

ISSN: 2304-4519
eISSN: 2312-0584

17 (2) 2025

Технологічні комплекси науковий журнал

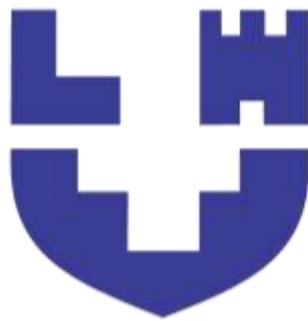
scientific journal
Technological Complexes



МІНІСТЕРСТВО НАУКИ ТА ОСВІТИ УКРАЇНИ
ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ТЕХНОЛОГІЧНІ КОМПЛЕКСИ

ISSN 2304-4519
(Print)



ISSN 2312-0584
(Online)

**НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ
2025, Том 17, №2**

Заснований у січні 2010 року

Головний редактор: проф., д-р техн. наук, заслужений діяч
науки і техніки України – Богдан ПАЛЬЧЕВСЬКИЙ

ЛУЦЬК • 2025

Технологічні комплекси : наук. журнал. Одеса :
Видавничий дім «Гельветика», 2025. Т. 17. № 2. 136 с.

Видання зареєстровано рішенням Національної ради
України з питань телебачення і радіомовлення, як
суб'єкта у сфері друкованих медіа (рішення №1413 від
25 квітня 2024 року, ідентифікатор медіа R30-03928).

Рекомендовано до друку Науково-технічною радою
Луцького національного технічного університету
(протокол № 5 засідання від 18 грудня 2025 року)

«Технологічні комплекси» є науковим виданням України, у
якому можуть публікуватися результати дисертаційних робіт
на здобуття наукових ступенів доктора філософії та доктора
технічних наук.

Засновник: Луцький національний технічний університет.

Мова розповсюдження: українська та англійська.

Періодичність: 4 рази на рік.

Адреса редакції: Україна, 43018, вул. Львівська, 75,

м. Луцьк, Луцький національний технічний університет.

тел. +38(067)9741088

E-mail: tcomplex@lntu.edu.ua

сайт журналу: <https://eforum.lntu.edu.ua/index.php/tcomplex>

Головний редактор:**Editor-in-Chief:****Богдан ПАЛЬЧЕВСЬКИЙ** (Україна)**Bogdan PALCHEVSKYI** (Ukraine)

Д-р техн. наук, проф.

[ORCID: 0000-0002-4000-4992](https://orcid.org/0000-0002-4000-4992)

Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Заступник головного редактора:**Deputy Editor-in-Chief:****Любов КРЕСТЬЯНПОЛЬ** (Україна)**Lyubov KRESTYANPOL** (Ukraine)

Канд. техн. наук, доц.

[ORCID: 0000-0003-3617-7900](https://orcid.org/0000-0003-3617-7900)

PhD, Ass. Prof.

Олег КАЙДИК (Україна)**Oleh KAIDYK** (Ukraine)

Канд. техн. наук, доц.

[ORCID: 0000-0002-3620-270X](https://orcid.org/0000-0002-3620-270X)

PhD, Ass. Prof.

Редакційна колегія:**Editorial board:****Зіновій СТОЦЬКО** (Україна)**Zinoviy STOTSKO** (Ukraine)

Д-р техн. наук, проф.

[ORCID: 0000-0003-0423-8561](https://orcid.org/0000-0003-0423-8561)

Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Йордан Т. МАКСИМОВ (Болгарія)**Jordan T. MAXIMOV** (Bulgaria)

Д-р техн. наук, проф.

[ORCID: 0000-0002-8797-1525](https://orcid.org/0000-0002-8797-1525)

Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Антоні СЬВИЦЬ (Польща)**Antoni ŚWIĆ** (Poland)

Д-р техн. наук, проф.

[ORCID: 0000-0003-0405-4009](https://orcid.org/0000-0003-0405-4009)

Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Міхал БЕМБЕНЕК (Польща)**Michał BEMBENEK** (Poland)

Д-р техн. наук, проф.

[ORCID: 0000-0002-7665-8058](https://orcid.org/0000-0002-7665-8058)

Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Луїс Фрьолен РІБЕЙРУ (Португалія)**Luis Frólén RIBEIRO** (Portugal)

Д-р техн. наук, проф.

[ORCID: 0000-0003-4336-6216](https://orcid.org/0000-0003-4336-6216)

Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Йоріс ВЕЗІС (Литва)**JORIS VEZYS** (Lithuania)

Канд. техн. наук, доц.

[ORCID: 0009-0000-3731-0588](https://orcid.org/0009-0000-3731-0588)

PhD, Ass. Prof.

Андрій КУЦИК (Польща)**ANDRIY KUTSYK** (Poland)

Д-р техн. наук, проф.

[ORCID: 0000-0002-7832-609X](https://orcid.org/0000-0002-7832-609X)

Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Юрій КУЗНЕЦОВ (Україна)**Yurii KUZNIETSOV** (Ukraine)

Д-р техн. наук, проф.

[ORCID: 0000-0002-5107-3600](https://orcid.org/0000-0002-5107-3600)

Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Федір МАТИКО (Україна)**Fedir MATIKO** (Ukraine)

Д-р техн. наук, проф.

[ORCID: 0000-0001-6569-2587](https://orcid.org/0000-0001-6569-2587)

Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Роман ФЕДОРИШИН (Україна)**Roman FEDORYSHYN** (Ukraine)

Д-р техн. наук, проф.

[ORCID: 0000-0002-1972-8662](https://orcid.org/0000-0002-1972-8662)

Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Вадим СТУПНИЦЬКИЙ (Україна)**Vadym STUPNYTSKYI** (Ukraine)

Д-р техн. наук, проф.

[ORCID: 0000-0002-0921-3980](https://orcid.org/0000-0002-0921-3980)

Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Іван РЕГЕЙ (Україна)**Ivan REHEI** (Ukraine)

Д-р техн. наук, проф.

[ORCID: 0000-0002-3395-2994](https://orcid.org/0000-0002-3395-2994)

Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Сергій САПОН (Україна)**Serhii SAPON** (Ukraine)

Канд. техн. наук, доц.

[ORCID: 0000-0003-1082-6431](https://orcid.org/0000-0003-1082-6431)

PhD, Ass. Prof.

Віктор РУДЬ (Україна)**Viktor RUD** (Ukraine)

Д-р техн. наук, проф.

[ORCID: 0000-0001-5025-9510](https://orcid.org/0000-0001-5025-9510)

Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Олександр ПОВСТЯНОЙ (Україна)**Oleksandr POVSTIANOI** (Ukraine)

Д-р техн. наук, проф.

[ORCID: 0000-0002-1416-225X](https://orcid.org/0000-0002-1416-225X)

Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Микола ЯРОШЕВИЧ (Україна)**Mykola YAROSHEVYCH** (Ukraine)

Д-р техн. наук, проф.

[ORCID: 0000-0002-2436-5608](https://orcid.org/0000-0002-2436-5608)

Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Юрій ЛАПЧЕНКО (Україна)**Yurii LAPCHENKO** (Ukraine)

Канд. техн. наук, доц.

[ORCID: 0000-0001-7374-4770](https://orcid.org/0000-0001-7374-4770)

PhD, Ass. Prof.

DOI: <https://doi.org/10.36910/4293-52779-2025-17-02-01>
УДК 621.7.077: 681.513.3

Денисюк В. Ю.
канд. техн. наук, доцент
ORCID: 0000-0001-9268-5489

Луцький національний
технічний університет / Україна

МОДУЛЬ ТОЧНИХ МІКРОПЕРЕМІЩЕНЬ ДВОКООРДИНАТНОГО СТОЛИКА МІКРОСКОПА НА БАЗІ БІМОРФНИХ П'ЄЗОАКТЮАТОРІВ ТА АЛГОРИТМ ЙОГО КЕРУВАННЯ

Анотація: у статті представлено дослідження та розробку двокоординатного мікропозиціонуючого модуля предметного столика на основі біморфних п'єзоелектричних актюаторів із використанням високоточних ємнісних датчиків переміщень. Запропонована конструкція поєднує модуль грубих переміщень на базі крокових двигунів та модуль точних переміщень, що забезпечує комплексний діапазон переміщення від десятків міліметрів до субмікрометрових значень при збереженні високої жорсткості та компактності системи. Описано структурну схему столика, принцип роботи біморфних п'єзоактюаторів та особливості силового замикання за допомогою пружного кільця з берилієвої бронзи. Представлено кінематичну модель переміщень по осях X та Y, а також механізм компенсації куткових відхилень, які виникають при асиметричному силовому впливі на актюатори. Значну увагу приділено побудові системи зворотного зв'язку на основі трьох ємнісних датчиків AD7746, що забезпечують вимірювання положення столика з нанометровою точністю. Проаналізовано принцип дії триелектродної датчикової системи та визначено робочий діапазон зміни міжелектродного зазору. Розроблено алгоритми формування керуючих сигналів для досягнення плоскопаралельного руху столика, корекції кутового нахилу та усунення нелінійностей п'єзоелектричних приводів. Створена система керування на основі контролера dSPACE DS1104 і високовольтних підсилювачів TREK забезпечує високу швидкість, точність регулювання та стабільність роботи в замкненому контурі. Результати моделювання та експериментальних випробувань підтвердили можливість реалізації точного позиціонування в діапазоні до $\pm 0,5$ мм із субмікрометровою роздільною здатністю та мінімальними паразитними відхиленнями. Запропонований модуль може бути ефективно застосований у високоточних мехатронних комплексах, оптичних системах, мікробіологічних дослідженнях, медичних діагностичних установках та мікромеханічних технологіях.

Ключові слова: мікропозиціонування, біморфний п'єзоактюатор, двокоординатний столик, ємнісний датчик, мехатронний модуль, високоточні мікропереміщення.

ВСТУП, ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Сучасний розвиток мікро- і нанотехнологій, а також мікро- та наносистемної техніки зумовлює зростання потреби у високоточних системах позиціонування для роботи з об'єктами мікросвіту. У різних галузях – від біомедицини та мікроелектроніки до приладобудування і нанофабрикації – необхідні пристрої, здатні здійснювати контрольовані мікропереміщення з високою роздільною здатністю та стабільністю. Ефективність функціонування таких систем у значній мірі залежить від точності та швидкодії виконавчих механізмів, а також від якості алгоритмів керування, що забезпечують компенсацію похибок та стійкість роботи [1, 2].

Одним із найбільш перспективних способів забезпечення точного позиціонування є застосування п'єзоелектричних виконавчих пристроїв, зокрема біморфних п'єзоактюаторів (БПА). Вони характеризуються високою жорсткістю, відсутністю люфтів, компактністю та можливістю реалізації мікропереміщень у широкому діапазоні частот. Це дозволяє створювати багатокординатні мікроманіпуляційні модулі з високою точністю позиціонування, що є необхідним для дослідження та маніпуляцій з мікрооб'єктами у полі зору мікроскопа [3].

У науковій та технічній літературі представлено різноманітні конструкції систем точного позиціонування, проте значна частина з них або має високу вартість, або обмежені можливості щодо діапазону переміщень і конструктивної адаптації. Зокрема, використання багат шарових п'єзоперетворювачів у багатьох випадках ускладнює досягнення мікрометрових переміщень при компактних розмірах модуля. У цьому контексті біморфні п'єзоактюатори є оптимальним рішенням завдяки збільшеному ходу вільного кінця та простоті інтеграції в мікромеханічні системи [4, 5].

Особливий інтерес становлять двокоординатні предметні столики мікроскопів, які повинні забезпечувати переміщення мікрооб'єктів по осях X та Y із забезпеченням плоскопаралельності руху. При цьому важливим завданням є компенсація можливого кутового відхилення столика відносно початкового положення, що безпосередньо впливає на точність вимірювань та якість роботи системи технічного зору. У таких системах актуальною є розробка ефективних алгоритмів керування, що базуються на сигналах від цифрових ємнісних датчиків і забезпечують автоматичне корегування положення столика в реальному часі [6, 7].

У зв'язку з цим виникає потреба у створенні високоточних, надійних і відносно недорогих модулів мікропереміщень з використанням біморфних п'єзоактюаторів та інтелектуальних алгоритмів керування. Такі системи повинні поєднувати енергоефективність, конструктивну простоту, широкий діапазон робочих переміщень та здатність до високоточної компенсації кутових відхилень за рахунок використання цифрових ємнісних сенсорів.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

З розвитком мікро- і нанотехнологій та розширенням сфер застосування мікросистем техніки зростає потреба у високоточних пристроях для

позиціонування об'єктів у мікромасштабі. У системах дослідження та маніпулювання мікрооб'єктами, які виконують операції у полі зору мікроскопа, важливу роль відіграють багатокоординатні предметні столики. Вони повинні забезпечувати переміщення з мікрометровою точністю, стабільністю та відтворюваністю положення.

Існуючі конструкції приводів на основі багат шарових п'єзокерамічних елементів обмежені малим ходом переміщення при компактних габаритах, що ускладнює досягнення необхідної точності та діапазону переміщень. Крім того, у двокоординатних предметних столиках виникають кутові відхилення робочої платформи відносно початкової площини, що призводить до порушення плоскопаралельності руху. Це значно знижує точність позиціонування, впливає на якість зображення системи технічного зору та ускладнює виконання операцій над мікрооб'єктами [8, 9].

Для забезпечення стабільної роботи столика необхідно мати ефективну систему керування, здатну виявляти та компенсувати кутові відхилення за рахунок використання чутливих датчиків переміщення. При цьому актуальним є застосування біморфних п'єзоактюаторів, які забезпечують більший хід вільного кінця при компактній конструкції та дозволяють досягати мікропереміщень у широкому діапазоні [10, 11].

Таким чином, проблемою, що потребує вирішення, є розроблення конструкції модуля точних мікропереміщень двокоординатного столика на базі біморфних п'єзоактюаторів та створення алгоритму керування, який забезпечить компенсацію кутових відхилень і плоскопаралельний рух столика з високою точністю позиціонування.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Питання створення високоточних систем мікропозиціонування активно досліджуються у сучасній науково-технічній літературі. Значна кількість робіт присвячена розробленню багатокоординатних мікроманіпуляторів і предметних столиків мікроскопів, призначених для позиціонування мікрооб'єктів у біомедичних, технічних та нанотехнологічних застосуваннях. У цих системах забезпечення високої точності та стабільності переміщень є одним із ключових завдань [12, 13].

У працях багатьох авторів запропоновано конструкції приводів та модулів позиціонування на базі п'єзоелектричних елементів, які завдяки високій жорсткості, відсутності люфтів та малій інерційності є найбільш перспективними виконавчими механізмами для мікро- та нанопереміщень. Пристрої з паралельною кінематикою на біморфних п'єзоактюаторах дозволяють отримати достатній діапазон переміщень при компактності конструкції та високій швидкодії, що робить їх придатними для роботи у складі оптичних систем і маніпуляторів малої маси. Дослідження свідчать про ефективність таких приводів у задачах позиціонування біологічних об'єктів, мікрочипів, елементів електроніки та мікромеханічних структур [3-8].

Значна увага у сучасних публікаціях приділяється також питанням вимірювання переміщень та реалізації точного зворотного зв'язку. Перспективними сенсорами є ємнісні датчики високої роздільної здатності, які

забезпечують вимірювання мікро- та нанопереміщень із мінімальною похибкою. Розроблені цифрові ємнісні перетворювачі на основі Σ - Δ -архітектури, зокрема AD7746, демонструють високу лінійність та чутливість, що дозволяє використовувати їх у системах прецизійного позиціонування. Публікації вказують на необхідність інтеграції датчиків такого типу у замкнені системи керування для компенсації похибок і коливань рухомих елементів [8, 9].

Дослідження в області мехатронних модулів також охоплюють питання побудови алгоритмів керування, здатних забезпечувати плоскопаралельність руху та корекцію кутових відхилень робочої платформи. Відомо, що саме кутове зміщення є однією з головних причин зниження точності позиціонування у двокоординатних столиках з п'єзоактюаторами, а тому актуальні роботи спрямовані на створення ефективних схем керування з багатоканальними вимірювальними датчиками та адаптивними алгоритмами [3, 6, 8, 14].

Проведений аналіз свідчить, що попри значний прогрес у галузі розробки п'єзоприводів і систем мікропозиціонування, проблема забезпечення високої точності, компенсації кутових відхилень та збільшення діапазону мікропереміщень у двокоординатних столиках залишається актуальною. Це зумовлює необхідність створення нових конструкцій мікропозиціонуючих модулів на основі біморфних п'єзоактюаторів та удосконалення алгоритмів керування, що й обумовлює напрями даного дослідження.

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Метою статті є розроблення та дослідження двокоординатного мікропозиціонуючого модуля на основі біморфних п'єзоелектричних приводів із використанням ємнісного датчика переміщення для забезпечення високої точності позиціонування та плоскопаралельності руху робочої платформи.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ДОСЛІДЖЕННЯ

Сучасні наукові дослідження дедалі частіше спрямовані на вивчення та маніпулювання об'єктами мікросвіту, що потребує створення високоточних і надійних технічних засобів. Робота з мікророзмірами вимагає застосування комплексних мікроманіпуляційних систем, до складу яких входять мікроскопи з інтегрованими системами технічного зору, прецизійні мікроманіпулятори та автоматизовані багатокоординатні предметні столики з можливістю роботи у замкненому циклі керування.

Особливу актуальність мають мікропозиціонуючі системи, у яких поєднані модулі грубого та точного переміщення. Модуль грубих переміщень забезпечує швидке встановлення зразка в задану ділянку поля зору, тоді як модуль точних мікропереміщень відповідає за прецизійне позиціонування у межах мікрометрового діапазону. Саме п'єзоелектричні приводи, зокрема біморфні актюатори, дають найкраще поєднання необхідних параметрів – високої жорсткості, точності, швидкодії, компактності конструкції та доступної собівартості. Завдяки цим перевагам вони є одними з найефективніших виконавчих елементів у мікромеханічних маніпуляційних комплексах.

На рисунку 1 наведено експериментальний комплекс для дослідження мікрооб'єктів. Він включає основу 1, оптичний мікроскоп 2 з відеокамерою 3, що забезпечує передачу зображення на монітор, мікроманіпулятор 4 для виконання мікромеханічних операцій, автоматизований багатокординатний предметний столик 5, органи ручного керування у вигляді джойстиків 6, монітор відображення 7 та систему керування 8, яка координує роботу всіх модулів. Така система дозволяє здійснювати високоточне позиціонування мікрооб'єктів, їх аналіз та маніпулювання у режимі реального часу.

Для реалізації грубих переміщень за координатами X, Y та Z у широкому діапазоні до 50 мм доцільно застосовувати трьохкоординатний модуль, побудований на основі крокових двигунів. Такий модуль забезпечує переміщення з необхідною швидкістю та достатньою точністю для попереднього позиціонування об'єкта в полі зору мікроскопа. На платформі цього модуля додатково встановлюється прецизійний модуль точних переміщень предметного столика, який функціонує на базі біморфних п'єзоактуаторів (БПА). Об'єднання двох модулів – грубого та точного, дає змогу отримати як великий діапазон переміщень, так і високу точність у локальній області. При цьому вартість такої комбінованої системи істотно нижча, ніж у високоточних систем з одним модулем, які виконують одночасно функції грубого та точного позиціонування та оснащені абсолютними енкодерами як датчиками переміщення.

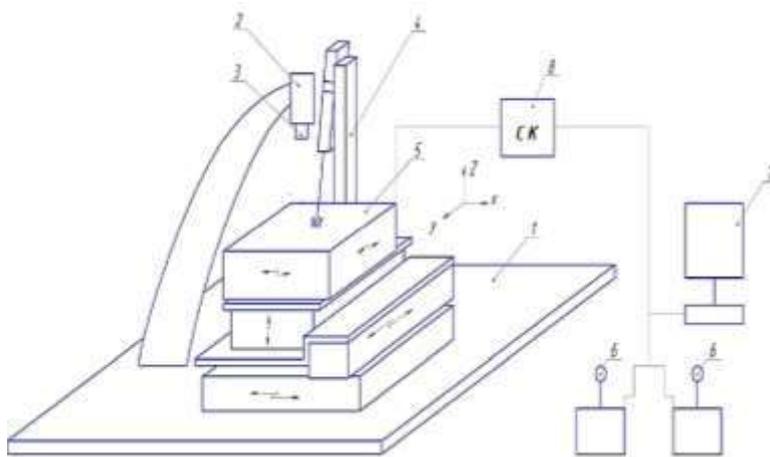


Рисунок 1 – Схема комплексу для дослідження мікрооб'єктів

Здійснення переміщення предметного столика в межах до 0,5 мм із точністю близько 0,5 мкм за допомогою багатошарових п'єзокерамічних перетворювачів є складним завданням, оскільки їхній максимальний хід при прийнятних габаритах у 10-100 разів менший за необхідний. Це обмеження значно ускладнює побудову високоточних мікропозиціонуючих систем на їх основі. Тому використання біморфних п'єзоактуаторів є більш перспективним рішенням, оскільки вони здатні забезпечувати значно більші переміщення кінця елемента при збереженні компактності конструкції.

На рисунку 2 подано принципову схему роботи модуля точних переміщень двокоординатного столика, оснащеного чотирма п'єзоактюаторами. Біморфні актюатори 1, 2 та 3, 4 закріплені консольно на основі 5 таким чином, щоб їхні вільні кінці через спеціальні виступи взаємодіяли з робочою платформою столика 6. Для забезпечення стабільного контакту і рівномірного притискання платформи застосовано пружний елемент 7 у вигляді тонкого кільця, виготовленого з берилієвої бронзи. Така конструкція дає можливість рівномірно розподіляти зусилля між приводами та забезпечувати симетричність переміщень платформи.

Завдяки використанню чотирьох БПА забезпечується можливість незалежного керування переміщеннями вздовж двох координат, а також компенсації можливих кутових відхилень платформи, що суттєво підвищує точність роботи системи та її динамічну стабільність.

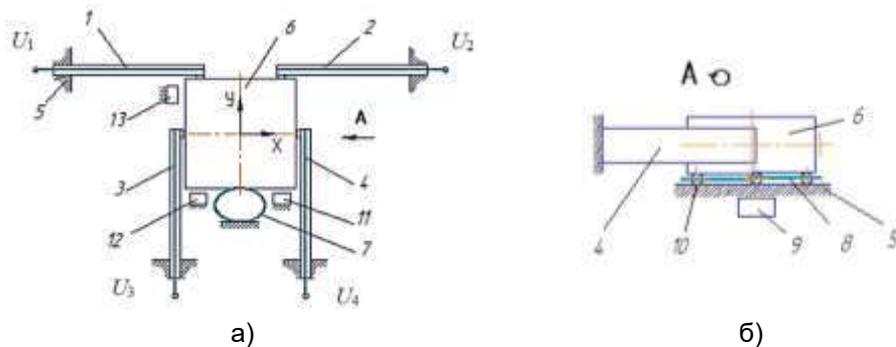


Рисунок 2 – Схема двокоординатного столика
а – вигляд зверху, б – по стрілці А

Робоча платформа столика 6 опирається на кулькові опори 10, які розміщені на площині основи 5. Кульки утримуються у фіксованому положенні за допомогою плоского сепаратора 8, що запобігає їх неконтрольованому переміщенню та забезпечує плавне ковзання платформи під час зміни її положення. Для створення стабільного притискного зусилля між платформою 6 та основою 5 застосовується постійний магніт 9, завдяки якому забезпечується надійний контакт незалежно від умов роботи системи.

На основі також встановлені три датчики переміщення: два датчики 11 і 12, що вимірюють зміщення столика вздовж осі Y, та один датчик 13, відповідальний за визначення координати столика вздовж осі X. Сумарна інформація від усіх трьох датчиків дозволяє не лише точно визначити поточні координати платформи, а й оцінювати її кутове відхилення у площині XY, що є критично важливим для забезпечення плоскопаралельності руху.

Під час подачі рівних електричних напруг $U_1 = U_2$ на біморфні п'єзоактюатори 1 і 2 відбувається їх синхронне згинання, унаслідок чого вільні кінці актюаторів переміщують столик 6 униз уздовж осі Y, стискаючи пружний елемент 7. Якщо знаки поданих напруг змінити на протилежні, актюатори згинаються у зворотний бік, розтискаючи пружину 7, що спричиняє підняття платформи догори. У разі несиметричної дії актюаторів 1 і 2, коли $U_1 \neq U_2$,

разом із лінійним переміщенням виникає і кутова складова, що змінює орієнтацію платформи у площині XY. Це проявляється у неоднакових показках датчиків 11 і 12, після чого система керування корегує значення U_1 та U_2 , забезпечуючи симетричність деформацій і стабільний лінійний рух.

Переміщення столика вздовж осі X забезпечується дією актуаторів 3 і 4. При подачі рівних напруг $U_3 = U_4$ їхні вільні кінці зміщуються одночасно в одному напрямку, переміщуючи платформу 6 вправо або вліво залежно від полярності поданого сигналу. Для цього напрямку переміщень силова взаємодія є менш стабільною, оскільки відсутнє пружне замикання, аналогічне тому, що реалізоване для осі Y, що ускладнює керування та потребує розроблення більш складних алгоритмів компенсації.

З метою забезпечення надійності та точності позиціонування столика в обох координатних осях необхідно створити спеціалізовані алгоритми керування. Для осі Y завдання відносно просте, оскільки силове замикання через пружину 7 стабілізує поведінку системи. Для осі X необхідна додаткова компенсація паразитних переміщень, нелінійності та кутових відхилень, що потребує застосування алгоритмів із зворотним зв'язком від датчиків переміщення.

На рисунку 3, (а) представлено залежність переміщення столика від напруги U_4 , а на рисунку 3, (б) – від напруги U_3 . Обидві криві отримані шляхом розрахунків згідно з аналітичним виразом (1):

$$\xi_x = \frac{A}{2}(U_3 + U_4), \quad (1)$$

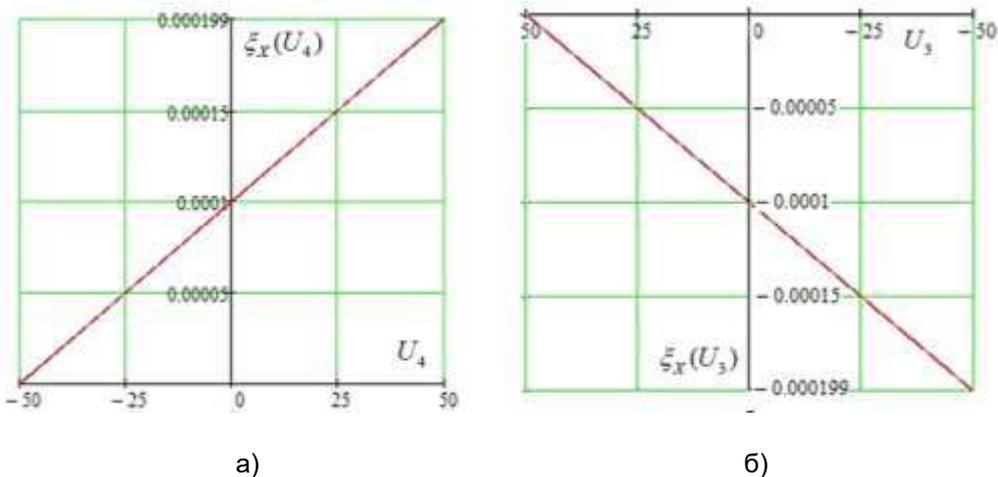


Рисунок 3 – Залежність переміщення столика (м) від напруги U (В)
 а – від напруги U_4 при фіксуванні значення $U_3 = U_{\max}$; б – від напруги U_3 при фіксуванні значення $U_4 = -U_{\max}$

Отримані залежності (рис. 3) дають можливість сформувати раціональний алгоритм формування керувальних сигналів, що подаються на біморфні п'єзоактуатори, для забезпечення переміщення столика в обох координатних

напрямок. Аналіз цих характеристик дозволяє визначити оптимальні режими подачі напруги на актюатори, враховуючи їх нелінійність, гістерезис та чутливість до зміни полярності, що є критично важливим для досягнення високої точності позиціонування.

