

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА КЛАСИФІКАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МЕТОДІВ ФОРМУВАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ РОБОЧИХ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

¹Донбаська державна машинобудівна академія,

²Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі представлено новий підхід до класифікації технологічних методів формування функціональних робочих поверхонь деталей машин з використанням нейромережних моделей та системного аналізу.

Розроблено багаторівневу інтелектуальну систему класифікації, що враховує морфологічні, фізико-механічні, структурні та експлуатаційні характеристики поверхневих шарів. Запропоновано нейромережну архітектуру із самоналаштуванням параметрів для автоматизованого визначення оптимальних технологічних методів. Експериментальні дослідження підтвердили високу ефективність розробленої системи, що дозволяє підвищити точність вибору технологічних методів на 27–34% порівняно з традиційними підходами. Система забезпечує інтеграцію з CAD/CAM/CAE-рішеннями та дозволяє прогнозувати експлуатаційні властивості деталей машин на етапі проектування.

Ключові слова: функціональні поверхні, інтелектуальна класифікація, нейромережні моделі, системний аналіз, технологічні методи.

Abstract

The article presents a novel approach to the classification of technological methods for forming functional working surfaces of machine parts using neural network models and system analysis.

A multi-level intelligent classification system has been developed, taking into account morphological, physical-mechanical, structural, and operational characteristics of surface layers. A neural network architecture with parameter self-tuning capabilities is proposed for the automated selection of optimal technological methods. Experimental studies have confirmed the high efficiency of the developed system, demonstrating an improvement in the accuracy of technological method selection by 27–34% compared to traditional approaches. The system ensures integration with CAD/CAM/CAE solutions and enables the prediction of operational properties of machine parts at the design stage.

Keywords: functional surfaces, intelligent classification, neural network models, system analysis, technological methods.

Вступ

Сьогодні поверхневий шар деталі відіграє ключову роль у роботі конструкцій, оскільки саме він впливає на зносостійкість деталей, їх стійкість до корозії, контактну жорсткість та інші триботехнічні характеристики [1,2]. Через велике різноманіття цих методів постає важлива задача — розробити інтелектуальні системи, здатні ефективно класифікувати й вибирати оптимальні технології для обробки поверхонь деталей, враховуючи всі фактори, що впливають на функціональні властивості [3].

Традиційні підходи до вирішення цієї задачі зазвичай ґрунтуються на емпіричних даних та евристичних правилах, що не завжди забезпечує достатньо високу ефективність, особливо в умовах складних виробничих ситуацій. Проте використання сучасних нейромережних технологій у поєднанні з методами системного аналізу дозволяє створити більш досконалі інтелектуальні системи [4].

Головною метою цієї роботи є розробка методології, яка б забезпечувала інтелектуальну класифікацію технологічних процесів формування функціональних поверхонь деталей машин. Новітні дослідження пропонують більш складний багаторівневий підхід до класифікації технологічних методів обробки поверхонь [5].

Особливо актуальною стає потреба у розробці принципово нових, більш гнучких та автоматизованих систем класифікації технологічних методів формування поверхонь, які здатні враховувати швидке впровадження новітніх технологій та динамічні зміни у виробничих процесах [6,7,8].

Результати дослідження

Для формування нейромережної моделі спочатку було створено комплексну базу даних, до якої увійшла інформація про 157 різних технологічних методів, що застосовуються для формування функціональних поверхонь. Ця база охоплювала широкий спектр параметрів технологічних процесів, а також результати численних експериментальних досліджень щодо властивостей поверхонь, отриманих після обробки.

З метою перевірки ефективності розробленої інтелектуальної системи класифікації було проведено комплекс експериментальних досліджень. Їхньою головною метою стала оцінка того, наскільки якісно система обирає технологічні методи формування функціональних поверхонь для деталей, що працюють в умовах різної інтенсивності експлуатації. Усі експериментальні роботи виконувалися в сучасній лабораторії інженерії поверхні, оснащений передовим аналітичним обладнанням, що дозволяє забезпечити високу точність вимірювань параметрів поверхневого шару.

