiemoho sharu pry shvydkisnomu zubofrezuvanni zahartovanykh tsylindrycheskyykh zubchatykh kolis na osnovi atomnnoho pidkhidu // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Serii: Tekhnologii v mashynobuduvanni = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a machine industry: zb. nauk.pr. / Nats. tekhn. un-t «Kharkiv. politekhn. in-t». – Kharkiv : NTU «KhPI», 2022. – № 1 (5) 2022. – S. 10–20. – ISSN 2079-004Kh, DOI: 10.20998/2079-004X.2022.1(5).02

16. M. Ciavarella, On the significance of asperity models predictions of rough contact with respect to recent alternative theories, ASME J. Tribol. 139 (2017) 021402–1–11

17. Nezhebovskiy V.V., Derhousov V.M., Permiakov O.A., Klochko O.O., Ustynenko O.V., Riabchenko S.V. Novitni protsesy obrobky zubchastykh kolis reduktoriv vuhledobuvnykh kombainiv // Vazhke mashynobuduvannia. Problemy ta perspektyvy rozvytku. Materialy XX Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii 01 – 03 veresnia 2022 roku / za zah. red. V. D. Kovalova. – Kramatorsk-Ternopil: DDMA, 2022. – S. 162–163. – ISBN 978-617-7889-20-4.

18. Nezhebovskiy V.V., Berezhnyi R.A., Permiakov O.A., Klochko O.O., Riabchenko S.V., Ustynenko O.V. Systemy parametriv stanu robochykh poverkhon i tochnosti rozmiriv tsylindrychnykh zahartovanykh zubchastykh kolis ochysnoho kombainu ukd200-500 novoho pokolinnia // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Serii: Tekhnologii v mashynobuduvanni = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a machine industry: zb. nauk.pr. / Nats. tekhn. un-t «Kharkiv. politekhn. in-t». – Kharkiv : NTU «KhPI», 2022. – № 2 (6) 2022. – S. 7–15. – ISSN 2079-004Kh, DOI: 10.20998/2079-004X.2022.2(6).02.

19. Ramadani, R., Belsak, A., Kegl, M., Predan, J., & Pehan, S. (2018). Topology optimization based design of lightweight and low vibration gear bodies. International Journal of Simulation Modelling, 17(1), 92-104.

20. Gołębski, R., & Ivandic, Z. (2018). Analysis of Modification of Spur Gear Profile. Tehnicki Vjesnik, 25(2), 643-648.

Надійшла (received) 10.11.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Охрименко Олександр Анатолійович (Ohrimenko Oleksandr) – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інтегрованих технологій машинобудування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ; пр. Перемоги, 37, Україна; e-mail: alexhobs77@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5446-6987

Майборода Віктор Станіславович (Maiboroda Viktor) – доктор технічних наук, професор, професор кафедри конструювання машин Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6902-6928>; e-mail: maiborodavs@gmail.com.

Заковоротний Олександр Юрійович (Zakovorotniy Alexander) – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри обчислювальна техніка та програмування, Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м. Харків; тел.: (097) 967-3271; e-mail: arcade@i.ua; ORCID: 0000-0003-4415-838X.

Гасанов Магомедємін Ісагомедович (Hasanov Magomedemin) – доктор технічних наук, професор кафедри «Технологія машинобудування та металорізальні верстати» Навчально-наукового інституту механічної інженерії і транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: +38 (057) 707-66-34; e-mail: kh.hpi.hasanov@gmail.com, ORCID:0000-0002-2161-2386

Клочко Олександр Олександрович (Klochko Oleksandr) – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інтегровані технології машинобудування ім. М.Ф.Семка, Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, вул. Кирпичова, 2, Україна; e-mail: ukrstanko21@ukr.net, ORCID: 0000-0003-2841-9455;

Глушко Станіслав Сергійович (Stanislav Hlushko) – аспірант кафедри Інтегровані технології машинобудування Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, вул. Кирпичова, 2, Україна; тел: +380967871482 e-mail: glushko1979@ukr.net, ORCID: 0i009-0006-2459-2153;

Федоренко Віталій Сергійович (Fedorenko Vitalii) – доктор філософії, асистент кафедри інтегровані технології машинобудування ім. М.Ф.Семка Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м. Харків; тел.: (095) 9159688–e-mail: 19fws98@gmail.com, ORCID 0009-0006-3781-6144