На рисунку 4 наведено структурну схему системи керування двокоординатним столиком. Система містить як цифрові, так і аналогові компоненти, що забезпечують узгоджену роботу виконавчих та вимірювальних модулів. До складу цифрової частини входять контролери, модуль обробки сигналів, інтерфейс оператора та блоки аналого-цифрового (АЦП) і цифро-аналогового (ЦАП) перетворення. Аналогова частина містить підсилювачі, блоки формування напруги та безпосередньо виконавчі елементи – біморфні п'єзоактюатори. Допоміжні модулі включають системи живлення, фільтрації сигналів та захисні елементи.

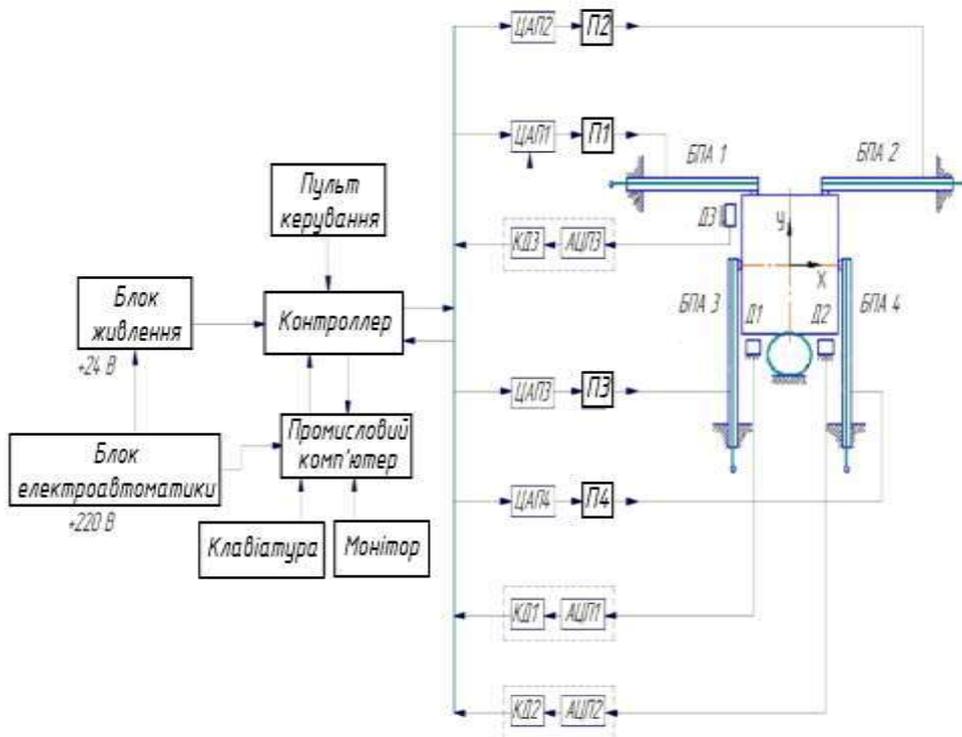


Рисунок 4 – Схема керування модуля точних переміщень столика
Д1-Д3 – ємнісні датчики переміщення; КД1-КД3 – контролери датчиків;
ЦАП1-ЦАП4 – цифро-аналогові перетворювачі; АЦП1-АЦП3 – аналого-цифрові перетворювачі; У1-У4 – підсилювач

Важливим елементом схеми є ємнісні датчики зворотного зв'язку, що забезпечують безперервний контроль положення платформи та передавання інформації в контролер для корекції керувальних сигналів. Завдяки цьому реалізується замкнене керування, яке дозволяє компенсувати кутові відхилення, паразитні переміщення та інші похибки, що виникають у процесі роботи.

Запропонована структура керування забезпечує високу стабільність, точність та повторюваність мікропереміщень, що робить систему придатною для застосувань у мікромеханічних, біомедичних та оптичних комплексах.

Допоміжні модулі системи включають блок електроавтоматики та блок живлення. Блок електроавтоматики забезпечує стабільне електроживлення промислового комп'ютера та всієї силової частини системи керування, що є необхідною умовою для коректного функціонування високоточного обладнання.

Керуючі сигнали від промислового комп'ютера передаються на контролер через перехідник USB-COM, після чого розподіляються між цифро-аналоговими перетворювачами (ЦАП1-ЦАП4). Сформовані аналогові сигнали, підсилені підсилювачами П1-П4, подаються безпосередньо на біморфні п'єзоактуатори (БПА1-БПА4), що забезпечують просторове переміщення предметного столика.

Система зворотного зв'язку побудована на основі ємнісних датчиків переміщень (Д1-Д3). Отримані з датчиків аналогові сигнали подаються на аналого-цифрові перетворювачі (АЦП1-АЦП3), де перетворюються у цифровий формат. Подальша обробка вимірних координат здійснюється контролерами датчиків (КД1-КД3), після чого інформація надходить у центральний блок керування. На підставі отриманих даних система автоматично коригує положення столика, компенсуючи його можливі кутові відхилення та повертаючи його у площину, перпендикулярну початковому положенню. Така корекція є критично важливою для забезпечення плоскопаралельного руху за координатами X та Y з високою точністю.

Панель керування, інтегрована з основним контролером, дозволяє оператору активувати або зупинити систему, а також задавати програми переміщення та режими роботи столика.

Як датчики переміщення обрано високоточні ємнісні датчики AD7746 виробництва Analog Devices. У їхній структурі реалізовано вбудований контролер з Σ - Δ перетворювачем ємності у цифровий код (CDC), що забезпечує пряму роботу з вимірювальними конденсаторами без додаткової аналогової обв'язки. Архітектура AD7746 гарантує високу роздільну здатність (24 біти без пропуску кодів, ефективна – до 21 біта), лінійність $\pm 0,01\%$ та низькі похибки вимірювання, що робить їх оптимальними для високоточних мікропозиціювальних систем.

В якості контролера керування обрано модуль DS1104 R&D фірми dSPACE, оснащений 16-бітними АЦП і ЦАП, що забезпечують швидку обробку сигналів у реальному часі. Як силові елементи використані високовольтні підсилювачі 601C фірми TREK, здатні забезпечувати стабілізовану вихідну напругу в діапазоні $0 \dots \pm 300$ В при вихідному струмі до ± 10 мА (постійний) або до ± 20 мА у піковому режимі. Сукупність обраних датчиків, перетворювачів, контролера та підсилювачів забезпечує повноцінне прецизійне керування двокоординатним п'єзоелектричним столиком.

Принцип роботи ємнісних датчиків положення ґрунтується на залежності ємності конденсатора від відстані між його обкладинками. Щоб уникнути необхідності підведення дротових з'єднань до рухомих частин столика, у

конструкції застосовано трьохелектродні датчики на базі послідовного з'єднання конденсаторів. Такий датчик (рис. 5) складається з двох квадратних електродів розміром 10×10 мм, розміщених на нерухомій основі та підключених до системи керування, а також третього, вдвічі більшого за площею (20×10 мм), електрода, закріпленого на рухомій платформі столика. Останній електрод не має електричного з'єднання і взаємодіє з нерухомими електродами виключно за рахунок ємнісного зв'язку, що забезпечує безконтактне та надійне вимірювання переміщень.

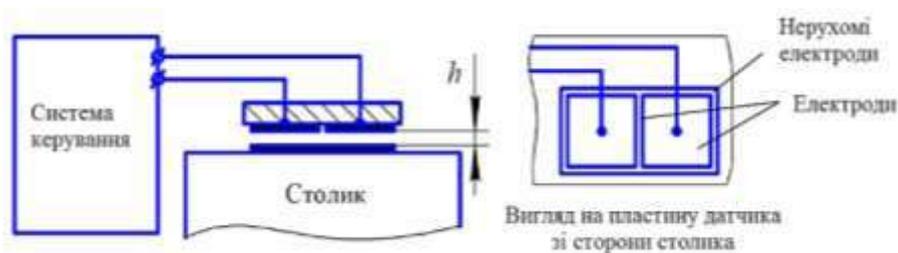


Рисунок 5 – Схема ємнісного датчика переміщень з трьома електродами

На рисунку 6 наведено графік залежності величини h від ємності C . Із представленої кривої видно, що робочий діапазон відстаней між обкладинками конденсатора повинен знаходитись у межах від 0,106 мм до 0,606 мм. Це означає, що для вказаних геометричних розмірів електродів мінімальний технологічно допустимий зазор між ними має становити не менше 0,1 мм, що гарантує як коректність вимірювань, так і механічну надійність конструкції.

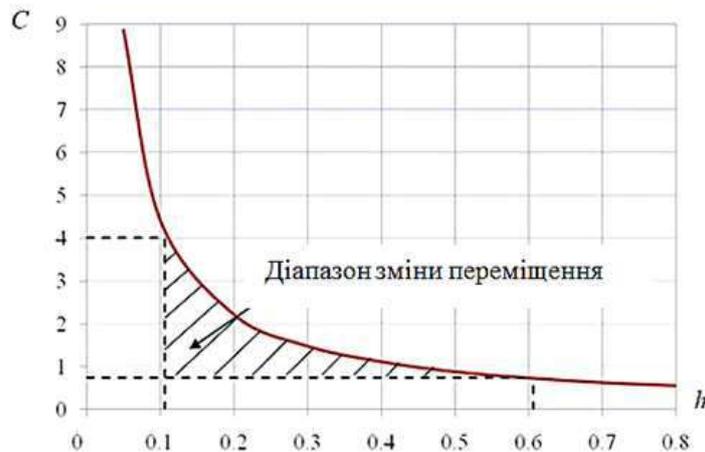


Рисунок 6 – Залежність відстані між обкладинками (мм) від ємності датчика (пФ)

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Точність роботи ємнісного датчика визначається низкою параметрів, серед яких одним із ключових є точність перетворення аналогового сигналу у цифровий. У системі використовується контролер AD7746, оснащений

високоточною 24-розрядною схемою аналого-цифрового перетворення. Відповідно, дискретизаційна похибка перетворення становить $1/224$.

У зоні мінімального зазору між електродами (0,1 мм) похибка визначення переміщення дорівнює: $0,1 \text{ мм} \times 1/224 \approx 5,96 \times 10^{-9} \text{ мм}$.

Отримане значення похибки знаходиться на рівні одиниць нанометрів, що повністю відповідає вимогам до високоточного позиціонування та забезпечує можливість використання датчика в системах мікрометричного та субмікрометричного керування.

Крім того, зазначена точність свідчить про те, що AD7746 забезпечує достатній запас роздільної здатності навіть за умов можливих паразитних впливів – температурних дрейфів, флуктуацій напруги живлення та механічних мікрівбрацій. Це робить систему вимірювання стабільною та придатною для використання у високоточних мехатронних модулях сканування та прецизійного позиціонування.

ВИСНОВКИ

У роботі представлено комплексне дослідження двокоординатного мікропозиціонуючого модуля предметного столика, побудованого на основі біморфних п'єзоактюаторів. Запропонована конструкція забезпечує збільшений діапазон мікропереміщень у порівнянні з багат шаровими п'єзоперетворювачами, зберігаючи компактність та високу жорсткість системи. Розроблена схема інтеграції трьох ємнісних датчиків дозволяє точно визначати координати платформи та кутові відхилення, що забезпечує ефективну роботу замкненого контуру керування.

Проведене моделювання показало можливість забезпечення плоскопаралельності руху та компенсації паразитних переміщень шляхом адаптивного регулювання напруги на п'єзоактюаторах. Розроблена система керування на базі контролера dSPACE DS1104 та підсилювачів TREK гарантує високу швидкодію й точність позиціонування.

Отримані результати підтверджують роботоздатність запропонованої конструкції та алгоритмів і свідчать про можливість застосування модуля у мікромеханічних, біомедичних та оптичних комплексах, де необхідні надійні та високоточні мікропереміщення.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Зайцев Р. В., Кіріченко М. В., Зайцева Л. В. Методи дослідження структури тонких плівок: підручник. Харків: ФОП Бровін О. В., 2021. 320 с.
- [2] Теслюк В., Зелінський А., Каркульовський В. Розширене проєктування мікросистемних пристроїв: навч. посіб. URL: <https://surl.li/jxzlal> (дата звернення 23.11.2025).
- [3] Васильківський І. С., Фединець В. О., Юсик Я. П. Виконавчі пристрої систем автоматизації. URL: <https://surl.li/tgqjor> (дата звернення 24.11.2025).
- [4] Хорольський В. П., Коренець Ю. М. Мехатроніка (мехатроніка та інтелектуальна автоматика): навч. посіб. Кривий Ріг: ДонНУЕТ, 2023. 342с.
- [5] Тимчик Г. С., Скицюк В. І., Клочко Т. Р. Конструювання мехатронних модулів. Точність мехатронних модулів: навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря

- Сікорського, 2024. 79 с.
- [6] Теряєв В. І., Король С. В. Системи програмного та слідкуючого керування рухом: підручник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 150 с.
- [7] Денисюк В. Ю., Кравчук О. О. Система керування точністю мікропереміщень предметного столика мікроскопа. Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології – 2025: матер. XI Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Київ, 07 трав. 2025 р.). Київ: «Політехніка», 2025. С. 16-17.
- [8] Омелян А. В. Методи та система підвищеної ефективності керування п'єзоелектричним мікроманіпулятором: дис. ... д-ра філософії: 172. Київ, 2022. 160 с.
- [9] Денисюк В. Ю., Симонюк В. П., Лапченко Ю. С., Шибковський І. А. Метрологічне забезпечення вимірювання механічних та трибологічних властивостей матеріалів на субмікронному і нанометровому діапазонах лінійних розмірів. «Перспективні технології та прилади»: зб. статей. Луцьк: ЛНТУ, 2020. Вип. 17. С. 33-41.
- [10] Mohammad H. Abedin-Nasab. Handbook of robotic and imageguided surgery. URL: <https://surl.li/fzmxim> (дата звернення 25.11.2025).
- [11] Денисюк В. Ю., Симонюк В. П., Лапченко Ю. С. Дослідження точності мікропереміщень предметного столика мікроскопа з біморфними п'єзоактюаторами. Технічна творчість: зб. наук. праць. Хмельницький: ХНУ, 2021. № 4. С. 10-11.
- [12] Однодворець Л. В., Пазуха І. М., Лукавенко І. М. Оптиелектронні і лазерні системи в електроніці та медицині: навч. посіб. Суми: Сумський державний університет, 2022. 127 с.
- [13] Денисюк В. Ю., Симонюк В. П., Лапченко Ю. С., Тимощук А. А., Черняк С. О. Аналіз систем мікропереміщень для маніпулювання мініатюрними об'єктами. «Теоретичні і експериментальні дослідження в сучасних технологіях матеріалознавства та машинобудування»: зб. матер. VIII Міжнар. наук.-техн. конф. (м. Луцьк, 25-28 трав. 2021 р.) Луцьк: ЛНТУ, 2021. С. 25-27.
- [14] Andrew J. Kurdila. Dynamics and control of robotic systems. URL: <https://surl.li/vkiiii> (дата звернення 25.11.2025).

MODULE OF PRECISE MICROMOVEMENT OF A TWO-COORDINATE MICROSCOPE STAGE BASED ON BIMORPHIC PIEZOACTUATORS AND ITS CONTROL ALGORITHM

**Denysiuk, V. PhD, Associate Professor
Lutsk National Technical University / Ukraine**

Abstract. The article presents the research and development of a two-coordinate micropositioning module of the object stage based on bimorph piezoelectric actuators using high-precision capacitive displacement sensors. The proposed design combines a coarse displacement module based on stepper motors and a precise displacement module, which provides a comprehensive

range of displacements from tens of millimeters to submicrometer values while maintaining high rigidity and compactness of the system. The structural diagram of the stage, the principle of operation of bimorph piezoelectric actuators and the features of force locking using an elastic ring made of beryllium bronze are described. The kinematic model of displacements along the X and Y axes is presented, as well as the mechanism for compensating for angular deviations that arise when an asymmetric force acts on the actuators. Considerable attention is paid to the construction of a feedback system based on three AD7746 capacitive sensors, which provide measurement of the stage position with nanometer accuracy. The principle of operation of the three-electrode sensor system was analyzed and the operating range of the interelectrode gap change was determined. Algorithms for generating control signals were developed to achieve plane-parallel table movement, angular tilt correction, and elimination of nonlinearities of piezoelectric drives. A control system based on the dSPACE DS1104 controller and TREK high-voltage amplifiers provides high speed, control accuracy, and stability of operation in a closed loop. The results of modeling and experimental tests confirmed the possibility of implementing precise positioning in the range of up to ± 0.5 mm with submicrometer resolution and minimal parasitic deviations. The proposed module can be effectively used in high-precision mechatronic complexes, optical systems, microbiological research, medical diagnostic installations, and micromechanical technologies.

Keywords: micropositioning, bimorph piezoactuator, two-coordinate stage, capacitive sensor, mechatronic module, high-precision microdisplacements.

Дата першого надходження
статті до видання

11.09.2025 р.

Дата прийняття статті до друку
статті після рецензування

01.10.2025 р.

Дата
оприлюднення

23.12.2025 р.

DOI: <https://doi.org/10.36910/4293-52779-2025-17-02-02>
УДК 519.8: 004.6: 004.9

Свирид Ю. В.

магістрант

Гуменюк Л. О.

канд. техн. наук, доцент

ORCID: 0000-0002-7678-7060

Гуменюк П. О.

канд. техн. наук, доцент

ORCID: 0000-0002-6251-8548

Луцький національний

технічний університет / Україна

КЛАСИФІКАЦІЯ АЛГОРИТМІВ ПОБУДОВИ ШЛЯХУ РОБОТА З ПЕРЕШКОДАМИ

Анотація: у роботі складено огляд та класифікацію одинадцяти алгоритмів побудови шляху робота з перешкодами, поділених на шість категорій: класичні підходи на графах (A^* , Дейкстри), евристичні підходи для динамічних середовищ (D^* Lite, Θ^*), метаевристичні стратегії (Генетичний алгоритм, RRT), біонатхненні методи (ACO, GWO), імовірнісні алгоритми (PRM, RRT*) та гібридні алгоритми (A^* з потенційними полями). Визначено, що кожен із розглянутих алгоритмів має окремі властивості, які важливі для різних класів задач планування. Описано основні характеристики та переваги кожного типу алгоритмів, що є важливим для їх програмної реалізації та порівняльного аналізу ефективності.

Ключові слова: алгоритм, рух з перешкодами, моделювання, аналіз даних.

ВСТУП, ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Класифікація методів планування шляху за різними критеріями, такими як використання інтелектуальних технологій, тип навколишнього середовища та повнота інформації про нього, не є лише описовою. Вона відображає основні рушійні сили для розвитку алгоритмів. Наприклад, якщо алгоритм демонструє низьку продуктивність у динамічному середовищі, це створює потребу в розробці нових алгоритмів або модифікацій, які явно враховують динаміку. Аналогічно, обмежена інформація про середовище вимагає переходу від глобального планування до локального або до постійного перепланування. Це вказує на те, що обмеження алгоритмів в одній категорії (наприклад, традиційних методів для Істатичних середовищ з повною інформацією) безпосередньо стимулюють інновації та створення рішень в інших категоріях (наприклад, евристичних методів для динамічних середовищ з неповною інформацією) або гібридних підходів. Такий взаємозв'язок демонструє безперервний цикл досліджень та розробок у робототехніці, де нові виклики в реальних умовах експлуатації (наприклад, невідомі, рухомі перешкоди, вимоги до роботи в реальному часі) призводять до вдосконалення та винаходу більш надійних та адаптивних рішень для планування шляху.

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Метою роботи є аналіз та опис класифікації та основних типів алгоритмів побудови шляху робота з перешкодами.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ДОСЛІДЖЕННЯ

Класичні алгоритми пошуку на графах. Класичні алгоритми пошуку є основою для багатьох методів планування шляху. Вони ефективні в середовищах, де інформація про простір є повністю відомою та статичною, а середовище може бути представлене у вигляді графа або сітки.

Алгоритм Дейкстри призначений для знаходження найкоротшого шляху від однієї початкової вершини до всіх інших вершин у графі з невід'ємними вагами ребер. Його діяльність ґрунтується на ітеративному процесі: на кожному кроці обирається невідвіdana вершина з найменшою поточною відстанню від початку, після чого оновлюються відстані до її сусідів. Цей процес триває доти, доки всі вершини не будуть відвідані або поки не буде знайдено шлях до цільової вершини [1].

У контексті планування шляху робота, робоче поле попередньо розбивається на клітини або вузли графа, а ребрам присвоюються значення, що відображають відстань або вартість переміщення. Перешкоди моделюються як недоступні вузли або ребра з нескінченною вагою, що ефективно виключає їх з розгляду під час пошуку шляху. Головною перевагою алгоритму Дейкстри є гарантоване знаходження найкоротшого шляху у статичних середовищах без негативних ваг ребер. Однак, його основним недоліком є висока обчислювальна вартість для великих графів, оскільки він обчислює шлях до всіх вершин, навіть якщо потрібен шлях лише до однієї цілі.

Алгоритм A^* – це розширенням алгоритму Дейкстри, що поєднує його переваги з евристичною функцією для прискорення пошуку [1, 2]. Він обчислює вартість шляху від початкової точки до кінцевої, використовуючи евристичну функцію $h(n)$, яка оцінює відстань від поточної вершини n до цільової. Загальна функція вартості $f(n)$ визначається як сума фактичної вартості $g(n)$ (від початкової точки до n) та евристичної оцінки $h(n)$. Алгоритм обирає наступну вершину для розширення, яка має найменше значення $f(n)$.

Подібно до Дейкстри, A^* працює на дискретизованій карті (сітці або графі), де перешкоди позначаються як непрохідні. Евристична функція, наприклад, манхеттенська або евклідова відстань, направляє пошук до цілі, уникаючи розширення вузлів у напрямку перешкод, оскільки їх вартість буде значно вищою або нескінченною. Перевагою A^* є значно вища швидкість порівняно з Дейкстрою у багатьох випадках завдяки евристиці, при цьому зберігаючи гарантію оптимальності, якщо евристика є допустимою. Проте, A^* може мати проблеми з продуктивністю в реальному часі та великим обсягом обчислень на вузол, особливо в складних середовищах.

Алгоритм Флойда-Уоршелла призначений для знаходження найкоротших шляхів між усіма парами вузлів у зваженому орієнтованому графі [3]. Його робота ґрунтується на принципі динамічного програмування, де оцінки

найкоротших шляхів ітеративно покращуються шляхом розгляду можливості використання проміжних вершин.

Хоча алгоритми Дейкстри та A^* знаходять шлях від однієї точки до багатьох або однієї цілі, Флойд-Уоршелл є цінним, коли необхідно швидко визначити найкоротший шлях між будь-якими двома точками в мережі. Це особливо корисно в сценаріях з кількома роботами або кількома можливими початковими/кінцевими точками, де потрібно вибрати оптимальну пару (наприклад, який БПЛА найшвидше дістанеться до цілі). Перешкоди інтегруються шляхом встановлення нескінченної ваги для ребер, що перетинають перешкоди, або шляхом початкового побудови графа, який включає лише безперешкодні зв'язки. Алгоритм Флойда-Уоршелла ефективний для задач «всі пари найкоротших шляхів» і може бути використаний для динамічного призначення ваг у моделях глибоких графів для оптимізації шляхів. Однак, його основним недоліком є висока обчислювальна складність, що робить його менш придатним для дуже великих графів або динамічних середовищ, де граф часто змінюється.

Хвильовий алгоритм (Breadth-First Search, BFS) є алгоритмом пошуку на графі, який досліджує всі вершини на поточному рівні глибини, перш ніж переходити до вершин наступного рівня. У контексті планування шляху, особливо в сіткових картах, його можна розуміти як фізичне розповсюдження хвильового фронту [1]. Від початкової клітини хвиля розповсюджується на сусідні клітини, позначаючи їх відстанню від початку.

Перешкоди в сітковій карті позначаються як непрохідні клітини, через які хвильовий фронт не може розповсюджуватися. Це забезпечує, що знайдений шлях буде обходити перешкоди. Після розповсюдження хвилі до цільової клітини, шлях відновлюється зворотним ходом від цілі до початку, слідуючи за градієнтом найменших значень. Перевагою хвильового алгоритму є гарантоване знаходження найкоротшого шляху в незважених графах (якщо всі ребра мають однакову вагу) та простота реалізації. Проте, він не враховує ваги ребер (якщо вони різні) і може бути неефективним для великих просторів, оскільки досліджує всі можливі шляхи на кожному рівні.

Евристичні алгоритми. Такі алгоритми, часто базуючись на класичних методах, впроваджують оптимізації та адаптації для підвищення ефективності, особливо у складних або динамічних середовищах.

Модифікований A^* спрямований на подолання обмежень традиційного A^* , таких як низька продуктивність у реальному часі, великий обсяг обчислень на вузол, тривалий час обчислення та низька ефективність пошуку. Покращення включають оптимізацію евристичних функцій та коригування відстаней до перешкод на карті [4].

Одним з ключових методів є розширення перешкод (expansion distance), що суттєво змінює діапазон чутливості мобільного робота. Це дозволяє планувати шлях з більшою відстанню до перешкод, забезпечуючи достатній простір для маневрування та підвищуючи безпеку, особливо під час поворотів. Розмір радіуса розширення зазвичай визначається радіусом самого робота. Перевагами модифікованого A^* є покращена точність планування шляху, зменшення ризику зіткнень та здатність генерувати більш

плавні та реалістичні траєкторії, особливо у випадку гібридного A^* . Однак, це може призвести до збільшення часу виконання та довжини шляху.