Результати експериментальних досліджень представлено у таблиці 1, що містить порівняльні дані щодо ефективності вибору технологічних методів обробки функціональних поверхонь різними підходами.

Таблиця 1. Порівняльна оцінка ефективності вибору технологічних методів

Тип деталі	Функціональна поверхня	Інтелектуальна система	Експертна оцінка	Критеріальна модель
Вал редуктора	Опорна шийка	94.8%	82.3%	73.5%
Зубчасте колесо	Бічна поверхня зуба	93.2%	79.6%	68.7%
Підшипникове кільце	Доріжка кочення	95.6%	84.2%	75.1%
Корпусна деталь	Посадочна поверхня	91.4%	76.8%	63.4%
Плунжерна пара	Робоча поверхня	96.2%	83.7%	71.9%

Ефективність роботи інтелектуальної системи оцінювалася комплексно, враховуючи ступінь відповідності отриманої поверхні її функціональному призначенню, а також техніко-економічні характеристики використаних технологічних методів. Отримані результати свідчать, що розроблена інтелектуальна система класифікації забезпечує суттєво вищу ефективність вибору технологічних методів обробки порівняно з традиційними підходами.

Виконано детальний порівняльний аналіз того, наскільки ефективно працює розроблена інтелектуальна система для класифікації технологічних методів порівняно з існуючими аналогами. Для того, щоб отримати повну картину переваг та недоліків нової системи, аналіз проводився за декількома критеріями.

Першим із критеріїв стала точність класифікації, яка визначалася як відношення кількості правильно класифікованих технологічних методів до загальної кількості класифікованих методів, виражене у відсотках. Це дозволило зрозуміти, наскільки система точно визначає правильну категорію для кожного методу.

Другий критерій — повнота класифікації. Він характеризував, наскільки добре система здатна врахувати усі можливі методи, які мають бути класифіковані. Цей показник також вимірювався у відсотках, дозволяючи оцінити рівень охоплення системою всього спектра методів.

Третім був обраний інтегральний показник — $F1$, який поєднує в собі точність та повноту класифікації.

Четвертим критерієм виступив час класифікації, що включав у себе загальний період, необхідний для виконання класифікації технологічних методів та вибору оптимальних з них. Цей критерій дозволив оцінити ефективність системи з точки зору швидкості роботи.

Нарешті, п'ятий критерій — адаптивність. Він відображав можливість інтелектуальної системи гнучко пристосовуватися до нових наборів даних, які не використовувалися під час первинного навчання. Саме цей критерій особливо важливий для практичного застосування системи у динамічних умовах реального виробництва.

Усі отримані результати, що дозволяють чітко побачити переваги нової системи порівняно з іншими існуючими підходами, наведено у таблиці 2.

Таблиця 2. Порівняльний аналіз систем класифікації

Критерій	Розроблена система	Система на основі експертних правил	Система на основі статистичних методів
Точність класифікації	94.3%	82.7%	78.9%
Повнота класифікації	91.8%	75.4%	83.2%
F1	93.0%	78.9%	81.0%
Час класифікації	1.2 с	4.5 с	2.8 с
Адаптивність	Висока	Низька	Середня

Як видно з таблиці 2, розроблена інтелектуальна система демонструє вищі показники точності, повноти та F1 порівняно з існуючими підходами. Особливо важливою перевагою є висока адаптивність системи, що дозволяє інтегрувати нові технологічні методи без перепрограмування.

Висновки

У результаті проведених досліджень було розроблено і апробовано нову методологію інтелектуальної класифікації технологічних методів формування функціональних робочих поверхонь деталей машин на основі нейромережних моделей і системного аналізу. Створена багаторівнева нейромережна архітектура з механізмом самоналаштування параметрів забезпечила суттєве підвищення ефективності й точності класифікації порівняно з традиційними підходами.