Алгоритм D^* Lite є ефективним алгоритмом пошуку найкоротшого шляху у зваженому орієнтованому графі, основною особливістю якого є здатність працювати в динамічних середовищах, де структура графа не відома заздалегідь або постійно змінюється [1]. Він є ефективною модифікацією A^* , що вимагає менше часу обчислень та скорочує кількість розширених вузлів.

D^* Lite дозволяє роботу вільно переміщатися в невідомому та швидко змінюваному середовищі. При виявленні змін (наприклад, появи нових перешкод або зникнення старих), алгоритм ефективно переплановує шлях, адаптуючись до нової обстановки без необхідності повного перерахунку з нуля. Це робить його ідеальним для динамічних середовищ зі змінними перешкодами. Перевагами D^* Lite є його ефективність у динамічних та невідомих середовищах, швидке перепланування та менші обчислювальні витрати порівняно з повним перерахунком A^* . Проте, його реалізація є складнішою порівняно з A^* .

Алгоритм Θ^* є алгоритмом планування шляху на основі пошуку на графі, який забезпечує оптимальний шлях з більшою гнучкістю, ніж алгоритм A^* , з точки зору маршрутів. Ключова відмінність від A^* полягає в тому, що батьківський вузол вершини в Θ^* не обов'язково має бути сусіднім, якщо між ними існує пряма видимість (line-of-sight) [5]. Це дозволяє генерувати «будь-які кути» (any-angle) шляхів, що є більш реалістичним для руху роботів, ніж шляхи, обмежені сіткою.

Θ^* використовує механізм перевірки видимості, щоб «зламати» обмеження растрового середовища. Це дозволяє роботу планувати шлях, який не проходить через вузли сітки, а замість цього може «зрізати кути» навколо перешкод, якщо пряма лінія до батьківського вузла є вільною. Це допомагає уникнути надмірної кількості точок повороту та гострих кутів, які є проблемою для традиційних сіткових алгоритмів. Перевагами Θ^* є генерація плавніших та коротших шляхів порівняно з A^* на сіткових картах та більш реалістичні траєкторії для мобільних роботів. Однак, традиційний Θ^* може бути складним для одночасного врахування глобальних та детальних аспектів планування, а також може обходити більше вузлів, що призводить до значного обсягу обчислень, особливо зі збільшенням розміру карти [6].

Еволюція від A^* до модифікованого A^* та Θ^* демонструє критичну зміну від чистої оптимальності найкоротшого шляху до якості шляху (плавності, запасу безпеки) як першочергової мети в плануванні шляху роботів. Для фізичних роботів математично «найкоротший» шлях (наприклад, зигзагоподібний на сітці) може бути непрактичним, енергетично неефективним або навіть небезпечним через кінематичні обмеження, граничні можливості приводів або шуми сенсорів. Акцент зміщується від чисто геометричного найкоротшого шляху до «здійсненого та безпечного» шляху, який мінімізує втрати енергії, знос та ризик зіткнень.

Метаевристичні алгоритми. Метаевристичні алгоритми – це оптимізаційні підходи, які не гарантують знаходження глобального оптимуму, але є дуже

ефективними для пошуку «достатньо хороших» рішень у складних, багатовимірних або нелінійних просторах, де традиційні методи можуть бути неефективними.

Генетичні алгоритми (ГА) є метаевристикою, натхненною процесом природного відбору, що належить до ширшого класу еволюційних алгоритмів [7]. Вони працюють шляхом ітеративної модифікації популяції індивідуальних рішень, де кожне рішення (хромосома) представляє можливий шлях для робота. Шляхи оцінюються за допомогою функції вартості (фітнесу), яка враховує такі параметри, як відстань, кількість змін напрямку та зіткнення з перешкодами [8]. Найкращі рішення (з найменшою вартістю) вибираються для «розмноження» за допомогою генетичних операторів, таких як схрещування та мутація, для створення нового покоління [7, 8].

Обробка перешкод є критичною частиною функції вартості. Якщо будь-яка точка запропонованого шляху збігається з позицією перешкоди, вартість цієї хромосоми різко збільшується, що значно зменшує її ймовірність бути обраною для наступного покоління. ГА можуть ефективно планувати шлях як зі статичними, так і з динамічними перешкодами. Перевагами ГА є здатність знаходити оптимальні шляхи у складних, динамічних середовищах з непередбачуваними перешкодами та гнучкість у визначенні функції фітнесу для врахування різних критеріїв (довжина, плавність, безпека). Проте, їх недоліками є повільна збіжність, схильність до локальних оптимумів, невизначена спрямованість мутації. Стохастична природа може призвести до непослідовних результатів, що вимагає багаторазових запусків.

Метод потенційних полів передбачає рух мобільного пристрою вздовж ліній векторного поля [1]. Ціль створює притягуюче потенційне поле, а перешкоди – відштовхуюче. Сила відштовхування зменшується зі збільшенням відстані до перешкоди. Сума цих векторів (притягування до цілі та відштовхування від перешкод) визначає напрямок руху робота.

Перешкоди моделюються як джерела відштовхувальних сил, які «виштовхують» робота з небезпечних зон. Для функціонування в динамічному середовищі, сума векторів перераховується через короткі проміжки часу на основі показань сенсорів, що дозволяє роботу реагувати на рухомі перешкоди. Перевагами алгоритму залитого поля є простота реалізації та ефективність у реальному часі для уникнення перешкод. Однак, його основним недоліком є локальність підходу, що часто робить його непридатним для досягнення комплексних цілей через схильність до потрапляння в локальні мінімуми або зависання в «пастках».

Метод RRT (Rapidly-exploring Random Tree) полягає в швидкому дослідженні простору конфігурацій шляхом побудови дерева опорних точок, яке послідовно розширюється від початкової до кінцевої точки [9]. Процес починається зі стартового дерева, що складається лише з початкового пункту. На кожному кроці генерується випадкова точка в області, і до дерева додається новий вузол, з'єднаний з найближчим існуючим вузлом дерева, якщо шлях між ними вільний від перешкод.

Кожен новий вузол та ребро, що додаються до дерева, проходять перевірку на зіткнення з перешкодами. Якщо виявляється зіткнення, точка

відкидається або ребро замінюється. RRT ефективний для навігації в складних, багатовимірних просторах з перешкодами, оскільки він не вимагає попереднього обчислення всього простору конфігурацій. Він може бути використаний для перепланування в динамічних середовищах, коли перешкоди блокують бажаний шлях. Перевагами RRT є висока ефективність для задач з великою кількістю вимірів, нелінійними динаміками або диференціальними обмеженнями. Він не потребує попереднього обчислення простору конфігурацій та здатний швидко знаходити шлях у складних середовищах. Проте, він не гарантує оптимальності шляху і може бути неефективним у складних середовищах, таких як сади, через рівномірну випадкову вибірку, яка може сповільнювати збіжність.

Біонатхненні алгоритми. Біонатхненні алгоритми черпають натхнення з природних процесів та колективної поведінки організмів для вирішення оптимізаційних задач, включаючи планування шляху.

Мурашиний алгоритм (ACO) імітує поведінку мурах, що шукають їжу. Мурахи залишають феромонні сліди на шляхах, які вони проходять, і інші мурахи з більшою ймовірністю слідує шляхами з вищою концентрацією феромонів [10]. З часом феромони випаровуються, дозволяючи алгоритму адаптуватися до змін у середовищі [11].

У плануванні шляху, «мурахи» досліджують простір, залишаючи «феромони» на пройдених шляхах. Шляхи, що уникають перешкод і є коротшими, отримують більше феромонів, приваблюючи більше «мурах». Покращені версії ACO використовують такі модифікації, як покращена евристична функція (включення штучного потенційного поля для притягання до цілі), адаптивні правила оновлення феромонів та метод обрізки трикутників для усунення зайвих точок повороту, що робить шляхи плавнішими та ефективнішими. Перевагами ACO є ефективність для пошуку оптимальних шляхів у складних графах та здатність адаптуватися до змін у середовищі. Проте, його недоліками є повільна швидкість збіжності, схильність до потрапляння в локальні оптимуми та надмірна кількість точок повороту в традиційній реалізації.

Алгоритм рою часток (PSO) – це оптимізаційний метод, натхнений соціальною поведінкою рою птахів або косяків риб [12]. Кожна «частка» (потенційне рішення) переміщується в просторі пошуку, коригуючи свою швидкість та позицію на основі власного найкращого досвіду (pbest) та найкращого досвіду всього рою (gbest).

У плануванні шляху, частки представляють можливі траєкторії. Якщо позиція частки знаходиться всередині перешкоди, цей шлях відкидається. Перешкоди можуть бути змодельовані як розширені області (збільшені на радіус робота), щоб забезпечити безпечний прохід. PSO використовує функцію фітнесу, яка мінімізує довжину шляху та час подорожі, уникаючи зіткнень. Перевагами PSO є простота, легкість реалізації, надійність, швидка збіжність. Він ефективний для пошуку глобальних оптимумів у нелінійних задачах. Проте, може застрягти в локальних оптимумах у дуже складних ландшафтах фітнесу.

Алгоритм бджолоїної колонії (ABC) – це потужна техніка оптимізації,

натхненна поведінкою медоносних бджіл під час пошуку їжі [13]. Він використовує популяційний підхід, де штучні бджоли (розвідники, робітники, спостерігачі) співпрацюють для пошуку оптимальних рішень у просторі пошуку, балансуючи між дослідженням (exploration) та експлуатацією (exploitation).

У плануванні шляху, бджоли шукають «джерела їжі» (потенційні шляхи), оцінюючи їх «якість». Шляхи, що уникають перешкод та є коротшими/ефективнішими, розглядаються як кращі джерела їжі. ABC може оптимізувати траєкторії роботів у складних середовищах з перешкодами, знаходячи найкоротші або найефективніші шляхи, уникаючи зіткнень. Він також може працювати в динамічних середовищах з рухомими перешкодами. Перевагами ABC є ефективність для складних оптимізаційних задач та здатність балансувати дослідження та експлуатацію. Він застосовується для багатоцільового планування шляху. Однак, може мати слабку здатність до експлуатації та низьку точність рішення в деяких випадках, хоча модифікації, такі як FOABC, спрямовані на їх подолання.

Алгоритм сірих вовків (GWO) – це алгоритм ройового інтелекту, що імітує механізм полювання сірих вовків [14]. Він поділяє вовків на ієрархію: альфа (лідер), бета (помічник), дельта (розвідник) та омега (решта зграї). Полювання включає три етапи: оточення, переслідування та напад, де позиції вовків оновлюються на основі позицій альфа, бета та дельта вовків.

У плануванні шляху, «вовки» шукають оптимальну траєкторію. Перешкоди можуть бути розширені для забезпечення безпечної відстані. Покращені версії GWO, такі як Golden Sine Grey Wolf Optimizer (GSGWO), вирішують проблеми повільної збіжності та потрапляння в локальні оптимуми. GSGWO може адаптуватися до функції перетину перешкод, дозволяючи роботу робити вибір між перетином перешкоди (з певною вартістю) та її уникненням. Перевагами GWO є сильна продуктивність збіжності та відносно проста структура алгоритму. Він здатний оптимізувати довжину шляху, кількість точок повороту та плавність. Проте, схильний до потрапляння в локальні оптимуми, має повільну збіжність на пізніх етапах та проблему з єдиною початковою популяцією в оригінальному GWO.

Алгоритм кажана (BA) – це біонатхненний алгоритм, заснований на ехолокаційних (біо-сонарних) здібностях кажанів. Кажани випромінюють звукові імпульси та слухають ехо, що повертається від перешкод або здобичі, використовуючи цю інформацію для навігації [15]. У алгоритмі «штучні кажани» (потенційні позиції робота) переміщуються в просторі пошуку, оновлюючи свою частоту, швидкість та позицію на основі глобального найкращого рішення.

У плануванні шляху, алгоритм кажана шукає найкоротший шлях, уникаючи динамічних перешкод. Модифіковані версії, такі як Modified Frequency Bat (MFB) algorithm, балансують дослідження та експлуатацію. Обробка перешкод відбувається за допомогою віртуальних сенсорів, які виявляють перешкоди, та процедури уникнення перешкод, яка використовує концепцію «вектора проміжку» (gap vector) для вибору вільного шляху. Алгоритм може оцінювати траєкторію рухомих перешкод для їх уникнення. Перевагами є ефективність

для пошуку найкоротшого шляху в динамічних середовищах з рухомими перешкодами та здатність адаптуватися до змін у середовищі. Проте, оригінальний ВА може застрягти в локальних оптимумах.

Алгоритм зозулі (CS) – це метаевристичний алгоритм, натхненний стратегією гніздового паразитизму зозуль [16]. Кожна «зозуля» (потенційне рішення) відкладає яйце (пропонує рішення) у випадково вибране гніздо господаря. Рішення покращуються за допомогою механізму Levy flight для глобального пошуку та випадкового блукання для локального дослідження.

У плануванні шляху, початкова популяція позицій генерується випадковим чином. Функція оцінки (фітнесу) враховує довжину шляху та його плавність. Перешкоди моделюються у сітковому середовищі як непрохідні області. Хоча прямих механізмів активного уникнення перешкод у базовому CS не описано, функція фітнесу неявно відштовхує алгоритм від перешкод, штрафуючи шляхи, які їх перетинають. Перевагами є проста структура, мінімальна кількість параметрів, легкість реалізації та надійність. Він ефективний для складних оптимізаційних задач. Проте, має недостатнє покриття простору пошуку, передчасну збіжність, низьку точність пошуку та повільну швидкість пошуку в традиційному CS.

Ймовірнісні алгоритми. Ймовірнісні алгоритми, зокрема методи на основі вибірки, ефективні для планування шляху у високимірних просторах конфігурацій, де побудова явного графа є непрактичною.

PRM (Probabilistic Roadmap) – це метод, що описує зв'язність вільного простору для переміщення за допомогою графів [1]. Він працює шляхом випадкової вибірки точок у просторі конфігурацій робота та з'єднання їх ребрами, якщо пряма лінія між ними вільна від перешкод. Таким чином, будується «дорожня карта» (граф) доступних шляхів.

Перешкоди враховуються на етапі побудови дорожньої карти, коли ребра додаються до графа лише в тому випадку, якщо вони не перетинаються з перешкодами. Це забезпечує, що всі шляхи, знайдені на дорожній карті, є безперешкодними. Метод покладається на повноту інформації про навколишнє середовище, що створює труднощі при його застосуванні в умовах динамічного середовища. Перевагами PRM є ефективність для планування шляху у високимірних просторах, де явне представлення перешкод є складним, та здатність знаходити шлях у складних середовищах. Проте, він може бути неефективним у динамічних середовищах, оскільки дорожня карта повинна бути перебудована при зміні перешкод, і не гарантує оптимальності шляху.

RRT* (Optimal RRT) є покращеною версією алгоритму RRT, яка, на відміну від базового RRT, гарантує оптимальність шляху при достатній кількості зразків [17, 18]. RRT* працює за принципом RRT, розширюючи дерево від початкової точки шляхом випадкової вибірки точок. Однак, RRT* додає два ключові кроки: перепідключення (rewiring) та вибір найкращого батька (best parent selection). При додаванні нового вузла, RRT* перевіряє, чи можна досягти сусідніх вузлів через новий вузол з меншою вартістю, і якщо так, перепідключає їх.

Як і RRT, RRT* виконує перевірку на зіткнення для кожного нового вузла та

ребра, забезпечуючи, що побудований шлях є вільним від перешкод. Перепідключення також враховує перешкоди, забезпечуючи, що нові, оптимізовані зв'язки також є безперешкодними. Перевагами є гарантована оптимальність шляху при достатній кількості зразків, а також зменшення довжини шляху та покращення плавності порівняно з RRT. Проте, RRT* має вищі обчислювальні витрати порівняно з базовим RRT через додаткові кроки оптимізації і може бути неефективним у дуже складних середовищах, де випадкова вибірка може сповільнювати збіжність.

Сила RRT полягає в його «швидкому дослідженні» та здатності швидко знаходити будь-який здійснений шлях у високовимірних просторах, де інші методи зазнають невдачі. Це вирішує проблему «повноти» (знаходження шляху). Після того, як шлях знайдено, наступним логічним кроком є його оптимізація. RRT* додає крок «перепідключення», який ітеративно покращує оптимальність шляху. Це передбачає двоетапний підхід до вирішення проблеми: спочатку знайти рішення (здійсненність), потім його оптимізувати.

Гібридні алгоритми. Гібридні алгоритми поєднують сильні сторони декількох підходів для подолання їх індивідуальних обмежень, створюючи більш надійні та ефективні рішення.

A* + потенційні поля. Цей гібридний підхід поєднує глобальні пошукові можливості алгоритму A* з реактивними можливостями уникнення перешкод, які надають потенційні поля [2, 19, 20]. A* використовується для глобального планування шляху, забезпечуючи оптимальний або майже оптимальний маршрут від початку до кінця. Потенційні поля, зі своїми силами притягання до цілі та відштовхування від перешкод, застосовуються для локального уникнення перешкод у реальному часі та згладжування траєкторії.

Гібридні алгоритми, такі як MAAPF (Modified A* and Artificial Potential Field), можуть ефективно працювати в динамічних середовищах. A* планує глобальний шлях, а коли робот виявляє динамічні перешкоди, система переходить до локального планування, використовуючи потенційні поля та прогнозування траєкторії перешкод. Це дозволяє роботу адаптуватися до непередбачених змін у середовищі та уникати зіткнень у реальному часі. Перевагами є подолання обмежень окремих алгоритмів: A* допомагає уникнути локальних мінімумів потенційних полів, а потенційні поля забезпечують плавність та реактивність, яких бракує традиційному A*. Це генерує безпечніші, плавніші та більш реалістичні шляхи. Проте, недоліками є складність інтеграції та налаштування, оскільки необхідно правильно збалансувати вплив глобального планувальника та локального контролера. Гібридний A* може мати довший час виконання у порівнянні з базовим A*.

Поширеність гібридних алгоритмів, особливо тих, що поєднують глобальний пошук (як A*) з локальними реактивними методами (як потенційні поля або DWA), свідчить про перехід до ієрархічних та надійних архітектур планування шляху, які враховують як довгострокову оптимальність, так і адаптивність у реальному часі.

Потенційні поля або підхід динамічного вікна (DWA) відмінно підходять для локального, реактивного уникнення в реальному часі та згладжування шляху, але страждають від локальних мінімумів та відсутності глобальної обізнаності.

Їхнє поєднання створює ієрархічну систему, де A^* надає «макро» план, а реактивний метод обробляє «мікро» коригування та уникнення перешкод. Ця архітектурна тенденція є вирішальною для автономних систем, що працюють у складних, непередбачуваних реальних середовищах (наприклад, безпілотні автомобілі, сільськогосподарські роботи, сервісні роботи). Вона свідчить про те, що майбутні рішення для планування шляху все частіше включатимуть складні багатозарові системи, які інтегрують різноманітні алгоритмічні парадигми.

ВИСНОВКИ

Кожен із розглянутих алгоритмів має окремі властивості, які важливі для різних класів задач планування.

A^* і алгоритм Дейкстри представляють класичні підходи на графах. A^* має здатність працювати з евристичними функціями, що дає змогу зменшити обчислювальні витрати, зберігаючи оптимальність. Алгоритм Дейкстри – це еталонний метод для гарантії точності в умовах фіксованих ваг. Обидва алгоритми є добре формалізованими, що полегшує їх програмну реалізацію в системах зі статичним середовищем.

D^* Lite і Θ^* демонструють евристичний підхід до задач у динамічних середовищах. D^* Lite дозволяє адаптувати маршрут у реальному часі без повного перерахунку, що є ключовим для роботів, які взаємодіють із рухомими об'єктами. Θ^* формує більш гладкі траєкторії, що важливо для фізично реалізованих роботів. Обидва методи придатні до інтеграції в робототехнічні системи, де потрібна швидка реакція на зміну оточення.

Генетичний алгоритм і RRT репрезентують метаевристичні стратегії, де ціль – обхід складних або великорозмірних просторових конфігурацій. ГА дозволяє досліджувати простори з багатьма локальними мінімумами, а RRT забезпечує швидке охоплення великих областей. Їхня гнучка структура робить їх придатними до модифікацій для конкретних задач і середовищ.

ACO і GWO як біонатхненні методи показують ефективність у задачах з множинними маршрутами та змінними умовами. ACO моделює розподілену оптимізацію через феромони, а GWO – ієрархічну стратегію пошуку, яка спрощує реалізацію. Обидва алгоритми добре масштабуються і можуть адаптуватися до змін топології середовища.

PRM і RRT^* – ймовірнісні алгоритми, що дозволяють працювати у високовимірних просторах. PRM будує граф можливих шляхів, ефективний для багаторазового використання в одному середовищі. RRT^* покращує шлях з часом, що цінно при обмеженнях на ресурси. Ці алгоритми легко комбінуються з іншими для досягнення балансу між швидкістю і якістю.

Гібридний алгоритм, який поєднує A^* з методом потенційних полів, забезпечує як глобальне планування, так і локальне уникнення перешкод. Така комбінація дозволяє створювати адаптивні маршрути з урахуванням нових перешкод у режимі реального часу.

ЛІТЕРАТУРА

[1] Obstacle Avoidance and Path Planning Methods for Autonomous Navigation of

- Mobile Robot. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11175283/> (дата звернення: 15.07.2025).
- [2] Path planning diagram. URL: https://www.researchgate.net/figure/Path-planning-diagram_fig1_366333455 (дата звернення: 15.07.2025).
- [3] How can i use particle swarm optimisation algorithm for to find optimal path interms of shortest distance between start and goal point to be followed by mobile robot? URL: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/answers/263094-how-can-i-use-particle-swarm-optimisation-algorithm-for-to-find-optimal-path-interms-of-shortest-dis> (дата звернення: 15.07.2025).
- [4] Obstacle-Free Path Planning for Autonomous Drones Using Floyd's Algorithm. URL: <https://www.arxiv.org/pdf/2409.13149v1> (дата звернення: 15.07.2025).
- [5] Theta* algorithm path planning schematic. URL: <https://surl.lu/nayurk> (дата звернення: 15.07.2025).
- [6] Modified A* algorithm for path smoothing and obstacle avoidance. URL: <https://www.ewadirect.com/proceedings/ace/article/view/9971/pdf> (дата звернення: 15.07.2025).
- [7] Genetic Algorithm-based Robot Path Planning. URL: <https://repo.pens.ac.id/188/1/c3d14cd2e419cde877993555eeef.pdf> (дата звернення: 15.07.2025).
- [8] The Path Planning of Mobile Robots Based on an Improved Genetic Algorithm. URL: <https://surl.lu/mxhour> (дата звернення: 15.07.2025).
- [9] HPS-RRT*: An Improved Path Planning Algorithm for a Nonholonomic Orchard Robot in Unstructured Environments. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4395/15/3/712> (дата звернення: 15.07.2025).
- [10] Path-Planning Strategy: Adaptive Ant Colony Optimization Combined with an Enhanced Dynamic Window Approach. URL: <https://www.mdpi.com/2079-9292/13/5/825> (дата звернення: 15.07.2025).
- [11] Optimizing Robot Path Planning with the Particle Swarm Optimization Algorithm. URL: <https://surl.li/ohjkdm> (дата звернення: 15.07.2025).
- [12] Artificial bee colony algorithm. URL: <https://surli.cc/bnzjrg> (дата звернення: 15.07.2025).
- [13] Multi-objective path planning for mobile robot with an improved artificial bee colony algorithm. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36899544/> (дата звернення: 15.07.2025).
- [14] Path Planning and Obstacle Avoidance of a Mobile Robot based on GWO Algorithm. URL: <https://surl.li/zmmmpg> (дата звернення: 15.07.2025).
- [15] Robot Motion Control using Dual Avoidance Scheme. URL: <https://www.espublisher.com/journals/articlehtml/engineered-science/10.30919-es1261> (дата звернення: 15.07.2025).
- [16] Cuckoo Search Algorithm using Lévy Flight: A Review. URL: https://www.researchgate.net/publication/269651786_Cuckoo_Search_Algorithm_using_Lévy_Flight_A_Review (дата звернення: 15.07.2025).
- [17] Wang, H.; Wang, S.; Yu, T. Path Planning of Inspection Robot Based on Improved Ant Colony Algorithm. Appl. Sci. 2024, 14, 9511. URL: <https://doi.org/10.3390/app14209511> (дата звернення: 15.07.2025).

- [18] Hybrid potential field based control of differential drive mobile robots. URL: <https://chaoslab.unm.edu/MaterialDownload/Hybrid%20potential%20Field%20based%20control%20of%20differential%20drive%20mobile%20robots.pdf> (дата звернення: 15.07.2025).
- [19] Optimal Path Planning using RRT for Dynamic Obstacles. URL: [https://nopr.niscpr.res.in/bitstream/123456789/54909/1/JSIR%2079\(6\)%20513-516.pdf](https://nopr.niscpr.res.in/bitstream/123456789/54909/1/JSIR%2079(6)%20513-516.pdf) (дата звернення: 15.07.2025).
- [20] Path Tracking Hybrid A* For Autonomous Agricultural Vehicles. URL: <https://arxiv.org/html/2411.14086v1> (дата звернення: 15.07.2025).
- [21] Byari M., Bernoussi A., Jellouli O., Ouardouz M., Amharref M. Multi-scale 3D cellular automata modeling: Application to wildland fire spread. *Chaos Solitons Fractals*, 2022, V. 164, pp. 112-153.
- [22] A Mathematical Model for Predicting Fire Spread in Wildland Fuels by Richard C. Rothermel. URL: https://www.fs.usda.gov/rm/pubs_int/int_rp115.pdf (дата звернення: 15.07.2025).

CLASSIFICATION OF ALGORITHMS FOR CONSTRUCTING A PATH WORKING WITH OBSTACLES

Svyryd, Yu. Undergraduate
Gumenuk, L PhD, Associate Professor
Humenuk, P. PhD, Associate Professor
Lutsk National Technical University / Ukraine

Abstract. The paper provides an overview and classification of eleven algorithms for constructing a robot path with obstacles, divided into six categories: classical graph-based approaches (A*, Dijkstra), heuristic approaches for dynamic environments (D* Lite, Theta*), metaheuristic strategies (genetic algorithm, RRT), bio-inspired methods (ACO, GWO), probabilistic algorithms (PRM, RRT*), and hybrid algorithms (A* with potential fields). It has been determined that each of the algorithms considered has distinct properties that are important for different classes of planning problems. The main characteristics and advantages of each type of algorithm are described, which is important for their software implementation and comparative analysis of effectiveness.

Keywords: algorithm, robot path, obstacle avoidance, simulation, data analysis.

Дата першого надходження статті до видання	Дата прийняття статті до друку статті після рецензування	Дата оприлюднення
16.09.2025 р.	16.10.2025 р.	23.12.2025 р.

DOI: <https://doi.org/10.36910/4293-52779-2025-17-02-03>
УДК 004.8 : 681.5.09

Пальчевський Б. О.
д-р. техн. наук, професор
ORCID: 0000-0002-4000-4992
Герасимчук Д. Ю.
магістрант

Луцький національний
технічний університет / Україна

АВТОМАТИЧНА ДІАГНОСТИКА СТАНУ СВЕРДЛА ЗА ДЕКІЛЬКОМА ДІАГНОСТИЧНИМИ ОЗНАКАМИ

Анотація: ключовою проблемою в машинобудуванні є прогнозування зносу інструменту в режимі реального часу. Традиційні методи покладаються на консервативну заміну інструменту, що призводить до передчасної заміни або надмірного зносу інструменту, а також до підвищених простоїв виробництва. Ручна оцінка стану свердла займає багато часу. Для зменшення простою необхідно процес діагностування стану свердла в виробничих умовах проводити автоматично, з високою точністю. Системи автоматичного моніторингу стану інструменту продемонстрували великий потенціал для виявлення та прогнозування зносу інструменту зниження ризику поломки інструменту та оптимізація інтервалів зміни інструменту, однак точність прогнозу не є завжди достатньою. У цьому дослідженні представлена автоматична система для прогнозування терміну служби інструменту в режимі реального часу, яка допомагає вирішити це обмеження шляхом інтеграції кількох контрольних модулів. Система прогнозування включає встановлені на верстаті модулі прямого контролю сигналів сили подачі і споживаної потужності різання, модуль інтеграції сигналів шляхом їх підключення для управління даними в режимі реального часу та модуль обробки даних для прогнозування зносу інструменту. В останньому модулі на основі цих сигналів генерується інтегральний показник зносу свердла, ступінь наближення якого до допустимого значення зносу визначає стан свердла як «придатний до роботи» або «непридатний до роботи». Очевидно, що тут пропонується підхід агрегування моделей у машинному навчанні, коли кілька моделей об'єднуються для отримання кращих результатів, ніж дає будь-яка окрема модель з метою підвищити точність, стабільність і узагальнюючу здатність системи діагностування. В роботі використана агрегована модель прогнозування, заснована на використанні сигналу осьової сили різання та сигналу споживаної шпинделем потужності для контролю зносу інструменту.

Ключові слова: спіральне свердло, моніторинг стану інструменту, знос свердла, датчик потужності, датчик осьової сили свердління.

ВСТУП, ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Механічна обробка свердлінням широко використовується в сучасному

промислового виробництва. Продуктивність процесу обробки тісно зв'язана зі станом інструменту [1] через його постійне зношування. Через механічний, термічний та хімічний вплив заготовки свердло постійно затуплюється під час обробки матеріалу. Знос свердла – це поступовий процес, який відбувається на задній поверхні свердла через тісний контакт та підвищені температури в місці контакту інструменту з заготовкою. Знос визначає ефективний термін служби інструменту і, як наслідок, витрати на виробництво. Дослідження показують, що ріжучі інструменти в промисловості часто використовуються лише для 50-80 % від їх ефективного терміну служби [2, 3]. Однак навіть за постійних умов різання руйнування свердла є стохастичним процесом.

Однак, під час обробки лезо інструмента зношується, а збільшення поверхні взаємного контакту погіршує умови різання, призводить до зростання споживаної потужності і осьової сили різання. Втрата ріжучих властивостей відбувається через зміни геометрії леза, що спричинено механічними, термічними, електричними та хімічними факторами. Основні проблеми при роботі свердла, які потрібно діагностувати:

1. Затуплення різальних кромки, що зменшує ефективність різання і підвищує силу опору.
2. Перегрів свердла і його вібрація, викликані підвищеним тертям через знос.
3. Тріщини або поломка свердла, що може призвести до аварії.

Інтерес до автоматичної діагностики і моніторингу ріжучих інструментів неухильно зростає завдяки поширенню гнучкої автоматизації виробництва [4, 5]. Галузь діагностики несправностей, широко відома як технічне обслуговування на основі стану, охоплює ряд принципів технічного обслуговування, які використовують різні методи для оцінки поточного стану обладнання та розробки графіків технічного обслуговування. Ця процедура включає регулярну або постійну перевірку стану обладнання. Дослідниками було визначено основні параметри, які характеризують стан свердла при роботі і можуть бути використані для його контролю, а саме: вібрація, температура, акустична емісія, сила різання та потужність споживання шпинделю. Однак, на сигнали моніторингу стану свердла впливають шум та інші специфічні властивості виробничого середовища. Це вимагає вдосконалення існуючих рішень при створенні систем автоматичного діагностування стану свердла з точки зору підвищення точності контролю діагностичних параметрів.

При створенні системи автоматичного діагностування стану свердла необхідно вибрати датчики для збору різних сигналів. Після збору сигналів моніторингу свердла використовується методологія вилучення ознак для вибору стану свердла, а саме:

- свердло, яке ще перебуває у хорошому стані та може бути далі використані у виробничому процесі,
- свердло, класифіковане як непридатне до використання, яке слід негайно замінити.

Найпростішим методом діагностики в усіх системах моніторингу є використання заздалегідь визначених меж, тобто якщо певний параметр в

аналізі досягає певної верхньої або нижньої межі, це свідчить про несправність інструменту або зношений інструмент. Ці типи фіксованих меж часто використовуються оператором-людиною, а також вони використовуються в системах моніторингу та формують основу експертних систем на основі правил. Хоча ручна оцінка стану свердла можлива, вона займає багато часу та перериває виробництво, що може призвести до простою. Щоби уникнути цих простоїв необхідно автоматизувати процес діагностування стану свердла при його експлуатації.

Основні мета такої системи:

- моніторинг зносу, тобто визначення ступеня зносу ріжучої кромки свердла в реальному часі для оптимізації процесу механічної обробки;
- прогнозування поломки, тобто попередження про можливу поломку інструменту, щоб уникнути простоїв обладнання та пошкодження заготовок;

Узагальнюючи визначимо систему автоматичної діагностики різального інструменту як поєднання технічних засобів, методів і програмного забезпечення для оцінки стану інструменту під час його експлуатації, виявлення зносу, пошкоджень або інших відхилень, що можуть вплинути на якість обробки та продуктивність обладнання, а також можливість прогнозування залишкового ресурсу свердла. Система автоматичної діагностики свердла – це приклад конкретного застосування. Переваги такої системи:

- зменшення простоїв свердлильного верстату через своєчасне виявлення проблем зносу свердла;
- підвищення якості отворів (точність розмірів і чистота поверхні);
- економія ресурсів завдяки уникненню поломок і непланових простоїв верстату.

У цій роботі представлено цілісний підхід до діагностування та моніторингу стану свердла, що керується даними. Для підвищення точності системи діагностування в роботі використана агрегована модель моніторингу, заснована на об'єднанні сигналу осьової сили різання та сигналу споживаної шпинделем потужності для контролю зносу інструменту та генерації ознак для остаточної класифікації стану свердла.

СУЧАСНИЙ СТАН ДІАГНОСТУВАННЯ СТАНУ СВЕРДЛА

Метою цього дослідження є розробка та оцінка агрегованої моделі зносу свердла в процесі свердління, яка забезпечує точність моніторингу стану свердла достатню, щоб виявити кінець терміну служби інструменту до того, як його поломка стане ймовірною.

На жаль, у традиційних методах визначення зносу інструменту є недоліки, бо ці методи або вимагають зняття інструменту з обладнання, або використання складних та дорогих методів моніторингу зносу інструменту, або неточно відображають знос інструменту.

Підходи до моніторингу процесів, що керуються даними, були розглянуті в численних дослідженнях. В процесі моніторингу сигнали від різних датчиків служать вхідними даними для аналізу. При свердлінні, найчастіше використовують сигнали споживаної потужності шпинделю, осьової сили

різання, крутного моменту, температури, акустичної емісії або вібрації при обробці тощо [6]. Типові джерела даних, які застосовуються в таких системах, є:

- вібраційний аналіз (використання акселерометрів для вимірювання вібрацій, які змінюються залежно від стану свердла);
- акустична емісія (моніторинг звукових хвиль, що виникають під час різання, для виявлення мікротріщин або зносу);
- силові датчики (вимірювання зусиль різання, які зростають зі зносом інструменту);
- температурний контроль (використання термодатчиків для оцінки нагріву свердла).

Серед цих джерел даних струм від споживаної потужності шпинделя та осьова сила різання при свердлінні зокрема мають хороший потенціал для широкого промислового застосування завдяки їх невисокій вартості і простоті монтажу. У найсучасніших системах керування, ці вимірювання можна отримати безпосередньо на верстаті без необхідності додаткової модернізації дорогих датчиків [7]. Відомі чисельні приклади вимірювання зміни осьової сили в залежності від зносу свердла [8, 9]. Одним із найпоширеніших методів контролю зносу інструменту є контроль споживаної верстатом електроенергії, тобто потужності різання на шпинделі [10]. Потужність на шпинделі можна виміряти за допомогою відносно недорогого датчика. Потужність шпинделя корелює із силами, що діють на інструмент (точніше, тангенціальною складовою), оскільки, коли інструмент зношується, сили зростають. Згідно з патентом США, чиста потужність отримується шляхом віднімання потужності холостого ходу, споживаної шпинделем, що обертає інструмент без контакту з деталлю, із загальної потужності, споживаної під час роботи інструменту.

Найбільш поширеним є спосіб визначення стану різального інструменту, що базується на різанні як гострим, так і тупим інструментом, щоб визначити межі зміни потужності шпинделя [11]. Одна з головних проблем із моніторингом споживання електроенергії двигуном полягає в тому, що в верстаті іноді виникають скачки навіть за нормальних умов. Скачки потужності можуть помилково вказувати на те, що інструмент зношений. Однак, якщо поріг збільшити, щоб запобігти помилковим сигналам, зношений інструмент може залишитися непоміченим. Окрім того, застосування моніторингу стану інструменту на основі процесу навчання не вирішує проблему повністю, оскільки є корисним тільки для умов обробки, якщо процес не змінюється, наприклад, та сама деталь виготовляється тим самим інструментом постійно.

МЕТОДИКА ДІАГНОСТУВАННЯ СТАНУ СВЕРДЛА

Автоматична діагностика скорочує час простоїв свердлильного обладнання і подовжує корисний час використання свердла. На відміну від однієї лише потужності шпинделя, на сигнал якої впливають багато виробничих факторів, особливо змінні умови різання, усереднений показник зносу свердла менше залежить від змінних умов різання і, таким чином, забезпечує більш точне вимірювання зносу інструменту.

Блок-схема пристрою показана на рисунку 1, його загальний вигляд подано

на рисунку 2, а схема підключення елементів системи діагностування – на рисунку 3.

Пристрій для автоматичного діагностування стану свердла складається з наступних компонент (рис. 1).

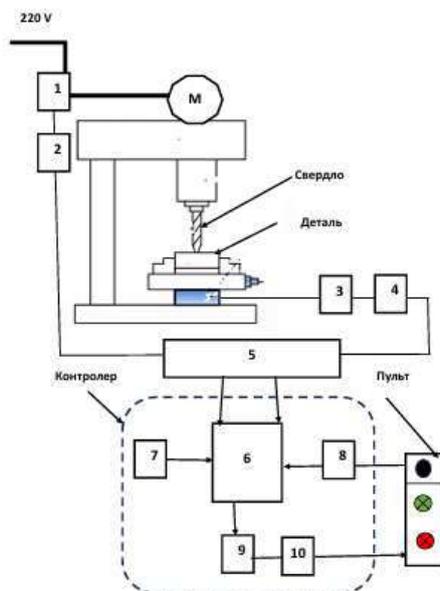


Рисунок 1 – Пристрій для діагностування стану свердла

1 – датчик струму шпинделя; 2 – підсилювач; 3 – датчик вимірювання осьової сили різання; 4 – підсилювач; 5 – АЦП; 6 – блок оцінки розміру зносу; 7 – база даних поправочних коефіцієнтів; 8 – блок значень діагностичних сигналів нового свердла; 9 – блок прогнозування зносу свердла; 10 – блок формування сигналів стану свердла



Рисунок 2 - Пристрій для діагностування

Вимірювання сигналу осьової сили різання здійснюється датчиком 3, сигнал від якого через підсилювач 4 надходить на вхід аналого-цифрового

перетворювача (АЦП) 5. Інший діагностичний сигнал потужності різання отримують вимірюванням від датчика струму 1, через підсилювач 2, який також надходить на вхід АЦП. Подальша обробка та аналіз вимірних параметрів проводиться за допомогою контролера ESP32 або іншої мікроЕОМ, до складу якої входять: блок оцінки розміру зносу 6, де, на підставі даних про значенні потужності різання і осьової сили, розраховується значення усередненого зносу. Значення зносу визначається шляхом порівняння вимірних сигналів обох діагностичних параметрів з їх значеннями для нового свердла, заданими в блоці 8 при встановленні нового інструменту. В блоці 7 розміщені значення поправочних коефіцієнтів, отримані при навчанні САК. В блоці 9 відбувається моделювання процесу обробки, за допомогою якого обчислюється залишкова стійкість інструменту, а також проводиться прогнозування зносу інструменту, на підставі цих даних в блоці 10 формуються керуючі сигнали, що візуалізуються на пульті або моніторі. Випробування розробленої системи діагностування стану свердла в процесі свердління здійснювалось на свердлильному верстаті, оснащеному системою діагностування на базі контролера (рис. 3). В рамках проекту було спроектовано недорогий пристрій для безперервного контролю стану свердла. Прототип пристрою, призначений для встановлення безпосередньо на корпус свердлильного верстату, був створений з використанням платформи ESP32 SoC (Espressif Systems, Шанхай, Китай) [13] і динамометр для вимірювання осьової сили на основі тензодатчиків [14], поряд з простим користувальницьким інтерфейсом, що складається з двох світлодіодних індикаторів і кнопки. Модуль на основі ESP зв'язується з динамометром для вимірювання осьової сили через шину I2C. Живлення пристрою здійснюється від силової установки.

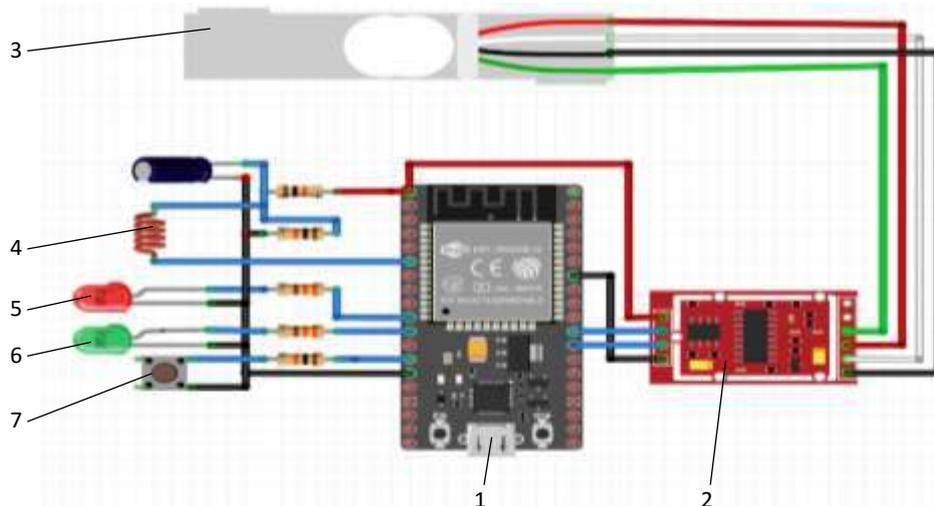


Рисунок 3 – Схема підключення елементів системи діагностування до контролера: 1 – плата TSP32; 2 – плата підсилення HX711; 3 – тензорезистивний датчик Zemic L6D; 4 – датчик змінного струму SCT013; 5, 6 – LED-діоди; 7-тактова кнопка скидання

Процес автоматичного діагностування включає наступні етапи:

1. Вимірювання діагностичних параметрів стану свердла у реальному часі. Під час свердління датчики безперервно фіксують діагностичні параметри (F_z – осьова сила, P – споживана потужність) в зоні обробки. Ці дані передаються до блоку збору даних і до їх обробки.

2. Порівняння з еталонними значеннями. Система має набір попередньо визначених порогових значень, які відповідають нормальному стану свердла (наприклад, для нового свердла крутний момент може бути 10 Н·м, а при зносі зростати до 15 Н·м – це сигналізує про проблему).

3. Аналіз відхилень. Якщо вимірні значення перевищують поріг (наприклад, на 20-30% від базового), система визначає, що свердло зношене або пошкоджене. Можливе використання алгоритму, який враховує не лише абсолютні значення, а й швидкість їх зміни (наприклад, різке зростання осьової сили).

4. Реакція системи. Автоматичне зупинення верстата або попередження оператора через звуковий чи візуальний сигнал.

Результати діагностики відображаються оператору через інтерфейс ((зелений – норма, червоний – критичний стан).

Збір і обробка даних здійснюється наступним чином. Сигнали від датчиків передаються до системи збору даних. Дані обробляються в реальному часі з використанням методів цифрової обробки сигналів, щоб виділити характерні ознаки стану інструменту. Стан інструменту визначається на основі інтегрального показника зносу, розрахованого за допомогою постійного моніторингу двох діагностичних характеристик (споживання електроенергії та значення осьової сила різання). Метод заснований на моделі процесу свердління, що ґрунтується на фізиці процесу різання, яка дозволяє калібрувати залежності кожного з обох діагностичних параметрів від величини зносу для різних умов різання. Потужність шпинделя і осьова сила свердління як діагностичні параметри моделі процесу утворюють інтегральний (узагальнений) діагностичний параметр і є легкодоступними для вимірювань. На відміну від однієї лише потужності шпинделя, на яку впливають багато факторів, особливо змінні умови різання, інтегральний параметр моделі зносу свердла менше залежить від змінних умов різання і, таким чином, забезпечує більш точне вимірювання зносу інструменту. Два параметри моделі процесу змінюються по-різному залежно від механізму зношування інструменту. Інтегральний показник зносу забезпечує більш точну діагностику зносу інструменту.

Спосіб діагностування стану свердла під час виконання свердління реалізують наступним чином. При роботі обладнання здійснюють постійний технічний моніторинг стану свердла, під час якого фіксують значення двох діагностичних параметрів – величину споживаної потужності і осьову силу свердління. Для визначення стану свердла в процесі його роботи необхідно використовувати залежності P і F_z від ступеню зносу свердла W , відомі з літературних джерел [12]. Відомі залежності зростання споживаної потужності свердління P і осьового зусилля при свердління F_z від ступеню зносу свердла мають вигляд:

$$P = P_0(1 + k_p W^n), \quad F_z = F_{z0}(1 + k_f W^m) \quad (1)$$

Де P_0 , F_{z0} – споживана потужність і осьова сила при свердління новим свердлом,

W – ступінь зносу свердла, наприклад, ширина зношеної фаски на задній поверхні свердла (мм),

k_p , n , k_f , m – емпіричні коефіцієнти, що залежать від матеріалу свердла і заготовки.

Для практичного визначення значень емпіричних коефіцієнтів k_p , n , k_f , m необхідно здійснити навчання системи діагностики із заданими матеріалами свердла і заготовки. Тоді їх значення можна вважати постійними для подальшої роботи свердла. Для практичного визначення значення цих коефіцієнтів проведемо лінеаризацію залежностей. Спочатку здійснимо перетворення залежності наступним чином:

$$\frac{P}{P_0} - 1 = k_p W^n, \quad \frac{F_z}{F_{z0}} - 1 = k_f W^m, \quad (2)$$

або

$$\frac{\Delta P}{P_0} = k_p W^n, \quad \frac{\Delta F_z}{F_{z0}} = k_f W^m, \quad (3)$$

де ΔP – різниця споживаної потужності свердління зношеним та новим свердлом,

ΔF_z – різниця осьової сили різання при свердлінні зношеним та новим свердлом.

Прологарифмуємо ці вирази, щоби отримати лінійну залежність, зручну для проведення навчання системи діагностики:

$$\ln \frac{\Delta P}{P_0} = \ln k_p + n \cdot \ln W, \quad \ln \frac{\Delta F_z}{F_{z0}} = \ln k_f + m \cdot \ln W. \quad (4)$$

Режим навчання системи діагностування. В режимі навчання здійснюється калібрування математичної моделі і визначення емпіричних коефіцієнтів моделі. Система працює в «режимі навчання», в якому експериментально визначають емпіричні коефіцієнти залежності кожного з діагностичних показників від величини зносу свердла для заданого матеріалу заготовки. Розрахунок емпіричних коефіцієнтів в цих залежностях для заданого матеріалу заготовки і свердла може бути здійснено шляхом визначення значень двох точок в отриманих логарифмуванням лінійних залежностей.

Для цього здійснюють вимірювання величини зносу свердла W на задній поверхні свердла (рис.4).

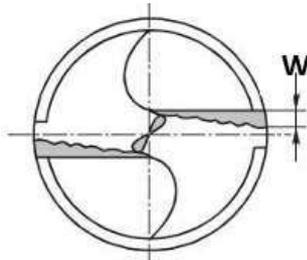


Рисунок 4 – Вимірювання зносу

Для нового свердла із значенням зносу 0 мм визначають величину споживаної потужності і осьової сили. Ці значення подають в блок збору даних 7 а з нього в блок обробки даних 8 (рис. 1). Наприклад, при здійсненні свердління новим спіральним свердлом діаметром 10 мм деталі із сталі 30 отримано датчиками 5, 6 системи діагностування значення $P_0 = 300$ Вт, $F_{z0} = 450$ Н. При першому досліді робота свердла проводилася до значення споживаної потужності $P_1 = 450$ Вт, причому осьове зусилля склало $F_{z1} = 600$ Н. Заміряна величину зносу свердла склала $W = 0,2$ мм. При другому досліді робота свердла проводилася до значення споживаної потужності $P_2 = 650$ Вт, причому осьове зусилля склало $F_{z2} = 800$ Н. Заміряна величину зносу свердла склала $W = 0,5$ мм. Для обох дослідів визначили значення споживаної потужності P_1 і P_2 та значення осьової сили F_{z1} і F_{z2} . Тоді отримаємо для кожного з параметрів системи із 2-х рівнянь.

Для визначення залежності приросту споживаної потужності від величини зносу свердла 0,2 мм і 0,5 мм отримаємо систему із 2-х рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} \ln \frac{450 - 300}{300} &= \ln k_p + n \cdot \ln 0,2 \\ \ln \frac{650 - 300}{300} &= \ln k_p + n \cdot \ln 0,5 \end{aligned} \right\}; \left. \begin{aligned} -0,693 &= \ln k_p + n(-1,609) \\ 0,154 &= \ln k_p + n(-0,693) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Розв'язання системи цих рівнянь дає значення: $n = 0,925$; $k_p = 2,52$. Тоді залежність приросту споживаної потужності від величину зносу свердла для заданого матеріалу набере вигляду:

$$\frac{\Delta P}{P_0} = 2,52 W^{0,925}. \quad (6)$$

Для визначення залежності приросту осьової сили від величини зносу свердла 0,2 мм і 0,5 мм також отримаємо систему із 2-х рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} \ln \frac{600 - 450}{450} &= \ln k_f + m \cdot \ln 0,2 \\ \ln \frac{800 - 450}{450} &= \ln k_f + m \cdot \ln 0,5 \end{aligned} \right\}; \left. \begin{aligned} -1,100 &= \ln k_f + m(-1,609) \\ -0,251 &= \ln k_f + m(-0,693) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Розв'язання системи цих рівнянь дає значення: $m = 0,927$; $k_F = 1,48$. Тоді залежність приросту осьової сили від величину зносу свердла для заданого матеріалу набере вигляду:

$$\frac{\Delta F}{F_{z0}} = 1,48W^{0,927}. \quad (8)$$

Після здійснення калібрування, яке дозволяє визначити значення параметрів k_P , k_F , n , m в процесі свердління певного матеріалу, при подальшій обробці деталей постійно контролюють значення споживаної потужності і осьової сили свердління, а по отриманих виразах в блоці обробки даних 8 розраховують величини зносу свердла по кожному з контрольованих параметрів (споживана потужність і осьова сила), тобто W_P , W_F , далі розраховують їх усереднене (інтегроване) значення і порівнюють його з значенням допустимого зносу. В залежності від степеню наближення до допустимого значення зносу система діагностування видає сигнал про продовження роботи (спрацьовує зелена лампочка 9 В на панелі, рис. 1) чи про заміну свердла (спрацьовує червона лампочка 9 В, рис. 1). При визначенні стану свердла також використовують додаткові показники, які проявляються при постійному моніторингу свердління, наприклад, для контролю процесу свердління критичнішим параметром є різке зростання осьової сили, що може призвести до руйнування свердла або втрати якості обробки.

Приклад визначення стану свердла. Нехай за результатом вимірювання діагностичних параметрів при свердлінні отримано значення споживаної потужності 670 Вт і значення осьової сили 840 Н. Враховуючи показники нового свердла ($P_0 = 300$ Вт, $F_{z0} = 450$ Н) визначимо значення зносу за вищенаведеними виразами.

Значення зносу свердла за показниками приросту споживаної потужності:

$$\frac{670 - 300}{300} = 1,233 = 2,52W^{0,925},$$

$$W^{0,925} = 0,49, \quad W = 0,49^{\frac{1}{0,925}} \approx 0,454.$$

Значення зносу свердла за показниками приросту осьової сили:

$$\frac{840 - 450}{450} = 0,867 = 1,48W^{0,927},$$

$$W^{0,927} = 0,586, \quad W = 0,586^{\frac{1}{0,927}} \approx 0,546.$$

Тоді у випадку рівномірного впливу обох діагностичних параметрів на результат визначення стану свердла при свердлінні матеріалу визначимо величину зносу так:

$$W = \frac{W_P + W_F}{2} = \frac{0,454 + 0,546}{2} = 0,5 \text{ (мм)}, \quad (9)$$

де W_P , W_F – знос свердла, визначений за значенням приросту споживаної потужності і приросту осьової сили відповідно.

РЕЗУЛЬТАТИ ПРАКТИЧНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ СТАНУ СВЕРДЛА І ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Для досліду використовувалось свердло діаметром 8 мм, яким проводилось свердління заготовки із сталі 30 товщиною 10 мм. Вимірювання зносу здійснювалось по задній поверхні свердла за схемою, наведеною на рисунку 4.

Спочатку визначалась потужність різання P_0 і осьова сила різання F_{z0} для нового свердла із зносом $W = 0$. Для проведених дослідів ці значення склали – $P_0 = 200$ Вт, $F_{z0} = 370$ Н. Далі проводилося навчання системи. Для цього визначалися значення ΔP і ΔF_z для вимірних зносів $W = 0,2$ мм і $W = 0,7$ мм. Далі за наведеною вище методикою визначались значення коефіцієнтів у виразі для залежності зносу від приросту потужності і приросту осьової сили при свердлінні заданого матеріалу – сталі 30. Вони склали відповідно:

$$n = 1,496; k_p = 0,307; m = 0,76; k_f = 0,09.$$

Подальші досліді проводилися для нового свердла із використанням визначених коефіцієнтів до повного зношення свердла. Результати наведені в таблиці і на графіках (рис. 5-7).