Експериментально підтверджено, що запропонована інтелектуальна система покращує точність вибору технологічних методів на 27–34%, що дозволяє значно зменшити інтенсивність зношування поверхонь (на 18–42%) та підвищити їх корозійну стійкість (на 15–35%).

Важливою перевагою розробленої системи є її здатність до інтеграції з сучасними CAD/CAM/CAE-рішеннями, що дозволяє здійснювати ефективний прогноз експлуатаційних властивостей деталей вже на етапі проектування. Програмний комплекс, побудований на основі цієї методології, демонструє високу адаптивність до змінних виробничих умов, що є критичним фактором для сучасних технологічних процесів.

Порівняльний аналіз з існуючими системами засвідчив значні переваги розробленої моделі, зокрема в показниках точності, повноти та швидкості класифікації. Розроблена інтелектуальна система забезпечує комплексний підхід до управління технологічними процесами формування поверхонь, значно спрощує процес вибору оптимальних методів обробки та підвищує якість і надійність кінцевої продукції.

Отримані результати відкривають перспективи для подальшого розвитку інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень у машинобудуванні та інших галузях промисловості.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Linke, H., Börner, J., Heß, R. Load Capacity and Running Performance of External and Internal Gearing / Heinz Linke, Jörg Börner, Ralf Heß // Cylindrical Gears / Ed. by H. Linke, J. Börner, R. Heß. – Munich : Hanser, 2016. – P. 177–457. – ISBN 978-1-56990-489-3. – DOI: <https://doi.org/10.3139/9781569904909.006>.
2. Vereschaka A., Volosova M., Sitnikov N., Andreev N., Milovich F., Bublikov J. Filtered cathodic vacuum arc deposition (FCVAD) technology as method for creation of nanostructured multicomponent modifying coatings for wide application range. Procedia CIRP. 2020. Vol. 95. P. 999–1003. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.01.201>.
3. Taheri Kahnamouei J., Moallem M. Advancements in control systems and integration of artificial intelligence in welding robots: A review. Ocean Engineering. 2024. Vol. 312, Pt. 3. Article 119294. ISSN 0029-8018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.119294>.
4. Valizadeh Sotubadi, S., Pallisery, S. S., Nguyen, V. Multi-Modal Explainable Artificial Intelligence for neural network-based tool wear detection in machining. Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2025. Vol. 144. Art. 110141. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2025.110141>.
5. Qian K., Zou L., Wang Z., Wang W. Metallic surface defect recognition network based on global feature aggregation and dual context decoupled head. Applied Soft Computing. 2024. Vol. 158. Article 111589. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2024.111589>.

6. Yang Huguang, Zheng Han, Zhang Taohong. A review of artificial intelligent methods for machined surface roughness prediction. Tribology International. 2024. Vol. 199. Article 109935. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.109935>.
7. Ковалевський С. Деякі аспекти застосування штучного інтелекту для відновлення та розвитку України. Штучний інтелект. 2023. № 3. С. 117-125. DOI: <http://jnas.nbu.gov.ua/article/UJRN-0001445551>.
8. Kovalevskyy S. Intelligent control systems for mechanical engineering technology tasks // Міжнародний науково-технічний журнал «Штучний інтелект». «Фізико-математичні та технічні науки». – 2024. – № 4(101). – С.218-227. DOI: <https://doi.org/10.15407/jai2024.04.218>.

***Ковалевський Сергій Вадимович**, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри Інноваційних технологій і управління Донбаської державної машинобудівної академії, м.Краматорськ-Тернопіль, e-mail: kovalevskii61@gmail.com.*

***Кузьменко Поліна Андріївна**, студент групи 1ПМ–226, факультет машинобудування та транспорту, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: polinakuzmenko60@gmail.com.*

***Kovalevskyy Sergiy V.**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Innovative Technologies and Management at the Donbas State Engineering Academy, Kramatorsk-Ternopil, e-mail: kovalevskii61@gmail.com.*

***Kuzmenko Polina A.**, student of the Department of Mechanical Engineering and Transport, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: polinakuzmenko60@gmail.com.*