Таблиця 1 – Результати використання системи діагностування свердла (умови роботи: матеріал заготовки – сталь, діаметр свердла 8 мм, подача 0,024-0,032 мм/об, швидкість обертання 620 об/хв при отриманих коефіцієнтах $n = 1,496; k_p = 0,307; m = 0,76; k_f = 0,09$)

№ досліді	Приріст потужності ΔP , W	Приріст осьової сили ΔF_z , Н	Величина зносу по потужності W_P , мм	Величина зносу по осьовій силі W_F , мм	Усереднена величина зносу $W_c = 1/2(W_P + W_F)$
1	6,443	2,651	0,221	0,036	0,128
2	9,758	4,314	0,292	0,068	0,180
3	6,036	9,848	0,212	0,201	0,206
4	12,075	10,634	0,336	0,222	0,279
5	12,332	13,500	0,341	0,304	0,323
6	18,246	16,012	0,443	0,381	0,412
7	19,804	19,158	0,468	0,482	0,475
8	27,150	22,259	0,578	0,588	0,583
9	24,407	22,998	0,538	0,614	0,576
10	39,348	25,761	0,741	0,712	0,727
11	37,738	27,604	0,720	0,780	0,750
12	47,086	32,079	0,835	0,951	0,893
13	47,833	36,959	0,844	1,145	0,995
14	61,769	38,421	1,001	1,205	1,103
15	63,282	40,881	1,018	1,308	1,163

За даними таблиці 1 були побудовані залежності приросту потужності різання та приросту осьової сили різання від величини зносу (рис. 5 та 6 відповідно).

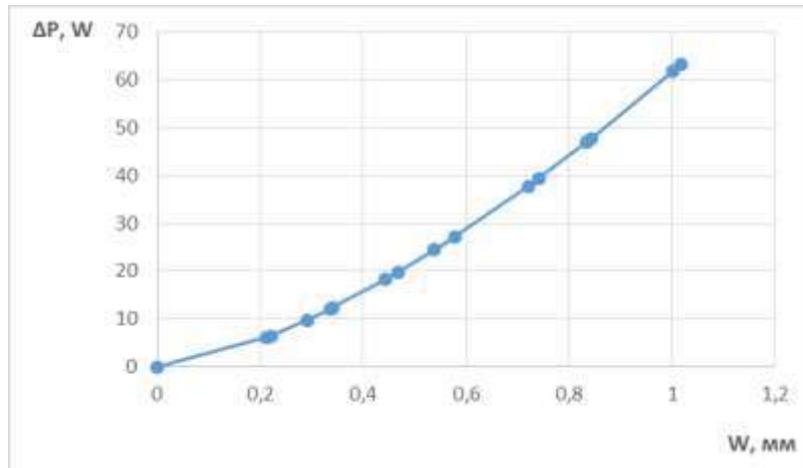


Рисунок 5 – Залежність зміни потужності різання при свердлінні від величини зносу свердла по задній поверхні

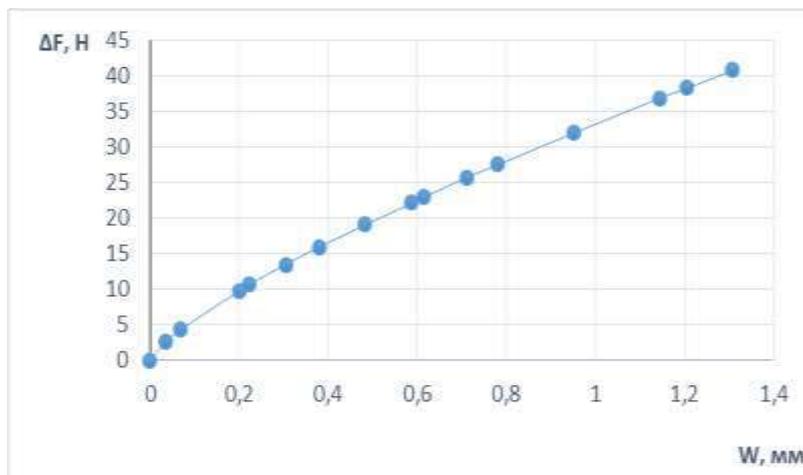


Рисунок 6 – Залежність зміни осьової сили різання при свердлінні від величини зносу свердла по задній поверхні

За результатом обробки даних було отримано залежність зміни значення усередненого зносу від часу роботи свердла. Результат дослідження показав, що стійкість свердла склала 17 хв.

Результати дослідження процесу зносу свердла, який вивчався при обробці заготовки із сталі 30 при свердлінні свердлом діаметром 8 мм, підтвердили близьку до лінійної залежність зносу свердла від часу його роботи. Інші результати дослідження процесу зносу показали придатність запропонованої моделі діагностування зносу свердла для прогнозування періоду стійкості свердла. Слід додати, що за даними таблиці, величина

усередненого зносу більш точно описує стан свердла, що підтверджує вищу точність запропонованої моделі.

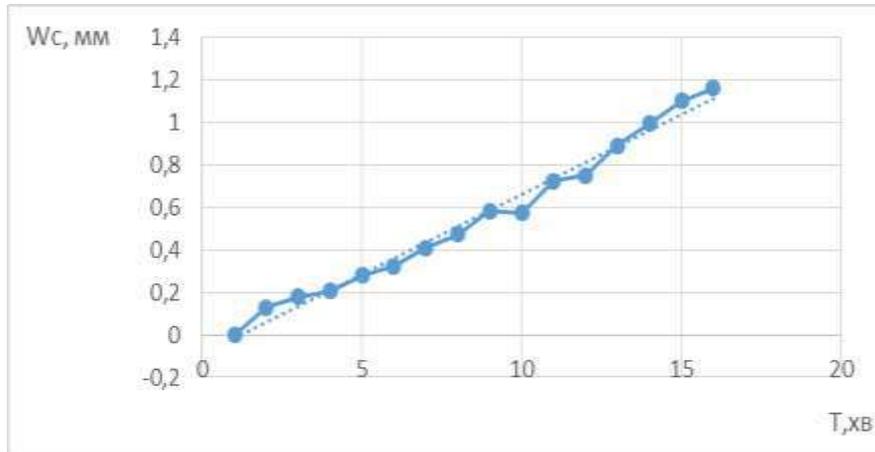


Рисунок 7 – Залежність зміни величини усередненого зносу свердла по задній поверхні від часу його роботи

ВИСНОВКИ

Мотивацією виконання цієї роботи є необхідність моніторингу в процесі обробки зносу інструменту, який під час свердління викликає збільшення сили осьової різання, а отже, і більше споживання енергії. Наша модель комплексного вимірювання потужності і осьової сили різання при свердлінні повністю враховує знос інструменту і, таким чином, є більш точною у прогнозуванні терміну заміни інструменту. Відзначимо такі особливості та основні результати проведеного дослідження:

У роботі використовується експериментальна програма з двома діагностичними параметрами, а саме споживана потужність різання та осьова сила.

В статті протестований пристрій, представлений вище, для ситуацій загального типу обробки свердлінням.

Метод використання діагностичних параметрів (осьова сила + потужність свердління) добре підходить для оцінки зносу свердла. Він простий у реалізації, оскільки можна використовувати лише два датчики (тензодатчик сили та струмовий датчик двигуна шпинделя).

Порогове значення зносу можна налаштовувати для конкретних умов свердління (матеріал заготовки, діаметр свердла тощо).

Особливий вплив на знос свердла мають режими різання, а його довговічність може мати істотно різні значення від одного режиму до іншого. Найкраща довговічність досягається при використанні нижчої швидкості різання і вищої швидкості подачі.

Щодо потенційних майбутніх досліджень з цього питання, з одного боку, ми плануємо розглянути більше діагностичних параметрів для аналізу стану свердла.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] K. Javed, R. Gouriveau, X. Li, N. Zerhouni, Tool wear monitoring and prognostics challenges: a comparison of connectionist methods toward an adaptive ensemble model, *J. of Intelligent Manufacturing* 29 (2018) 1873–1890. doi:10.1007/s10845-016-1221-2.
- [2] K. Salonitis, A. Kolios, Reliability assessment of cutting tool life based on surrogate approximation methods, *The Int. J. of Advanced Manufacturing Technology* 71 (2014) 1197–1208. doi:10.1007/s00170-013-5560-2.
- [3] J. Karandikar, T. McLeay, S. Turner, T. Schmitz, Tool wear monitoring using naive bayes classifiers, *The Int. J. of Advanced Manufacturing Technology* 77 (2015) 1613–1626. doi:10.1007/s00170-014-6560-6.
- [4] A. Gouarir, S. Kurokawa, T. Sajima, M. Murata, In-process tool wear detection of uncoated square end mill based on electrical contact resistance, *Int. J. of Automation Technology* 10 (5) (2016) 767–772. doi: 10.20965/ijat.2016.p0767.
- [5] T. Mohanraj, S. Shankar, R. Rajasekar, N. Sakthivel, A. Pramanik, Tool condition monitoring techniques in milling process: a review, *J. of Materials Research and Technology* 9 (1) (2020) 1032–1042. doi:10.1016/j.jmrt.2019.10.031.
- [6] R. Teti, D. Mourtzis, D. D'Addona, A. Caggiano, Process monitoring of machining, *CIRP Ann.* 71 (2) (2022) 529–552. doi:10.1016/j.cirp.2022.05.009.
- [7] R. Corne, C. Nath, M. El Mansori, T. Kurfess, Study of spindle power data with neural network for predicting real-time tool wear/breakage during inconel drilling, *J. of Manufacturing Systems* 43 (2017) 287–295. doi: 10.1016/j.jmsy.2017.01.004.
- [7] Abu-Mahfouz I, Banerjee A (2014) Drill wear feature identification under varying cutting conditions using vibration and cutting force signals and data mining techniques. *Proc Comput Sci* 36:556–563. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2014.09.054>
- [8] Yaldız, S. and Ünsaçar, F.: Design, development and testing of a turning dynamometer for cutting force measurement, *Mater. Design*, 27, 839–846, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2005.04.001>
- [9] Ciurezu Gherghe, L. M., Stanimir, A., and Geonea, I.: Experimental research regarding the influence of cutting regime on the wear of drills at steel processing, *Fiability & Durability Supplement No 1/2015*, Publishing House “Academica Brâncușii”, Târgu Jiu, Romania, 118–122, ISSN 1844-640X, available at: https://www.utgjiu.ro/rev_mec/mecanica/pdf/2015-01 .
- [10] Патент US 4207567, МПК G08B 21/00; опубл. 10.06.1980
- [11] Патент US 10,493,583 B2, МПК B23Q 15/16; G08B 24/10, опубл. 3.12.2019.
- [12] Wang Q., Zhang D., Tang K. et al. A mechanics based prediction model for tool wear and power consumption in drilling operations / *Journal of Cleaner Production*, 2019, (234), pp. 171–184, DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.06.148.
- [13] Espressif Systems. ESP32. Available online: <https://surl.li/smlcgc> (accessed on 10 December 2024).
- [14] Zemic L6D. Available online: <https://zemic.com.ua/tenzometrychnyi-datchyk-l6d/> (accessed on 10 December 2024).

AUTOMATIC DIAGNOSTICS OF DRILL CONDITION BY SEVERAL DIAGNOSTIC SIGNS

*Palchevskiy, B. DThSc., Prof., Honored Worker of Science and Technology of
Ukraine.*

Gerasymchuk, D. Master.

Lutsk National Technical University / Ukraine

Abstract. A key problem in mechanical engineering is the prediction of tool wear in real time. Traditional methods rely on conservative tool replacement, which leads to premature tool replacement or excessive tool wear, as well as increased production downtime. Manual assessment of drill condition is time-consuming. To reduce downtime, it is necessary to perform the process of diagnosing the drill condition in production conditions automatically, with high accuracy. Automatic tool condition monitoring systems have shown great potential for detecting and predicting tool wear, reducing the risk of tool breakage and optimizing tool change intervals, but the prediction accuracy is not always sufficient. This study presents an automatic system for predicting tool life in real time, which helps to solve this limitation by integrating several control modules. The prediction system includes machine-mounted modules for direct control of feed force and cutting power consumption signals, a signal integration module by connecting them for real-time data management, and a data processing module for predicting tool wear. In the last module, based on these signals, an integral indicator of drill wear is generated, the degree of approximation of which to the permissible wear value determines the condition of the drill as “fit for work” or “unfit for work”. Obviously, an approach of model aggregation in machine learning is proposed here, when several models are combined to obtain better results than any individual model gives in order to increase the accuracy, stability and generalization ability of the diagnostic system. The paper uses an aggregated forecasting model based on the use of the axial cutting force signal and the power consumed by the spindle signal to control tool wear.

Keywords: twist drill, tool condition monitoring, drill wear, power sensor, axial drilling force sensor.

Дата першого надходження
статті до видання

18.09.2025 р.

Дата прийняття статті до друку
статті після рецензування

30.09.2025 р.

Дата
оприлюднення

23.12.2025 р.

DOI: <https://doi.org/10.36910/4293-52779-2025-17-02-04>
УДК 621.798:681.5.015.23

¹ Пономаренко С. В.
Аспірант
ORCID: 0009-0003-3260-6541
² Сапон С. П.
канд., техн., наук, доцент
ORCID: 0000-0003-1082-6431

¹ Національний університет
«Чернігівська політехніка» /
Україна

² Національний технічний
університет України «Київський
політехнічний інститут імені
Ігоря Сікорського» / Україна

СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ДИНАМІЧНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ШПИНДЕЛЬНИХ ВУЗЛІВ. ОГЛЯД ПУБЛІКАЦІЙ

Анотація: у статті представлено огляд сучасних методів та систем активного управління вібраціями, що виникають у процесі механічної обробки, зокрема при фрезеруванні та точінні. Проведено огляд методів та засобів підвищення стабільності процесу різання за рахунок покращення динамічних характеристик ШВ та визначення оптимальних режимів обробки. Розглянуто два основні напрямки: коригування швидкості обертання шпинделя та оптимізація керуючої системи верстата. Детально проаналізовано застосування активних систем управління, що включають електромагнітні підшипники, п'єзоелектричні та інерційні віброприводи для покращення динамічних характеристик шпиндельного вузла та гасіння самозбуджених вібрацій. Наведено приклади експериментальних досліджень та математичних моделей, що підтверджують ефективність різних підходів у підвищенні стабільності процесу різання, покращенні якості обробленої поверхні та збільшенні продуктивності. Особливу увагу приділено порівняльному аналізу різних алгоритмів управління, таких як PID, Fuzzy PID, BPNN та BPNN PID, а також методів гасіння збурень та стабілізації процесу різання. Особливо розглянуто застосування активних магнітних опор з різними конфігураціями (радіальні, модифіковані радіальні та вбудовані циліндричні магнітні приводи) та адаптивних систем керування на їх основі. Проаналізовано використання п'єзоелектричних приводів для активного гасіння вібрацій та представлено результати моделювання та експериментальних досліджень. Також розглянуто ефективність застосування інерційних віброприводів з різними стратегіями управління для підвищення стабільності фрезерування. На основі проведеного огляду зроблено висновок про перспективність активних методів управління вібраціями для підвищення ефективності та якості механічної обробки. Підкреслено важливість подальших досліджень у напрямку практичної реалізації та вдосконалення існуючих систем управління, особливо для обробки нежорстких деталей зі складною геометрією поверхонь, де динамічна взаємодія інструменту та заготовки відіграє значну роль.

Ключові слова: самозбуджені вібрації, стабільність різання, активне управління вібраціями, шпindelний вузол, електромагнітний підшипник, п'єзоелектричний привід, інерційний вібропривід.

ВСТУП

В сучасних умовах виробництва вимоги до якості та точності виконавчих поверхонь деталей постійно зростають у відповідь на виникнення нових високоточних сфер машино- і приладобудування. В загальному балансі точності верстатів на шпindelний вузол (ШВ) припадає до 80% похибок. Точність обертання ШВ, тобто його динамічну точність, визначають динамічні характеристики ШВ, до яких належать: частоти власних коливань, динамічна жорсткість, форми коливань на власних частотах, коефіцієнти демпфування. Перелічені характеристики описують вібростійкість ШВ та траєкторії руху його виконавчих поверхонь.

Сталим трендом останніх років в машинобудівній галузі є впровадження засобів виробництва з інтелектуальними функціями. Інтелектуальний ШВ згідно з [1] здійснює наступні функції: збір даних, обробка отриманих сигналів, управління виконавчими механізмами та видача результатів. В даній статті розглянуті інтелектуальні системи управління динамічними характеристиками ШВ для підвищення показників точності і якості обробки. Під інтелектуальним управлінням мається на увазі активне керування динамічними характеристиками ШВ, але не за усталеним законом, а за закономірностями, що адаптуються до зміни стану ШВ в процесі самонавчання.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Значна кількість сучасних досліджень процесу різання спрямована на підвищення їх стабільності, що дозволяє покращити ефективність обробки. Ці дослідження потребують систематизації для виявлення особливостей інтелектуального управління та визначення найбільш перспективних напрямків для поглибленого вивчення.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

На даний момент існують публікації оглядового характеру, що стосуються інтелектуальних (цифрових) систем управління динамічними характеристиками ШВ [2], [3] [4], [5], [6]. У роботі [6] авторів Quintana та ін. систематизовано методи забезпечення стабільності процесу різання у 2 групи: вибір комбінацій параметрів різання в стабільній зоні діаграми сталості (SLD – Stability lobe diagram) та уникання вібрації шляхом зміни поведінки системи та розширення зон стабільності. Але всі приклади в даній роботі обмежені 2011 роком. Yue та ін. проаналізував [2] сучасні методи управління динамічними характеристикам ШВ фрезерних верстатів. Mupoа та ін. в своєму огляді [3] не обмежилися фрезеруванням, але більшість проаналізованих методів не можна віднести до категорії інтелектуальних. Liu та інші також проаналізували [4] методи управління динамічними характеристиками ШВ при фрезеруванні. Але були розглянуті лише математичні моделі та симулювання процесу різання. Натомість експериментальні методи, які враховують безпосередньо всі можливі фактори впливу на процес різання, розглянуті не були. У своєму огляді [5] Sun та ін. систематизував методи забезпечення стабільної обробки тонкостінних деталей та проаналізував в тому числі і інтелектуальні методи. Але весь огляд стосувався лише фрезерної обробки, в той час, як проблема обробки деталей з малою жорсткістю актуальна і для інших типів верстатів.

даній статті розглянуто три методи управління: оптимізація керуючої системи, варіювання швидкості обертання шпинделя, активні системи управління. Відповідно метою статті є аналізування виявлених та приведених в роботі досліджень з визначенням перспективних напрямів розвитку інтелектуальних систем управління динамічними характеристиками ШВ.

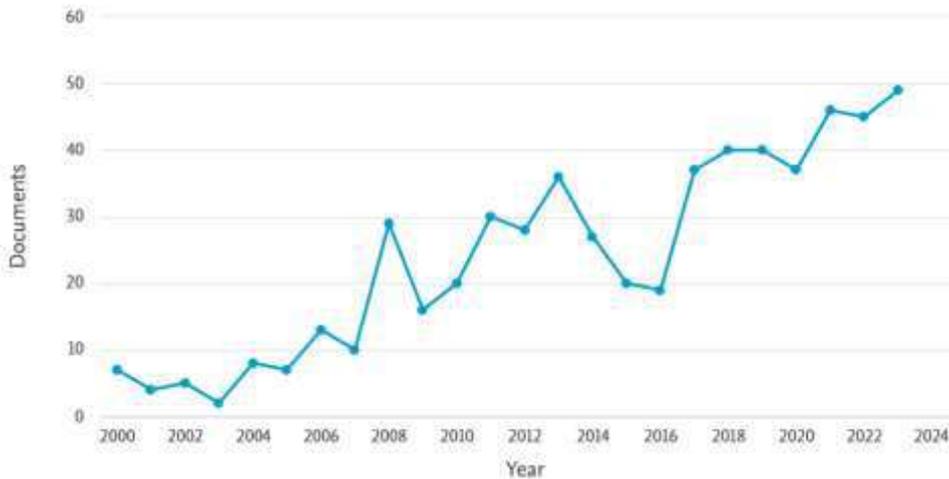


Рисунок 2 – Кількість публікацій за запитом intelligent/smart spindle по роках

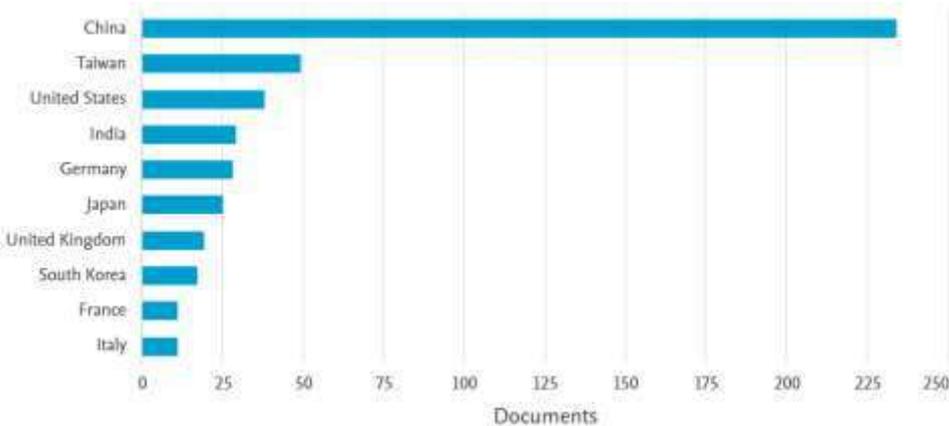


Рисунок 3 – Кількість публікацій по країнах за запитом intelligent/smart spindle

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ДОСЛІДЖЕННЯ

1. Варіювання частотою обертання шпинделя. Зміна частоти обертання шпинделя є одним з ефективних способів зниження вібрацій, яка перериває регенеративний ефект самозбуджуючихся вібрацій. У роботі Ding Longyang [8] розробив схему гасіння самозбуджуючихся вібрацій на основі опрацювання вимірюваної сили різання. Для уникнення початку вібрацій система управління змінювала частоту обертання шпинделя. Вплив варіювання частотою обертання шпинделя на стабільність обробки також досліджував Zhenmin Li та ін. [9]. У якості вхідного сигналу для визначення виходу за межі стабільності процесу різання було обрано акустичний сигнал. При опрацюванні акустичного сигналу із зони різання визначався найкращий момент для

початку варіювання частотою обертання шпинделя. Експериментальні результати (Рисунок) підтвердили перспективність даного способу гасіння вібрацій.

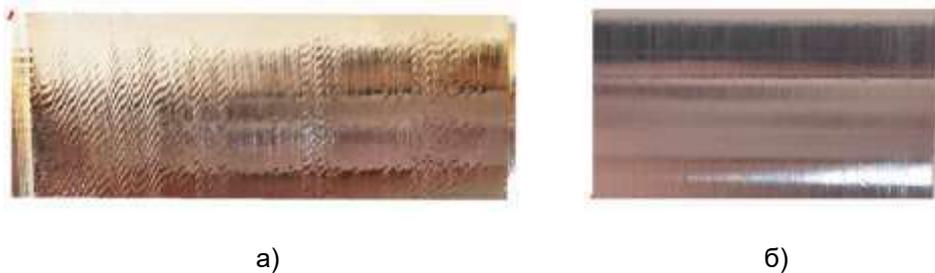


Рисунок 4 – Поверхня заготовки оброблена при постійній (а) та при змінній (б) частоті обертання шпинделя [9]

2. Оптимізація керуючої системи. У роботі [10] розроблена математична модель контролера зі зворотнім зв'язком для затримки початку наростання вібрацій при фрезеруванні. Було запропоновано розрахунок сил приводу в ортогональних площинах при різкому наростанні амплітуди вібрацій. При симуляції процесу фрезерування даний контролер не зміг зменшити амплітуду вібрацій при стабільному процесі різання, але при роботі на нестабільних режимах величина вібрацій була значно зменшена. За рахунок використання такого контролера вдалося досягти збільшення глибини різання при стабільному процесі фрезерування (рис. 5).

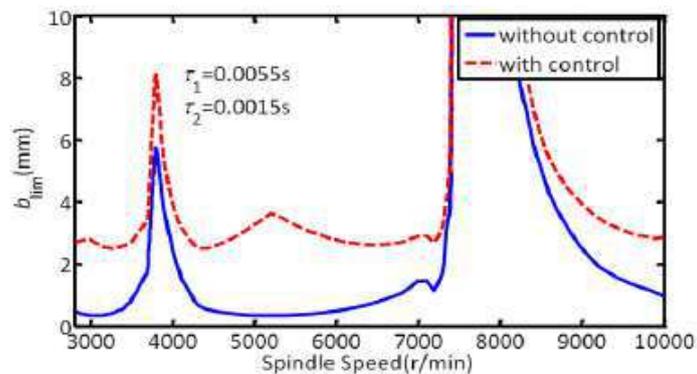


Рисунок 5 – Покращення стабільності фрезерування з контролером відкладення стану нестабільності [10]

Схожа модель управління пристроями активного контролю запропонована І. Mancisidor [11]. Суть закону управління полягає не в зміні динамічної поведінки системи, а в зменшенні регенеративного ефекту. Таке зменшення досягається введенням затримки у один оберт на зворотній зв'язок від виміряної вібрації. Період оберту зазвичай довший за затримки контролера та актуатора, тому запропонований закон дозволяє компенсувати ці затримки. Вплив даного закону на процес обробки був перевірений експериментально. З рисунку 6 видно зменшення величини вібрацій при роботі актуатора по запропонованому закону.

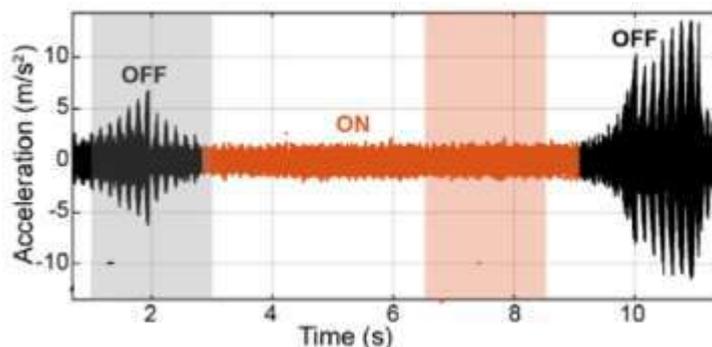


Рисунок 6 – Ефект відкладеного зворотного зв'язку від прискорення [11]

У роботі Miaoxian Guo та ін. [12] був проведений порівняльний аналіз чотирьох алгоритмів систем управління вібраціями: PID (Proportional-Integral-Derivative), Fuzzy PID, BPNN (машинне навчання за методом зворотного поширення помилки), та BPNN PID. Математичне моделювання та проведені експерименти показали (рис. 7), що BPNN PID алгоритм дозволяє серед інших найбільше зменшити амплітуду вібрацій до 70%, проте ефективність даного методу обмежена. Для того, щоб обійти обмеження ефективності, потрібно досліджувати більше алгоритмів.

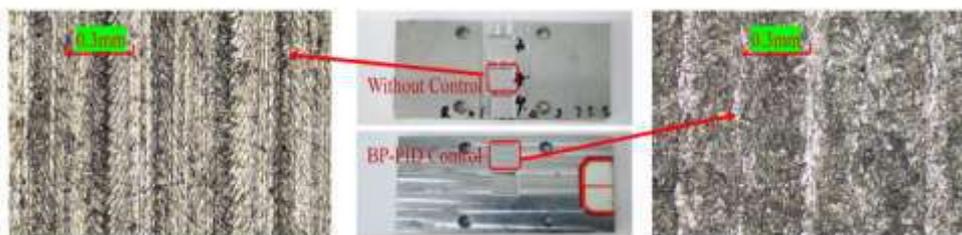


Рисунок 7 – Порівняння якості обробки без контролю вібрацій та з BPNN PID контролем [12]

У роботі [13] проведено порівняння двох підходів активного контролю вібрацій: гасінням збурень та способом стабілізації. Суть першого полягала в мінімізації впливу збурюючих сил, що виникали в процесі роботи, на зміщення інструменту. Даний підхід не враховує чітко взаємодію процесів, а спрямований на зменшення певної вхідної характеристики, за яку відповідає функція алгоритму управління. Завданням методу стабілізації є забезпечення стабільності системи для визначених умов обробки. Для порівняння було проведено математичне моделювання стабільного процесу різання для визначення відносного збільшення глибини різання при застосуванні обох схем в залежності від швидкості обертання шпинделя. Як видно з рисунку 8Рисунок, гасіння збурень сприяє розширенню нижньої межі стабільності, в той час як метод стабілізації створює зони підвищеної стабільності біля заданої частоти обертання.

У роботі Huang, T. та ін. [14] була розроблена математична модель для керування активною магнітною опорою (АМО). Запропонована модель контролювала стабільність процесу різання як при визначеній частоті обертання так і при режимах роботи зі зміною частот обертання. Було

показано, що для забезпечення контролю стабільності різання за обома схемами одночасно, треба враховувати обмеження потужності АМО. Тому в цьому випадку межі стабільності різання будуть вужчі, ніж при застосуванні кожної схеми окремо, але при цьому буде враховано вплив як статичної, так і динамічної складових сил різання на стабільність (рисунок 9).

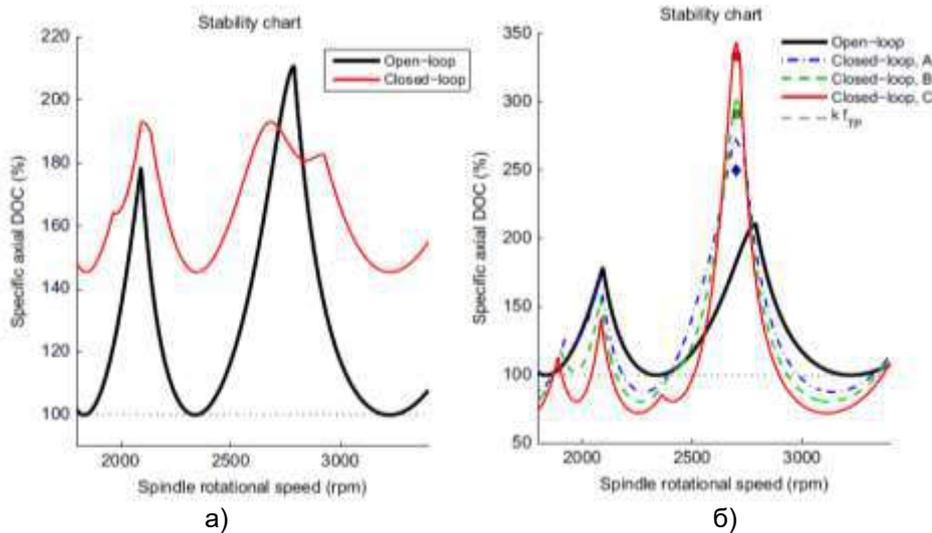


Рисунок 8 – Вплив на стабільність процесу різання гасіння збурень (а) та методом стабілізації (б) для визначеної частоти обертання 2700 хв^{-1} при різних глибинах різання [13]

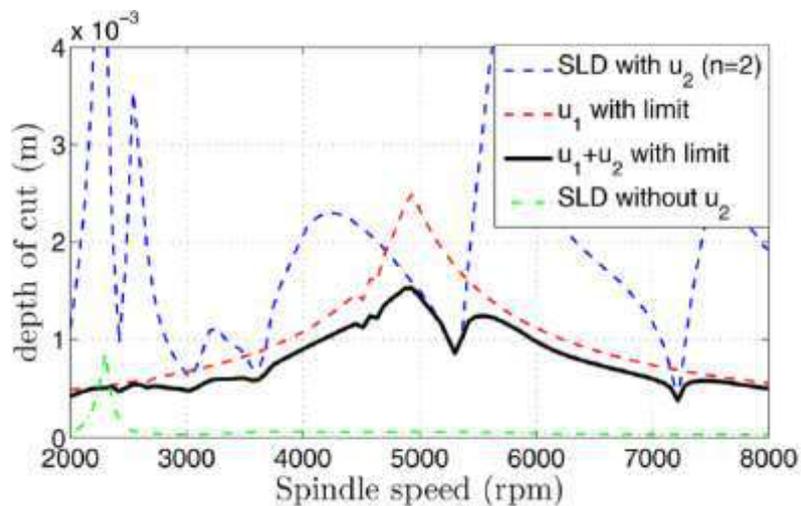


Рисунок 9 – Діаграма стабільності для різних схем управління АМО [14]

Для порівняння ефективності алгоритмів управління активними методами гасіння вібрації експерименти зручніше проводити на спеціальних стендах. Такі стенди дозволяють нівелювати швидкі зміни характеристик різального інструменту при різанні та не враховувати велику кількість параметрів процесу різання. Стенди для відтворення регенеративної вібрації були запропоновані в роботах [11] та [15] (рис. 10).

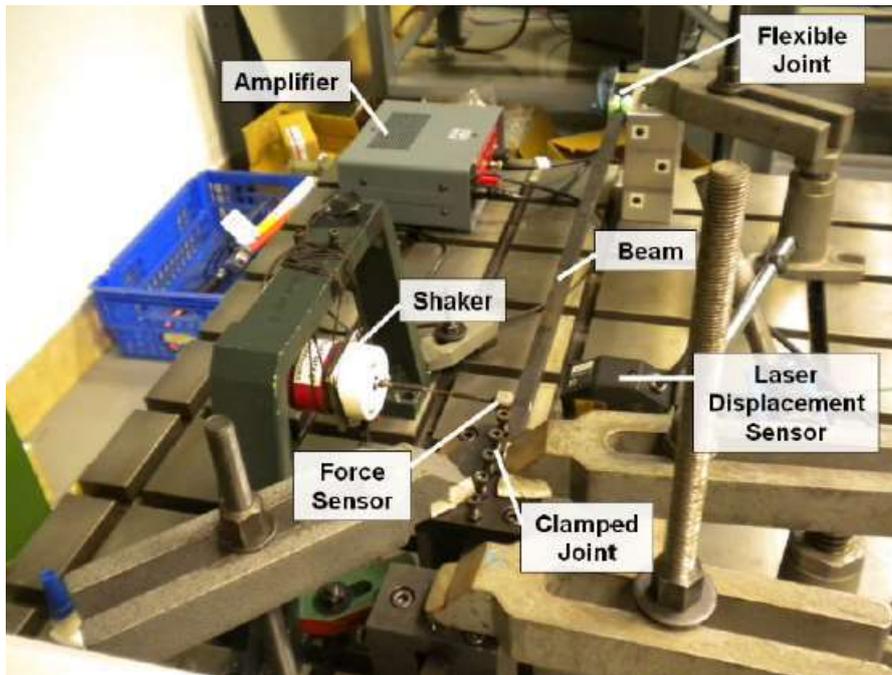


Рисунок 10 – Експериментальний стенд для моделювання регенеративної вібрації [15]

3. Активні системи управління. За характером впливу на ШВ методи гасіння вібрацій можна поділити на пасивні та активні. Пасивні методи (такі як масові демпфери [16] або підбір геометрії інструменту [17]) покращують динамічні характеристики оброблюючої системи без зовнішнього живлення. Але для цифрових систем управління найбільшу цікавість представляють активні методи зниження самозбуджених вібрацій. В основі таких методів лежить:

- спостереження за певним фактором, по якому визначається критичний рівень вібрацій;
- обробка інформації щодо зміни факторів;
- вплив виконавчого механізму на шпindelний вузол з розрахованим напрямом та потужністю.

Далі розглянемо приклади активного контролю.

3.1. Управління динамічними характеристиками за допомогою електромагнітного підшипника. Одним з варіантів управління динамічними характеристиками ШВ є використання активної магнітної опори (АМО). АМО знайшла використання як безконтактний, не потребує змащування левітаційно-ефективний пристрій у багатьох промислових приладах. Найбільш розповсюдженими типами АМО є радіальний [18] та модифікований радіальний [19]. Для радіального типу АМО характерне розміщення електромагнітних полюсів в одній поперечній площині, за що його також називають плоским типом (рис. 11). У модифікованій АМО електромагнітні поля направлені в поздовжньому напрямку для покращення ефективності дії магнітних сил.

Для подолання недоліків вищезгаданих типів АМО, серед яких габаритні розміри та інтенсивність сили, для процесів фрезерування було запропоновано новий вбудований в циліндричний масив магнітний привод

(ЕСАМА) [21]. Покращена форма електромагніту дозволяє збільшити кількість витків обмотки та зменшити габаритні розміри в радіальному напрямку (рис. 12)

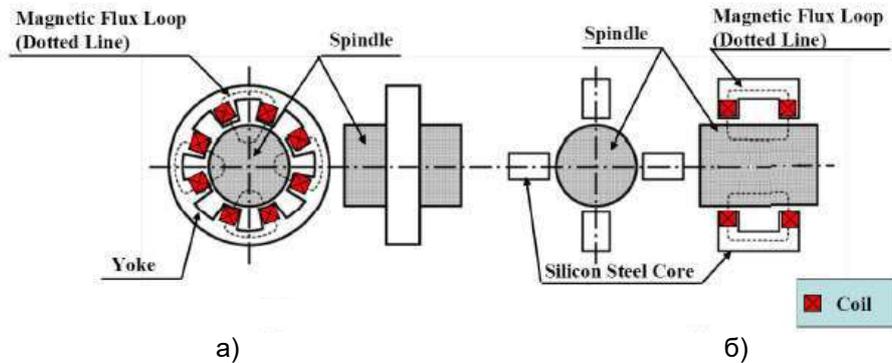


Рисунок 11 – Радіальний (а) та модифікований радіальний (б) типи АМО [20]

У роботі [20] розглянута стратегія управління ЕСАМА при фрезеруванні за допомогою адаптивного контролю. Хоча загальноприйнятий ПІД-контролер може використовуватись для керування АМО, для процесів фрезерування при швидких змінах в динаміці роботи він може призвести до збоїв. Тому було запропоновано додати алгоритм планування посилення ПІД-контролера на основі нечіткої логіки.

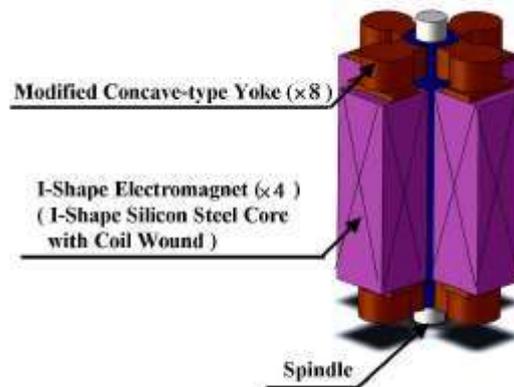


Рисунок 12 – Загальний вигляд приводу ЕСАМА [20]

Адаптивне управління може відбуватися без необхідності отримання попередньої інформації про межі невизначеностей або змінних у часі параметрів [22], [23]. Оскільки динаміка сили різання та магнітної сили є дуже нелінійною, для регулювання відхилення положення шпинделя була розроблена стратегія керування, що складається з еталонних моделей та алгоритмів нечіткої логіки. Для зменшення похибки керування застосовані математичні моделі були побудовані на експериментах, а не теоретично. Після побудови динамічних моделей зміна сили різання може бути кількісно оцінена за допомогою алгоритму нечіткої логіки відповідно до поточних умов роботи та параметрів.

При моделюванні фрезерування зі змінною глибиною різання дана система управління показала зменшення відхилення осі шпинделя в напрямку подачі більш ніж в 2 рази при різкій зміні глибини різання. Моделювання проводилося для процесу фрезерування на частоті 1000 хв^{-1} з подачею 300 мм/хв .

За результатами експериментів з фрезерування кінцевою фрезою алюмінію, акрилу та міді була досліджена динаміка сил різання та магнітної сили для зменшення оціночної похибки для запропонованого алгоритму. Траєкторія та максимальне відхилення осі шпинделя для всіх досліджуваних зразків виявилися приблизно однаковими. Так, максимальне відхилення для всіх зразків склало приблизно 30 мкм при частоті обертання 3000 хв^{-1} , подачі 300 мм/хв та сталій глибині різання $2,5 \text{ мм}$ в осьовому і 1 мм в радіальному напрямках.

Хоча запропонований алгоритм на основі нечіткої логіки досяг адаптивного посилення контролю процесом різання, але похибок оцінки остаточно позбутися дуже важко. Тому необхідно вдосконалювати правила прийняття рішень та складові функції.

У роботі Putz M. та ін. [24] представлена запатентована адаптивна система демпфування шпинделя за допомогою активного електромагнітного підшипника. Автори дослідження розмістили (рис. 13) електромагнітний підшипник між дворядними шарикопідшипниками шпиндельного вузла для управління динамічними характеристиками шпинделя і зменшення впливу власних частот. Також була розроблена адаптивна схема управління цим підшипником (рис. 14). Дана розробка націлена на інтеграцію шпиндельного вузла в загальну систему управління цехом. У металорізальних верстатах дізнатися про знос різальної кромки інструмента, підшипників шпинделя, направляючих, шарико-гвинтової пари або приводів подач можна, порівнюючи «відбиток» цього компоненту після експлуатації з «відбитком» при запуску в експлуатацію [25]. Під «відбитком» розуміють часові (імпульс сили) та амплітудно-частотні характеристики приводу. Тому, опрацьовуючи дані системи управління ШВ на верстатах в цеху, можна оперативно вносити необхідні корективи в технологічну систему.

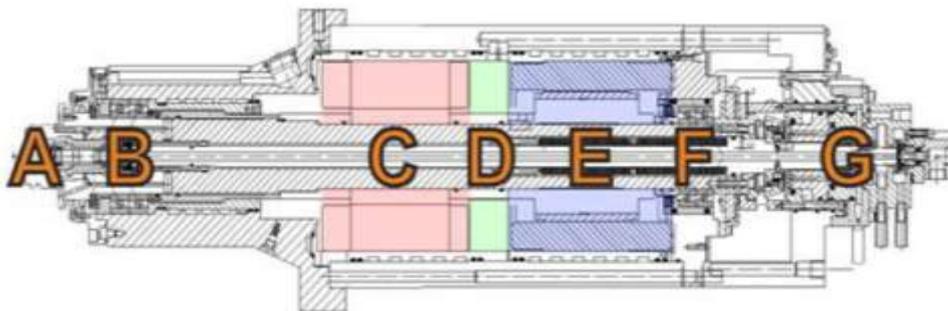


Рисунок 13 – Схема шпиндельного вузла з додатковим активним електромагнітним підшипником

A – інструментальний патрон; B, F – дворядний підшипник;
C – електромагнітний підшипник; D – сенсор положення ротора;
E – синхронний двигун шпинделя; G – гідравлічний демпфер [25]

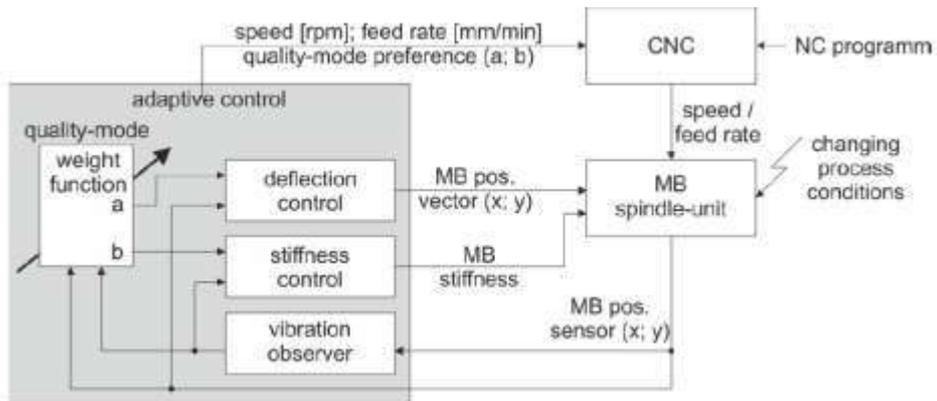


Рисунок 14 – Адаптивна система управління шпинделем із замкненим контуром [25]

3.2. Управління динамічними характеристиками за допомогою п'єзоелектричного приводу. У роботі [26] була запропонована модель передбачуваного управління гасінням вібрацій при фрезеруванні за допомогою п'єзоелектричного приводу. Вібрація шпинделя вимірювалась в двох ортогональних площинах датчиками переміщень. А дві пари п'єзоелектричних приводів встановлені на зовнішньому кільці підшипників (рис. 15). Моделювання процесу фрезерування із запропонованим методом керування показало, що завдяки гасінню вібрацій була підвищена стабільність різання, і максимальна глибина різання без вібрацій буда збільшена з 0,6 мм до 4 мм.

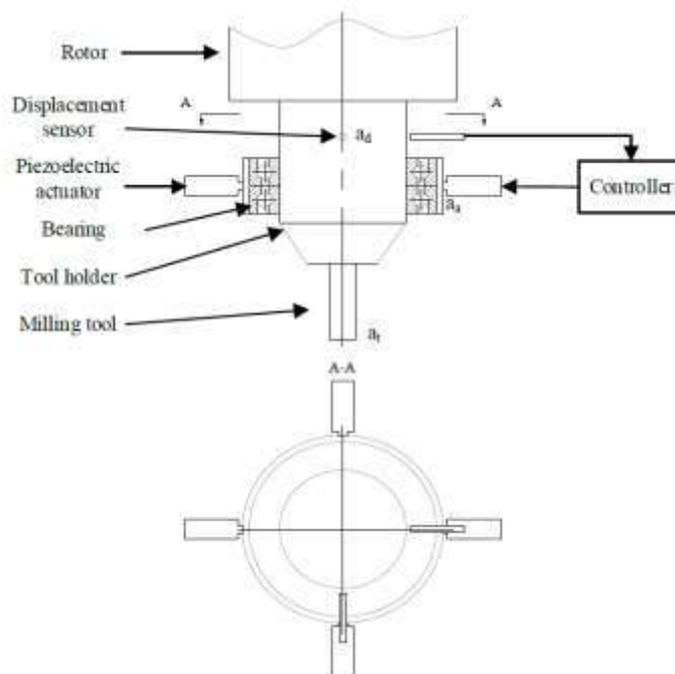


Рисунок 15 – Схема управління гасінням вібрацій за допомогою п'єзоелектричних приводів [26]

У дослідженні [27] було змодельовано роботу шпиндельного вузла фрезерного верстату при швидкості обертання 15000 хв^{-1} та різних глибинах різання для виявлення частот виникнення вібрацій. Для погашення таких вібрацій була запропонована модель адаптивного управління шпиндельним вузлом за допомогою п'єзоелектричних приводів (рис. 16). Процес управління за запропонованим методом був змодельований у середовищі SIMULINK. Результати моделювання показали, що використання замкнутого контуру управління вібраціями значно стабілізують процес різання.

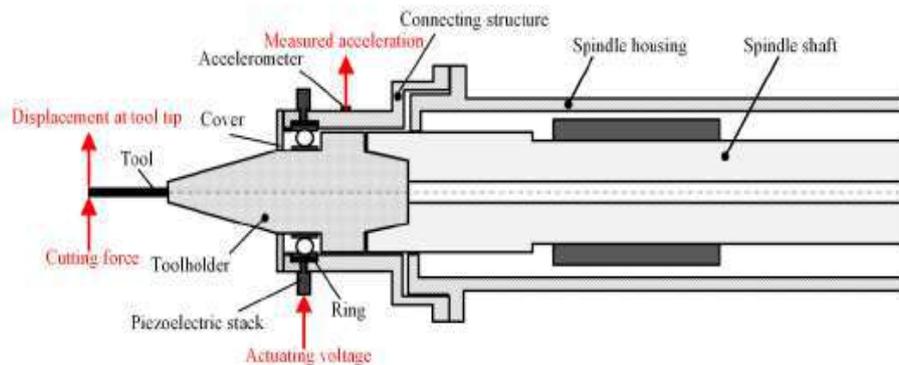


Рисунок 16 – Система активного управління гасінням вібрацій [27]

Дослідження п'єзоелектричних приводів для гасіння вібрацій також було проведено в роботі [28]. Був розроблений новий метод оцінки стабільності процесу фрезерування та проведені дослідження на експериментальному стенді (рис. 17Рисунок). В алюмінієвій плиті були оброблені два пази глибиною 2 мм при частоті обертання 585 хв^{-1} та подачі 60 мм/хв. Амплітуди коливань для всіх частот вібрацій, а особливо низьких, були значно меншими при застосуванні запропонованого контролера. Наглядний результат видно при порівнянні якості поверхні пазів оброблених з контролером та без.

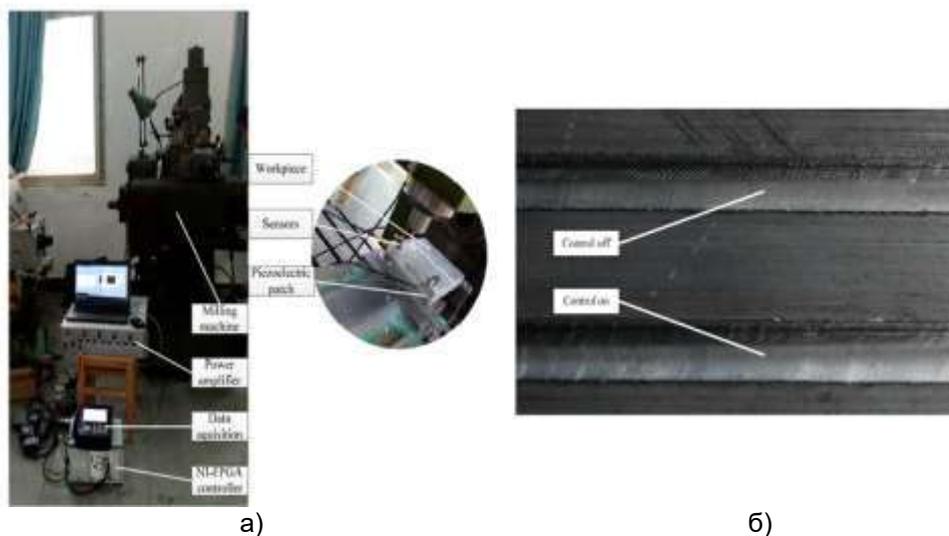


Рисунок 17 – Експериментальний стенд (а) та оброблені зразки (б) [28]

3.3. Управління динамічними характеристиками за допомогою інерційного віброприводу. У роботі [29] розглядалися різні стратегії керування інерційним віброприводом SA10-V30 від CSA Engineering для покращення стабільності процесу обробки (рис. 18): контролер прямого зворотного зв'язку швидкості, метод лінійних квадратичних регуляторів та H_{∞} -контроль. В якості експериментального дослідження проводилося фрезерування пазів шириною 50 мм. Було підтверджено збільшення глибини різання при стабільному процесі фрезерування для всіх трьох стратегій керування в 1,6...2 рази.

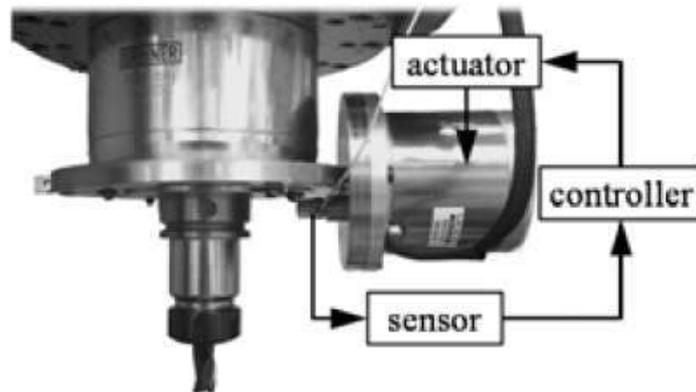


Рисунок 18 – Керування вібраціями шпинделя за допомогою інерційного віброприводу [29]

Авторами дослідження [30] був розроблений власний інерційний вібропривод (рис. 19). Для зменшення вібрацій була обрана стратегія управління зі зворотнім зв'язком по швидкості. Вбудована система складалася з інерційного віброприводу, акселерометра для вимірювання рівня вібрацій, контролера та підсилювача струму. Експериментально підтверджено покращення стабільності процесу фрезерування при використанні розробленого інерційного віброприводу, що дозволило збільшити глибину різання до 2 разів без появи вібрацій.

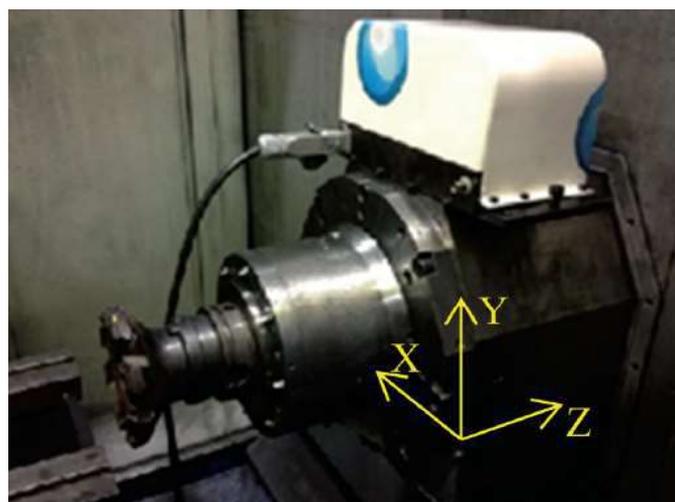


Рисунок 19 - Інерційний вібропривод встановлений на оброблюючому центрі DS-630 [30]

На рисунку 20 видно покращення якості обробленої поверхні за рахунок підвищення стабільності фрезерування при ввімкненні інерційного віброприводу.



Рисунок 1 – Оброблений зразок до ті після ввімкнення інерційного віброприводу [30]

Обговорення результатів. Проаналізовані в даній статті експериментальні дослідження зведено в таблицю 1. Усі методи були розділені на 3 групи в залежності від способу підвищення стабільності процесу різання. Серед запропонованих методів був визначений спосіб експериментальної валідації, а також умови проведення експерименту. Також вказано спосіб побудови діаграми сталості (SLD).

Половина методів досліджується по математичним моделям або на експериментальному обладнанні. Тому попри достатньо велику теоретичну базу актуальним залишається питання практичної перевірки та застосування новітніх методів управління динамічними характеристиками ШВ. Наряду з цим існують досі недостатньо досконально вивчені технологічні процеси, наприклад, обробка нежорстких деталей. При обробці нежорстких деталей виникає необхідність враховувати вплив динамічної взаємодії інструменту та заготовки на стабільність процесу різання.

ВИСНОВКИ

Більшість експериментальних досліджень інтелектуальних систем управління ШВ проводяться на обробляючих центрах, при цьому досліджується в основному процес фрезерування. Це пояснюється широкою універсальністю такого обладнання. Але доцільним є розширення технологічних можливостей верстатів різних груп за рахунок впровадження інтелектуальних систем управління. Це дасть можливість відчутно посприяти підвищенню їх продуктивності при відносно незначних витратах. Дослідження динаміки процесу різання доцільно також з точки зору перевірки рекомендованих виробниками різального інструменту режимів різання, які можуть виявитися не відповідними дійсним умовам обробки. Тому дослідження можливостей інтелектуального управління стабільністю процесу різання може зменшити кількість «білих плям» в наукових знаннях та практичних підходах при проектуванні нових верстатів і вдосконаленні існуючих.

**Технологічні комплекси • Technological Complexes
2025
Том 17. № 2 • Vol. 17. No 2**

Таблиця 1 – Експериментальні дослідження методів стабілізації процесу різання

№ п/п	Методи підвищення стабільності	Спосіб побудови діаграми сталості (SLD)	Актуатор	Дані експерименту					Посилання
				Заготовка	Режим різання	Верстат	Інструмент	Датчики визначення вібрації	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1. Варіювання швидкості обертання шпинделя									
1		Напівдискретний метод		AISI 4340	$n=250 \text{ хв}^{-1}$ $a_p=0,03 \text{ мм}$ $f_o=0,10 \text{ мм/об}$	СК6150А токарний верстат	2NC-DCGW11T304	Динамометр Kistler 9257	[8]
2				Алюміній	$n=600 \text{ хв}^{-1}$ $a_p=0,2 \text{ мм}$ $f_o=0,10 \text{ мм/об}$	Токарний ЧПК	MDJNR2525M11	GRAS46BE Мікрофон	[9]
2. Оптимізація керуючої системи									
3	Стабілізація регенеруючої вібрації	Дискретний метод побудови			$f_z=0,1 \text{ мм/зуб}$ $t_r=12,7 \text{ мм}$	Моделювання	$\varnothing 25,4 \text{ мм}$, $z=4 \text{ зуба}$		[10]
4	Delayed Acceleration Feedback	Метод частотних інтервалів	Micromega ADD-2D-1 kN electromagnetic actuator	Сталь F1140 (C45) $\varnothing 950 \text{ мм}$	$n = 135 \text{ хв}^{-1}$ $f_o=0,4 \text{ мм/об}$	SORALUCE vertical turning center	C8-PRS CL-55080- 32 RCMX 320900 4225	IMI акселерометр (ICP type)	[11]
5	BPNN PID		MPT-2J PZT	7075-T6	$n=(8-12) \cdot 10^3 \text{ хв}^{-1}$ $f=200-600 \text{ мм/хв}$ $t_r=0,2-0,4 \text{ мм}$ $a_p=0,2 \text{ мм}$	Carver S600A milling center	$\varnothing 8 \text{ мм}$, $z=2 \text{ зуба}$	5E101 eddy current displacement sensor	[12]
6	Придушення збурень та стабілізація	ZOA			$n=2300, 2700 \text{ хв}^{-1}$ $a_p=1,5; 2; 2,5 \text{ мм}$	Моделювання			[13]
7	Компенсація прискорення при змінах швидкості	Напівдискретний метод	Активний магнітний підшипник		$n=(2-8) \cdot 10^3 \text{ хв}^{-1}$ $a_p=5 \text{ мм}$	Моделювання	$\varnothing 10 \text{ мм}$, $z=2 \text{ зуба}$		[14]

**Технологічні комплекси • Technological Complexes
2025
Том 17. № 2 • Vol. 17. No 2**

Кінець таблиці 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3. Активні методи контролю									
3.1 Магнітний підшипник									
8		Методи частотних інтервалів	Активний електромагнітний підшипник	Сталь, алюміній	$n=(4-5) \cdot 10^3 \text{ хв}^{-1}$	Експериментальний стенд		LED-photo detectors	[24]
9		-	ЕСАМА	Акрил, алюміній мідь	$n=3000 \text{ хв}^{-1}$ $f=300 \text{ мм/хв.}$ $a_p=2,5 \text{ мм}$ $t_f=1 \text{ мм}$	How-Mau CNC Machinery	Ø8мм, z=4 зуба	-	[20]
3.2 П'єзоелектричний актуатор									
10		ZOA, Padé approximation	П'єзоелектричний актуатор	-	$n=8000 \text{ хв}^{-1}$ $a_p=1 \text{ мм}$ $t_f=5 \text{ мм}$	Моделювання	Ø10мм, z=4 зуба	-	[26]
11		-	П'єзоелектричний актуатор	-	$n=15000 \text{ хв}^{-1}$ $a_p=0,09-0,18 \text{ мм}$	Моделювання Simulink	-	-	[27]
12		-	П'єзоелектричний актуатор (M-8557-P1, M + P)	Алюміній	$n=585 \text{ хв}^{-1}$ $f=60 \text{ мм/хв}$ $a_p=2 \text{ мм}$	Експериментальний стенд		Акселерометр 352C34, PCB, Dewep	[28]
3.3 Інерційний вібропривод									
13			SA10-V30 від CSA Engineering	Сталь С45	$a_p=1,5-2,9 \text{ мм}$	SPINNER U5-620 machining center	торцева фреза Ø 50мм	Акселерометр KS 813B від MMF	[29]
14			Оригінальний інерційний вібропривод	Сталь F1140	$n=610 \text{ хв}^{-1}$ $f_z=0,2 \text{ мм/зуб}$ $t_f=100 \text{ мм}$	DS-630 machining center	SANDVIK R245-125Q40-12M Ø125 mm, z=8 зубів	Акселерометр	[30]

ЛІТЕРАТУРА

- [1] J. Wójcicki, M. Leonesio, and G. Bianchi, "Potential for smart spindles adoption as edge computing nodes in Industry 4.0," *Procedia CIRP*, vol. 99, pp. 86–91, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.PROCIR.2021.03.015.
- [2] C. YUE, H. GAO, X. LIU, S. Y. LIANG, and L. WANG, "A review of chatter vibration research in milling," *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 32, no. 2, pp. 215–242, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.cja.2018.11.007.
- [3] J. Munoa et al., "Chatter suppression techniques in metal cutting," *CIRP Ann Manuf Technol*, vol. 65, no. 2, pp. 785–808, 2016, doi: 10.1016/j.cirp.2016.06.004.
- [4] B. Liu, C. Liu, X. Yu, Y. Zhou, and D. Wang, "Prediction, detection, and suppression of regenerative chatter in milling," Oct. 01, 2022, SAGE Publications Inc. doi: 10.1177/16878132221129746.
- [5] Y. Sun, M. Zheng, S. Jiang, D. Zhan, and R. Wang, "A State-of-the-Art Review on Chatter Stability in Machining Thin-Walled Parts," Mar. 01, 2023, MDPI. doi: 10.3390/machines11030359.
- [6] G. Quintana and J. Ciurana, "Chatter in machining processes: A review," May 2011. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2011.01.001.
- [7] H. Snyder, "Literature review as a research methodology: An overview and guidelines," *J Bus Res*, vol. 104, pp. 333–339, Nov. 2019, doi: 10.1016/J.JBUSRES.2019.07.039.
- [8] L. Ding, Y. Sun, and Z. Xiong, "Active Chatter Suppression in Turning by Simultaneous Adjustment of Amplitude and Frequency of Spindle Speed Variation," *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, vol. 142, no. 2, Feb. 2020, doi: 10.1115/1.4045618.
- [9] Z. Li, Q. Song, L. Zhanqiang, B. Wang, and Y. Cai, "Chatter suppression mechanism and parameters configuration of the spindle speed variation with piecewise characteristics," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 122, Sep. 2022, doi: 10.1007/s00170-022-10071-z.
- [10] X. Long, S. Ren, and P. Zheng, "Delayed State Feedback Control for Milling Process," *Procedia IUTAM*, vol. 22, pp. 115–122, Jan. 2017, doi: 10.1016/J.PIUTAM.2017.08.015.
- [11] I. Mancisidor, A. Pena-Sevillano, Z. Dombovari, R. Barcena, and J. Munoa, "Delayed feedback control for chatter suppression in turning machines," *Mechatronics*, vol. 63, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.mechatronics.2019.102276.
- [12] M. Guo, W. Xia, J. Liu, W. Guo, and C. Wu, "Investigation on active vibration control to improve surface quality in precision milling process," *Proc Inst Mech Eng B J Eng Manuf*, 2023, doi: 10.1177/09544054231207422.
- [13] J. Monnin, F. Kuster, and K. Wegener, "Optimal control for chatter mitigation in milling – Part 1: Modeling and control design," *Control Eng Pract*, vol. 24, no. 1, pp. 156–166, Mar. 2014, doi: 10.1016/J.CONENGPRAC.2013.11.010.
- [14] T. Huang, Z. Chen, H. T. Zhang, and H. Ding, "Active control of an active magnetic bearings supported spindle for chatter suppression in milling process," *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Transactions of the ASME*, vol. 137, no. 11, Nov. 2015, doi: 10.1115/1.4030841.
- [15] A. Etxebarria, R. Barcena, and I. Mancisidor, "Active Control of Regenerative Chatter in Turning by Compensating the Variable Cutting Force," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 224006–224019, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3043975.
- [16] J. Bartscher and J. Fleischer, "Adaptive tuned mass damper with variable mass for chatter avoidance," *CIRP Annals*, vol. 66, no. 1, pp. 397–400, Jan. 2017, doi: 10.1016/J.CIRP.2017.04.059.

- [17] A. Iglesias, Z. Dombovari, G. Gonzalez, J. Munoa, and G. Stepan, "Optimum selection of variable pitch for chatter suppression in face milling operations," *Materials*, vol. 12, no. 1, Dec. 2018, doi: 10.3390/ma12010112.
- [18] P. Imoberdorf, C. Zwysig, S. D. Round, and J. W. Kolar, "Combined Radial-Axial Magnetic Bearing for a 1 kW, 500,000 rpm Permanent Magnet Machine," in *APEC 07 - Twenty-Second Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 2007, pp. 1434–1440. doi: 10.1109/APEX.2007.357705.
- [19] N.-C. Tsai and S.-L. Hsu, "On Sandwiched Magnetic Bearing Design," *Electromagnetics*, vol. 27, no. 6, pp. 371–385, Aug. 2007, doi: 10.1080/02726340701492455.
- [20] R. M. Lee and T. C. Chen, "Adaptive control of active magnetic bearing against milling dynamics," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 6, no. 2, 2016, doi: 10.3390/app6020052.
- [21] N.-C. Tsai and R.-M. Lee, "Regulation of spindle position by magnetic actuator array," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 53, pp. 93–104, Mar. 2011, doi: 10.1007/s00170-010-2830-0.
- [22] S. Sheng and C. Sun, "A near-hover adaptive attitude control strategy of a ducted fan micro aerial vehicle with actuator dynamics," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 5, no. 4, pp. 666–681, 2015, doi: 10.3390/app5040666.
- [23] S. Sheng and C. Sun, "Design of a Stability Augmentation System for an Unmanned Helicopter Based on Adaptive Control Techniques," *Applied Sciences*, vol. 5, pp. 575–586, Sep. 2015, doi: 10.3390/app5030575.
- [24] P. Matthias, B. Peter, K. Hans-Joachim, and W. Rafael, "Adaptive Spindle Damping System with Active Electromagnetic Bearing," *Procedia Manuf*, vol. 8, pp. 557–562, 2017, doi: 10.1016/j.promfg.2017.02.071.
- [25] H.-J. Koriath, M. Hoffmann, and P. Blau, "Цифровые технологии Industrie 4.0 для станков и промышленного оборудования," *Avtomatisazija v promyshlennosti 1819-5962*, vol. 5, pp. 9–11, Apr. 2017.
- [26] D. Li, H. Cao, F. Shi, X. Zhang, and X. Chen, "Model Predictive Control Based Chatter Suppression in Milling Process via Piezoelectric Stack Actuators," in *Procedia CIRP*, Elsevier B.V., 2018, pp. 31–36. doi: 10.1016/j.procir.2018.08.308.
- [27] F. Shi, H. Cao, D. Li, X. Chen, and X. Zhang, "Active chatter control in high speed milling processes based on H_∞ almost disturbance decoupling problem," in *Procedia CIRP*, Elsevier B.V., 2018, pp. 37–42. doi: 10.1016/j.procir.2018.09.050.
- [28] X. Zhang, C. Wang, R. X. Gao, R. Yan, X. Chen, and S. Wang, "A novel hybrid error criterion-based active control method for on-line milling vibration suppression with piezoelectric actuators and sensors," *Sensors (Switzerland)*, vol. 16, no. 1, Jan. 2016, doi: 10.3390/s16010068.
- [29] R. Kleinwort, M. Schweizer, and M. F. Zaeh, "Comparison of Different Control Strategies for Active Damping of Heavy Duty Milling Operations," in *Procedia CIRP*, Elsevier B.V., 2016, pp. 396–399. doi: 10.1016/j.procir.2016.04.054.
- [30] I. Mancisidor, X. Beudaert, G. Aguirre, R. Barcena, and J. Munoa, "Development of an active damping system for structural chatter suppression in machining centers," *International Journal of Automation Technology*, vol. 12, no. 5, pp. 642–649, Sep. 2018, doi: 10.20965/ijat.2018.p0642.

CONTROL SYSTEMS FOR THE DYNAMIC CHARACTERISTICS OF SPINDLE UNITS: A REVIEW OF PUBLICATIONS

¹ **Ponomarenko, S.** *PhD student*

² **Sapon, S.** *PhD, Associate Professor*

¹ **Chernihiv Polytechnic National University / Ukraine**

² **Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute / Ukraine**

Abstract. The article presents a review of modern methods and systems for active vibration control in machining processes, specifically milling and turning. Two main directions are considered: spindle speed variation and machine tool control system optimization. The application of active control systems, including electromagnetic bearings, piezoelectric actuators, and inertial vibration actuators, for improving the dynamic characteristics of the spindle unit and suppressing self-excited vibrations is analyzed in detail. Examples of experimental studies and mathematical models confirming the effectiveness of various approaches in enhancing cutting process stability, improving machined surface quality, and increasing productivity are provided. Particular attention is paid to the comparative analysis of different control algorithms, such as PID, Fuzzy PID, BPNN, and BPNN PID, as well as disturbance suppression and stabilization methods. The application of active magnetic bearings with various configurations (radial, modified radial, and embedded cylindrical magnetic drives) and adaptive control systems based on them is separately considered. The use of piezoelectric actuators for active vibration damping is analyzed, and the results of modeling and experimental studies are presented. The effectiveness of using inertial vibration actuators with different control strategies to improve milling stability is also discussed. Based on the conducted review, a conclusion is made about the promising nature of active vibration control methods for increasing the efficiency and quality of machining. The importance of further research in the direction of practical implementation and improvement of existing control systems, especially for machining flexible parts where the dynamic interaction of the tool and workpiece plays a significant role, is emphasized.

Keywords: self-excited vibrations, cutting stability, active vibration control, spindle unit, electromagnetic bearing, piezoelectric actuator, inertial vibration actuator.

Дата першого надходження
статті до видання

25.09.2025 р.

Дата прийняття статті до друку
статті після рецензування

09.10.2025 р.

Дата
оприлюднення

23.12.2025 р.

DOI: <https://doi.org/10.36910/4293-52779-2025-17-02-05>
УДК 621.762; 621.77

¹ Михайлов А. О.

PhD, м. н. с.

ORCID: 0000-0003-1442-0658

² Штефан Є. В.

д-р. техн. наук, професор

ORCID: 0000-0002-0697-7651

¹ Михайлов О. В.

д-р. техн. наук, ст. н. с.

ORCID: 0000-0001-6040-2376

^{1,2} Штерн М. Б.

*д-р. техн. наук, член-коресп. НАН
України*

ORCID: 0000-0002-7757-5721

¹ Інститут проблем

матеріалознавства ім. І.М.

Францевича НАН України /
Україна

² Київський політехнічний

інститут імені Ігоря Сікорського /
Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ФОРМОУТВОРЕННЯ ВИРОБІВ З ПОРШКОВИХ ТА ПОРИСТИХ МАТЕРІАЛІВ

Анотація: розроблена математична модель процесів формоутворення структурно-неоднорідних пористих матеріалів, яка включає аналітичну, алгоритмічну та цифрову моделі. Використовуються співвідношення теорії пластичності пористого тіла, які, на відміну від існуючих, дозволяють описувати деформування як порошкових матеріалів, так і пористих заготовок. Моделювання виконано методом скінчених елементів. Розглянуто пластичну та пружно-пластичну поведінку матеріалу. Розв'язок задач деформування виконувався покроково, методом послідовних навантажень. На кожному з етапів необхідні параметри моделі визначалися в результаті ітераційного процесу. Алгоритмічні моделі були реалізовані у вигляді відповідних цифрових моделей. Цифрова модель пластичного деформування має наступні основні блоки: препроцесор, модуль моделювання та постпроцесор. Передбачена можливість використання існуючих програм геометричного моделювання, а також програм пре- і пост- процесорної обробки даних. Цифрова модель пружно-пластичного деформування була реалізована у вигляді підпрограм, які були імплементовані в програмні системи моделювання методом скінчених елементів. Для перевірки адекватності розроблених цифрових моделей проведено порівняння отриманих результатів з експериментальними даними та результатами моделювання інших авторів. Порівняння виконано для процесів двобічного пресування порошків та вільної осадки пористих циліндричних заготовок. Досліджені закономірності деформування пористих заготовок під час радіального ущільнення по внутрішньому діаметру. Деформування проводилося за два проходи. Встановлено, що деформація матеріалу відбувається локально. Показано вплив кількості проходів на еволюцію параметрів, що визначають властивості виробів.

Ключові слова: ресурсозберігаючі технології, порошкова металургія,

дисперсні системи, порошкові матеріали, пористі заготовки, пластичність, обробка тиском, моделювання, метод скінчених елементів.

ВСТУП

Успішний розвиток машинобудування можливий на основі впровадження ефективних ресурсозберігаючих технологій. До числа таких технологій відносяться методи порошкової металургії. Методи порошкової металургії мають ряд переваг, які дозволяють їм витіснити більш дорогі способи обробки металів: лиття, ковку та штампування, а також механічну обробку.

Останні роки характеризуються значним розширенням застосування процесів деформування порошкових матеріалів та пористих заготовок. Застосування пористих заготовок дозволяє ущільнити їх і надати виробу задану форму з меншими зусиллями, скоротити число переходів та зменшити кількість потрібного штампового інструменту

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

При проектуванні технологічних процесів порошкової металургії актуальним є дослідження впливу схем деформування на розподіл параметрів, що визначають характеристики виробів. Поряд із традиційними методами, в даний час при проектуванні виробництва все ширше застосовуються інформаційні технології, методи комп'ютерного моделювання. Розробка ефективних методів моделювання представляє собою важливу проблему.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Існують два основні підходи, які застосовують при моделюванні процесів деформування порошкових матеріалів та пористих заготовок: дискретний і континуальний.

Дискретний підхід розглядає взаємодію між окремими елементами (частинками) дисперсного середовища [1-3]. Він реалізований в методі дискретних елементів. Моделювання методом дискретних елементів дозволяє отримати інформацію про траєкторії окремих частинок, силах, які на них діють, що, в свою чергу, дозволяє краще розуміти процеси деформування. Метод дискретних елементів не має недоліків континуального підходу, пов'язаних з порушенням суцільності тіла, що деформується, він дозволяє моделювати поведінку багатокомпонентних середовищ. До недоліків дискретних методів можна віднести великі обчислювальні витрати, складність визначення необхідних для проектування технологічних процесів характеристик, обмеженість застосування. Тому основним підходом при моделюванні процесів деформаційної обробки порошкових матеріалів є континуальний підхід.

Вводячи континуальні уявлення, виходять з того факту, що поведінка окремої частинки порошку не представляє поведінку усієї порошкової маси [4]. На відміну від окремих частинок порошку, пластична деформація яких відбувається без зміни об'єму, зовнішнє навантаження усієї сукупності частинок супроводжується значними незворотними об'ємними змінами, тобто

порошкове та пористе тіла можна розглядати як середовище, що пластично стискається. Найменший об'єм ансамблю, в якому контактують між собою частинки порошку і який відтворює поведінку усїєї порошкової маси, називають репрезентативним елементом. Його об'єм, як правило, на декілька порядків менший за об'єм усїєї порошкової маси. Передбачається, що увесь об'єм порошку може бути складений з репрезентативних елементів. Локальні характеристики порошкового середовища, такі як густина, температура, тензори напружень, швидкості переміщень та інші вводяться відповідно до канонів суцільного середовища з обмовкою, що під точкою порошкового середовища мається на увазі не окрема частинка порошку, а репрезентативний елемент.

Моделі пластичної течії порошоків [5-7] і пористих тіл [8-10] відрізняються і відображають той факт, що пористі тіла чинять опір навантаженням розтягування, а порошки – ні.

Найбільш поширеним методом моделювання при вирішенні задач деформування порошкових і пористих матеріалів є метод скінчених елементів, який реалізований у ряді універсальних програмних систем. В сучасні програми імплементовані моделі порошкових і пористих тіл, що дає можливість моделювати процеси деформування дисперсних середовищ. Однак для порошоків і пористих тіл застосовуються різні моделі пластичної течії, що викликає ряд незручностей при моделюванні. До того ж, не у всіх програмах зазначені моделі реалізовані одночасно.

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Метою статті є розробка методу моделювання, що дозволяє дослідити закономірності процесів деформаційної обробки як порошкових матеріалів, так і пористих заготовок.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ДОСЛІДЖЕННЯ

Розроблено метод дослідження закономірностей процесів формоутворення деталей з порошкових та пористих матеріалів. Використовуються співвідношення теорії пластичності пористого тіла запропоновані у роботі [11] та метод скінчених елементів.

Розробка математичної моделі процесу деформування порошкових матеріалів та пористих заготовок включає низку послідовних етапів. Ці етапи визначають наступну структуру математичної моделі: аналітична, алгоритмічна та цифрова моделі.

1. Аналітична модель

1.1. Співвідношення теорії пластичності пористого тіла

Рівняння контури поверхні навантаження в р-т площині (рис. 1) має вигляд:

$$F = \frac{(p - p_0)^2}{\psi} + \frac{\tau^2}{\varphi} - \tau_s^2 = 0, \quad (1)$$

де p – величина гідростатичного тиску,
 τ – інтенсивність дотичних напружень,

φ і ψ – матеріальні функції, залежні від пористості,
 τ_s – границя текучості матеріалу порошку або твердої фази пористого тіла,
 p_0 – значення гідростатичної компоненти напруженого стану, за якої об'єм пористого матеріалу не змінюється.

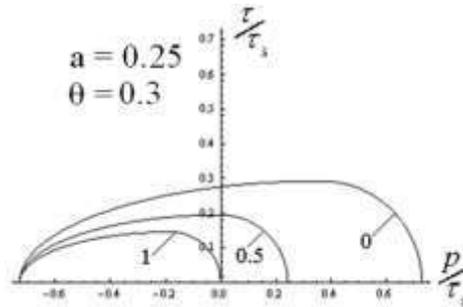


Рисунок 1 – Вигляд контуру поверхні навантаження в р-т площині при різних значеннях параметру m

Вирази для матеріальних функцій визначаються наступним чином:

$$\psi_0 = \frac{2}{3} \cdot \frac{(1-\theta)^3}{\theta}. \quad (2)$$

$$\varphi = \frac{1}{(1+m)^2} \cdot (1-\theta)^3 \cdot (1-|2 \cdot a - 1|)^2. \quad (3)$$

$$\psi_1 = 4(1-\theta)\psi_0 \cdot \frac{(1-a)^2}{(1+m)^2}. \quad (4)$$

$$\psi_2 = 4(1-\theta)\psi_0 \cdot \frac{a^2}{(1+m)^2}. \quad (5)$$

$$p_0 = \tau_s \sqrt{1-\theta} \sqrt{\psi_0} \cdot \left(\frac{1-m-2 \cdot a}{1+m} \right). \quad (6)$$

$$\psi = \frac{1}{2} (1 - \text{Sign}(p - p_0)) \psi_1 + \frac{1}{2} (1 + \text{Sign}(p - p_0)) \psi_2. \quad (7)$$

Загальний зв'язок між напруженнями і швидкостями деформацій в покомпонентній формі визначається законом течії, що асоціюється з рівнянням пластичного потенціалу у формі:

$$\sigma_{ij} = \frac{\tau_s \cdot \varphi}{w} \left[e_{ij} + \left(\frac{\psi}{\varphi} - \frac{1}{3} \right) \cdot e \cdot \delta_{ij} \right] + p_0 \cdot \delta_{ij}. \quad (8)$$

З вираження для питомої швидкості дисипації енергії, а також гіпотези, що ця енергія розсіюється лише у зв'язку з пластичною деформацією, впливає кінетичне рівняння для накопичення деформацій. Деформаційне зміцнення твердої фази можна враховувати за допомогою рівняння (9):

$$w = \frac{\sqrt{Y^2\varphi + e^2\psi}}{\sqrt{1-\theta}} + \frac{p_0}{\tau_s} \cdot \frac{e}{1-\theta}. \quad (9)$$

Прийнята реологічна модель матеріалу дозволяє описувати деформування як порошкових, так і пористих заготовок. Вона враховує різний опір цих матеріалів при розтягуванні та при стисканні.

1.2. Співвідношення методу скінчених елементів

Розглянуто пластичну та пружно-пластичну поведінку матеріалу, що деформується.

Модель пластичного деформування. В основі чисельної реалізації задач моделювання процесів обробки металів тиском використовується один з найбільш відомих варіаційних принципів механіки - принцип віртуальних швидкостей. Відповідно до цього принципу, для будь-якого кінематично можливого поля швидкостей в довільний момент часу потужності внутрішніх і зовнішніх сил рівні (10).

$$\int_V \sigma_{ij} e_{ij} dV = \int_S p_i v_i dS. \quad (10)$$

Рівняння (10) називають рівнянням віртуальних потужностей. Воно означає рівність потужностей внутрішніх сил (напружень σ_{ij}) в об'ємі тіла V на довільному (віртуальному) полі швидкостей і потужності зовнішніх сил на тому ж полі швидкостей.

Виходячи з варіаційного принципу, дійсне поле швидкостей є результат знаходження екстремуму функціоналу, що має вигляд:

$$J = \int_V \sigma_{ij} e_{ij} dV - \int_S p_i v_i dS. \quad (11)$$

З урахуванням визначальних співвідношень пластичної течії порошкових і пористих тіл рівняння (11) прийме вигляд:

$$J = \int_V \tau_s \left(\frac{\sqrt{Y^2\varphi + e^2\psi}}{\sqrt{1-\theta}} + \frac{p_0}{\tau_s} \cdot \frac{e}{1-\theta} \right) dV - \int_S p_i \cdot v_i dS, \quad (12)$$

де p_i – навантаження, прикладені на поверхні тіла, що деформується,

V – об'єм тіла;

S – поверхня тіла.

v_i – швидкості переміщення точок тіла, що деформується під дією навантажень p_i .

Отримана в результаті знаходження екстремуму функціоналу (12) система диференціальних рівнянь замінюється дискретною скінчено-елементною моделлю, яка являє собою систему нелінійних алгебраїчних рівнянь:

$$[K] \cdot \{\dot{X}\} = \{P\} - \{P_0\}, \quad (13)$$

де $[K] = \sum_1^{N_e} \int_V [B]_{(e)}^T [D]_{(e)} [B]_{(e)} dV$ – глобальна матриця жорсткості системи;

N_e – кількість скінченних елементів;

V – об'єм елемента;

$\{\dot{X}\}$ – стовпець вузлових швидкостей;

$\{P\}$ – стовпець вузлових зусиль;

$\{P_0\} = [B]_{(e)}^T \{P_0\}_{(e)} dV$ – стовпець вузлових зусиль, відповідних величині

зміщення центру еліпсів, що апроксимують контур поверхні навантаження уздовж осі p ;

$[B]_{(e)}$ – матриця, що зв'язує швидкості пластичних деформацій в елементі зі швидкостями переміщень його вузлів;

$[D]_{(e)}$ – матриця, що зв'язує компоненти напружень в елементі зі швидкостями деформацій. Вона визначається на основі співвідношень (8).

Система рівнянь (13) є системою нелінійних алгебраїчних рівнянь відносно $\{\dot{X}\}$. В той же час глобальна матриця жорсткості $[K]$ залежить від координат вузлів $\{X\}$ скінчених елементів. Таким чином, дана система рівнянь являє собою також систему диференційних (за часом) рівнянь відносно $\{X\}$.

Система диференційних рівнянь вирішується методом кінцевих різниць. На часовому інтервалі $\Delta t = t_{m+1} - t_m$ координати вузлів скінченних елементів визначаються наступним чином:

$$\{X\}_{m+1} = \{X\}_m + \int_{t_m}^{t_{m+1}} \{ [K]^{-1} (\{P\} - \{P_0\}) \} dt. \quad (14)$$

При двошаровій апроксимації отримаємо:

$$\Delta \{X\}_{m+1} = (1 - \alpha) \cdot \Delta t \cdot [K]_m^{-1} (\{P\} - \{P_0\})_m + \alpha \cdot \Delta t \cdot [K]_m^{-1} (\{P\} - \{P_0\})_{m+1}, \quad (15)$$

де $0 \leq \alpha \leq 1$, при обчисленнях вважали $\alpha = 0,5$.

Модель пружно-пластичного деформування. При пружно-пластичній деформації порошкових і пористих матеріалів прирощення загальної деформації складається з суми пружних $d\xi_{ij}^e$ і пластичних $d\xi_{ij}^{pl}$ деформацій (16). Пружні деформації зворотні, а пластичні – незворотні.

$$d\xi_{ij} = d\xi_{ij}^e + d\xi_{ij}^{pl}. \quad (16)$$

Прирошення пружних деформацій визначаються згідно із законом Гука (17).

$$d\xi_{ij}^e = \frac{1+\nu}{E} \sigma_{ij} - \frac{\nu}{E} (\sigma_{kk}) \sigma_{ij}. \quad (17)$$

Прирошення пластичних деформацій визначаються відповідно асоційованого з поверхнею течії закону (течія відбувається в напрямку, що нормальний до цієї поверхні):

$$d\xi_{ij}^{pl} = \lambda \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}}; \quad \lambda > 0. \quad (18)$$

Відповідно, збільшення об'ємної деформації і деформації зсуву визначається виразами (19) та (20).

$$de^{pl} = \lambda \frac{\partial F}{\partial p} = \frac{2(p-p_0)}{\psi}, \quad (19)$$

$$d\gamma^{pl} = \lambda \frac{\partial F}{\partial \tau} = \frac{2\tau}{\varphi}. \quad (20)$$

Варіаційний функціонал і система рівнянь методу скінченних елементів для моделі пружно-пластичного деформування приймають вигляд (21) і (22):

$$J = \int_V \tau_s \left(\frac{\sqrt{Y^2 \varphi + e^2 \psi}}{\sqrt{1-\theta}} + \frac{\dot{p}_0}{\tau_s} \cdot \frac{e}{1-\theta} \right) dV - \int_S \dot{p}_i \cdot v_i dS, \quad (21)$$

$$[K] \cdot \{\dot{X}\} = \{\dot{P}\} - \{\dot{P}_0\} \quad (22)$$

3. Алгоритмічна модель

Рішення задач пластичного деформування порошкових і пористих матеріалів виконувалося поетапно, методом послідовних навантажень. В якості першого наближення на кожному кроці використовувалося рішення задачі лінійно-в'язкої течії матеріалу, яке потім уточнювалося ітераційним методом. Ітераційний процес припинявся після того, як різниця між знайденими значеннями вузлових швидкостей ставала, в порівнянні з попередніми, меншою, ніж наперед задане мале число. Визначивши поле швидкостей, знаходили значення пористості, величини компонент напружено-деформованого стану та переходили на наступний етап навантаження. Схема алгоритмічної моделі пластичного деформування порошкових та пористих матеріалів наведена на рисунку 2.

Для процесу пружно-пластичного деформування моделювання виконувалося методом послідовних навантажень. На кожному кроці навантаження визначалися напруги, причому вважали, що матеріал є

пружним. Потім обчислювали пластичний потенціал $F(\sigma_{ij})$ і, в залежності від його величини, проводили коригування напружень і матеріальних параметрів моделі. Алгоритмічна модель має вигляд:

1. Введення прирощення деформацій та поточних значень матеріальних параметрів моделі:

$$d\xi_{ij}^{n+1}, \sigma_{ij}^n, \theta^n, \omega^n.$$

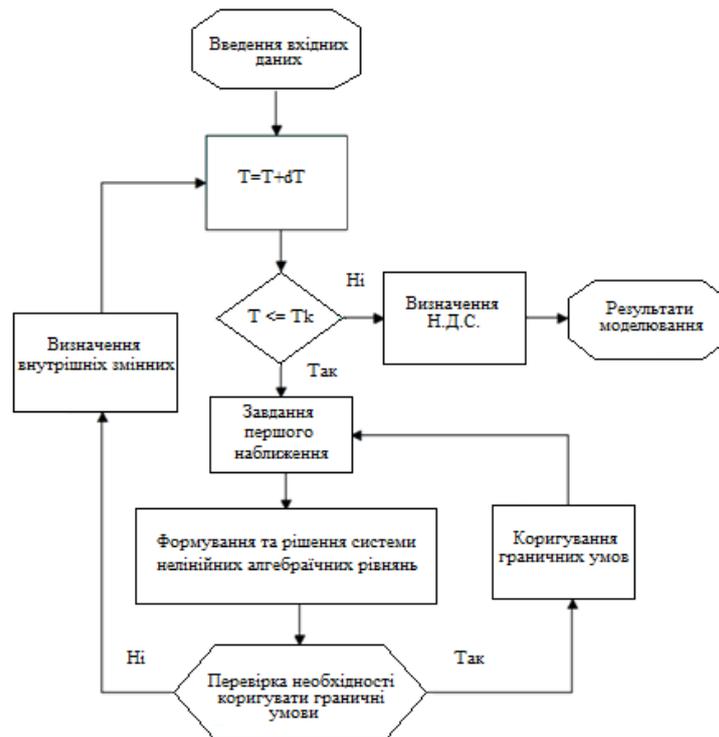


Рисунок 2 – Схема алгоритмічної моделі пластичного деформування

2. Визначення наближених значень прирощень напружень:

$$d\sigma_{ij}^* = E_{ij}^e d\xi_{ij}^{n+1}.$$

3. Визначення наближених напружень:

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^n + d\sigma_{ij}^*.$$

Обчислюємо пластичний потенціал $F(\sigma_{ij})$. Якщо $F(\sigma_{ij}) \leq 0$, коригування напружень і матеріальних параметрів не здійснюється.

$$\sigma_{ij}^{n+1} = \sigma_{ij}, \theta^{n+1} = \theta^n, \omega^{n+1} = \omega^n.$$

4. Якщо $F(\sigma_{ij}) > 0$, коригування напружень і матеріальних параметрів здійснюється:

– коригуємо збільшення пружних деформацій:

$$de^e = de^{n+1} - de^{pl} = de^{n+1} - \lambda \frac{\partial F}{\partial p},$$

$$d\gamma^e = d\gamma^{n+1} - d\gamma^{pl} = d\gamma^{n+1} - \lambda \frac{\partial F}{\partial T},$$

в результаті ітераційного рішення нелінійного рівняння $F(\sigma_{ij}(\lambda)) = 0$ визначаємо параметр λ ;

– обчислюємо:

$$\sigma_{ij}^{n+1}, \theta^{n+1}, \omega^{n+1}.$$

4. Цифрова модель

Алгоритмічні моделі були реалізовані у вигляді відповідних цифрових моделей. Схема цифрової моделі пластичного деформування наведена на рисунку 3.

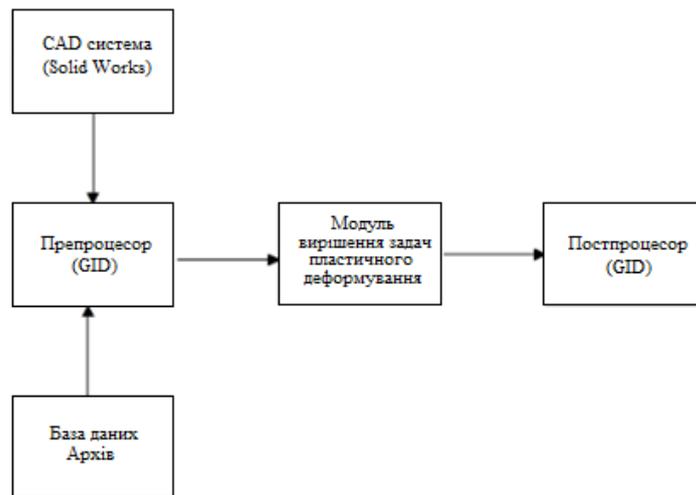


Рисунок 3 – Схема цифрової моделі пластичного деформування

Цифрова модель має наступні основні блоки: препроцесор, модуль моделювання та постпроцесор. Передбачена можливість введення геометричних моделей з CAD-систем та робота з базою даних. В якості пре- і постпроцесора використовується програмний пакет GID [12].

Модуль вирішення задач пластичного деформування реалізований на алгоритмічній мові програмування С. При проведенні обчислювальних експериментів геометричну модель створювали в програмі SolidWorks [13].

Цифрова модель пружно-пластичного деформування була реалізована у вигляді підпрограм VUMAT і UMAT, які були імplementовані відповідно в програмні системи ABAQUS [14] та LS-DYNA [15].

VUMAT – це призначена для користувача підпрограма в ABAQUS/Explicit, яка написана на мові програмування FORTRAN. Вона використовується для нових моделей матеріалів, які задає користувач. Користувач може задавати внутрішні змінні стану, які оновлюються разом з рішенням на кожному кроці.

Для кожного кроку навантаження ABAQUS інтегрує рівняння рівноваги на основі напруженого стану на початку кроку в кожній точці інтегрування і передає тензор градієнта деформації, тензор напружень і внутрішні змінні в підпрограму VUMAT. Підпрограма VUMAT обчислює компоненти напружень і внутрішні змінні, що задаються користувачем, в кінці заданого прирощення деформації для кожної точки інтеграції та передає їх в ABAQUS. Використовуючи цю інформацію, ABAQUS може продовжити обчислення для наступного кроку навантаження.

Підпрограма UMAT також написана на мові програмування FORTRAN. Її призначення і взаємодія з програмною системою LS-DYNA аналогічні.

Схема, що показує взаємодію між підпрограмами VUMAT і UMAT та програмними системами ABAQUS та LS-DYNA, наведена на рисунку 4.

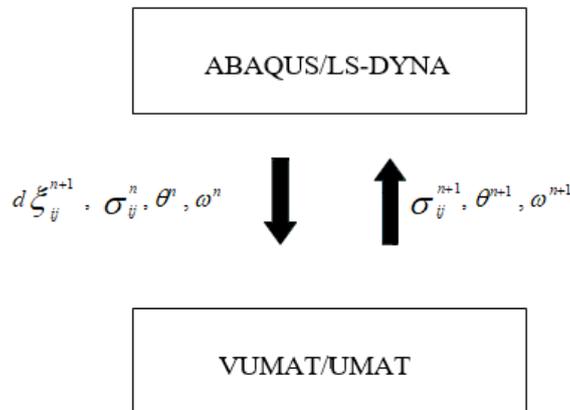


Рисунок 4 – Схема взаємодії між підпрограмами VUMAT і UMAT та програмними системами ABAQUS та LS-DYNA

5. Аналіз адекватності методики моделювання

Проведено перевірку адекватності запропонованої методики моделювання на основі порівняння отриманих результатів з експериментальними даними та результатами моделювання інших авторів.

В роботі [16] наведені експериментальні дані щодо розподілу щільності при пресуванні порошків нержавіючої сталі, проведено моделювання цих процесів методом скінчених елементів. Необхідні дані для обчислювального експерименту були взяті з цієї роботи.

Результати обчислень наведені на рисунку 5. При двосторонньому пресуванні максимальне ущільнення порошку відбувається у верхній і нижній частинах виробу. У той же час в середній частині пресовки величина відносної щільності нижче. Нерівномірність розподілу залишкової пористості обумовлена впливом зовнішнього тертя. Доцільно відзначити, що при двосторонньому пресуванні величина пористості розподілена більш рівномірно, ніж за одностороннього пресування. Результати обчислювального експерименту відповідають даним, що отримані в роботі [16].

Також досліджували процес вільної осадки пористих циліндричних заготовок. Відношення початкової висоти заготовки до її діаметру

дорівнювало одиниці. Величина початкової пористості по всьому об'єму заготовки була однаковою і дорівнювала 0,2.

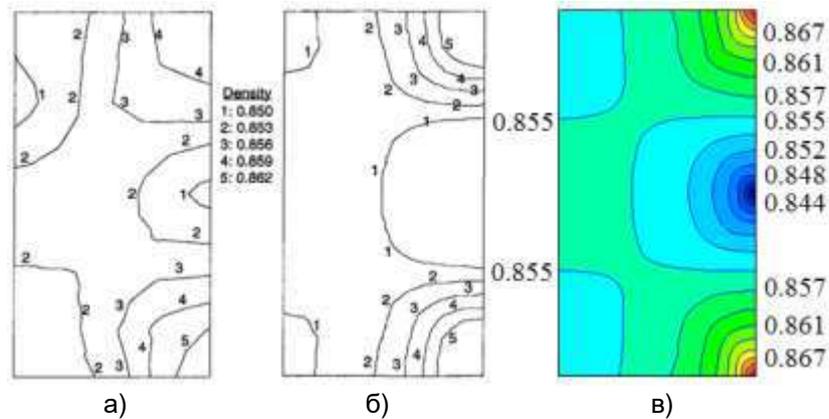


Рисунок 5 – Розподіл відносної щільності при двосторонньому пресуванні: експериментальні дані (а) і результати моделювання (б) [16] та результати обчислювального експерименту (в)

На рисунку 6, а наведені дані щодо розподілу відносної щільності по осьовому перерізу заготовки. Результати моделювання свідчать, що розподіл пористості нерівномірний (на рисунку показана чверть осьового перерізу заготовки). Максимальне ущільнення відбувається в центральній зоні заготовки та у її торців близько бічної поверхні. В області опуклості бічної поверхні пористість максимальна. У торців заготовки в безпосередній близькості від осі симетрії знаходиться зона утрудненої деформації. У цій зоні також пористість максимальна.

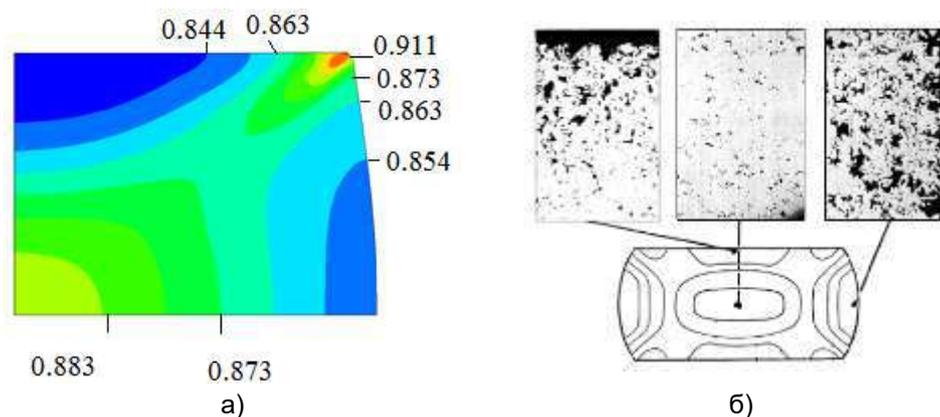


Рисунок 6 – Розподіл відносної щільності (а) та мікроструктура в перерізі заготовки [17] (б)

В роботі [17] були проведені металографічні дослідження поверхні осьових перерізів деформованих заготовок (рис.6, б). Вивчалися форма та розміри пор. У центральній області виробу відбулося максимальне ущільнення

матеріалу. У той же час в зонах утрудненої деформації величина залишкової пористості вище. Можна також відзначити підвищення пористості в області опуклості бічної поверхні заготовки. Таким чином результати моделювання відповідають наведеним експериментальним даним.

6. Закономірності деформування пористої заготовки при радіальному ущільненні

Досліджені закономірності деформування пористих заготовок при радіальному ущільненні [18]. Схема процесу наведена на рисунку 7. Ущільнення заготовки здійснюється за рахунок її обтиснення по внутрішній поверхні.

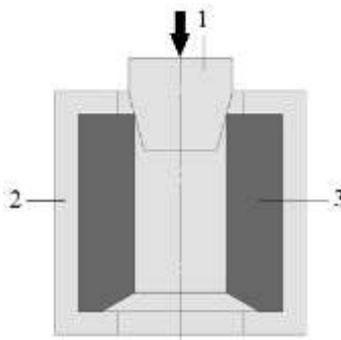


Рисунок 7 – Розрахункова схема радіального ущільнення
1 – пуансон; 2 – матриця; 3 – заготовка

Початкова пористість заготовки була 0,15. Її зовнішній діаметр дорівнював 120 мм, внутрішній 72 мм. Висота заготовки була 85 мм. Деформування заготовки проводилося за два проходи. На рисунку 8 та 9 наведені результати моделювання.

Ущільнення матеріалу відбувається локально (рис. 8). Спочатку ущільнюється верхня частина заготовки. Далі, відповідно до зміщення пуансона, зона ущільнення переміщується вниз. В кінці першого проходу весь матеріал в області внутрішньої поверхні заготовки ущільнився. Максимальне ущільнення матеріалу відбулося в центрі, а в меншій мірі у торців заготовки.

Зі збільшенням радіусу величина пористості зростає і приймає максимальне значення у зовнішній поверхні заготовки. За рахунок течії матеріалу в вертикальному напрямку в нижній частині заготовки, у її внутрішній поверхні, утворюється заусенець.

Діаметр пуансона після першого проходу збільшували. При другому проході область ущільненого матеріалу збільшується і поширюється у напрямку до зовнішньої поверхні заготовки.

Однак, у зовнішній поверхні заготовки, особливо у її торців, матеріал заготовки ущільнюється незначно. Величина заусенця в нижній частині виробу збільшилася. Частково його утворення компенсувала початкова форма заготовки за рахунок наявності виїмки в нижній її частині. Невеликий заусенець утворився і в області верхнього торця виробу.

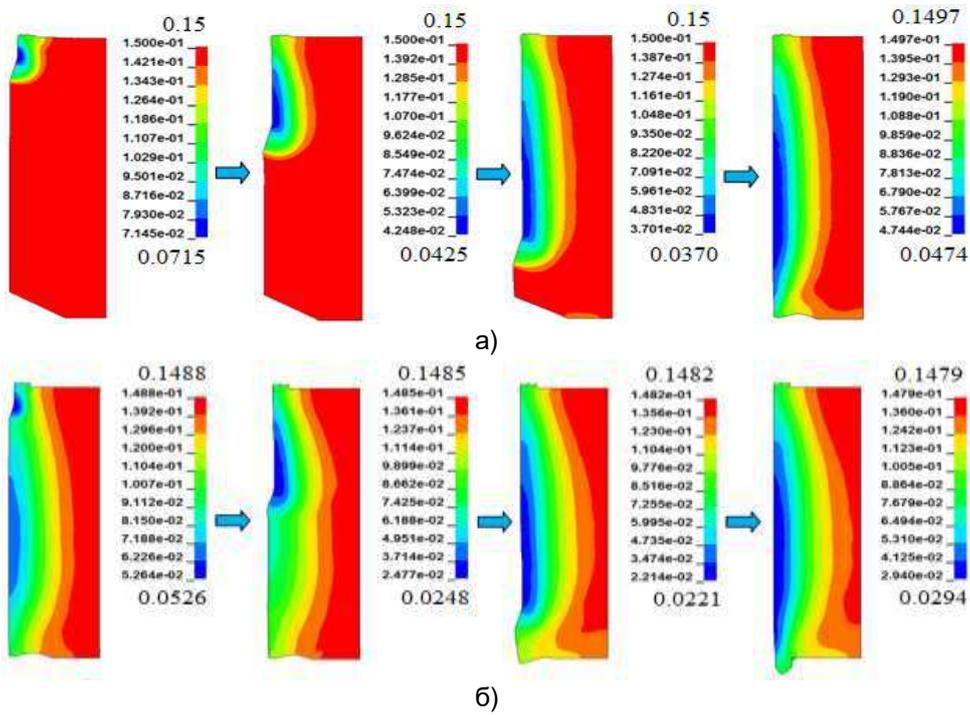


Рисунок 8 – Аналіз еволюції полів пористості при першому (а) і другому (б) проходах

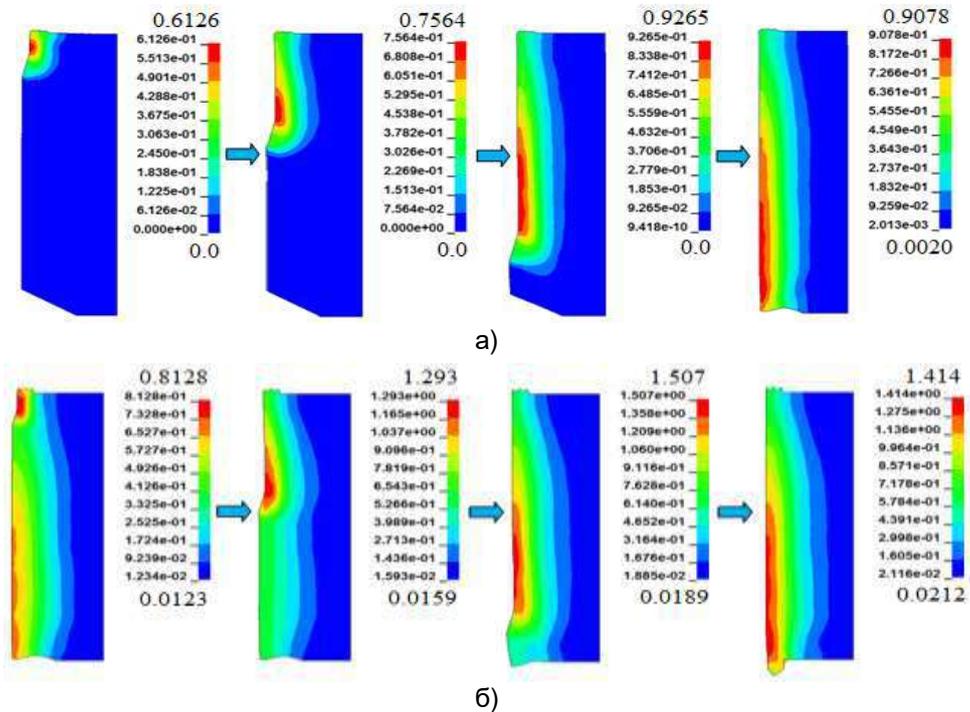


Рисунок 9 – Аналіз еволюції полів величини накопиченої пластичної деформації при першому (а) і другому (б) проходах

Еволюція величини накопиченої пластичної деформації аналогічна зміні величини відносної щільності (рис. 9). Максимальна накопичена деформація у внутрішній поверхні заготовки, а мінімальна величина у її зовнішній поверхні.

ВИСНОВКИ

Розроблено математичну модель процесів деформування порошкових та пористих матеріалів, що включає як структурні складові аналітичну, алгоритмічну та цифрову моделі. Співвідношення теорії пластичності, що використовуються, дозволяють описувати деформування як порошкових, так і пористих заготовок. Розглянуто пластичну та пружно-пластичну поведінку матеріалу, що деформується. Результати обчислювального експерименту відповідають даним, які були отримані іншими авторами.

Досліджені закономірності деформування пористих заготовок при радіальному ущільненні по внутрішньому діаметру. Встановлено, що деформація матеріалу відбувається локально. Зі збільшенням радіуса величина пористості по перерізу виробу зростає. Збільшення кількості обтискань дозволяє зменшити нерівномірність розподілу залишкової пористості та її величину. Проте нерівномірність розподілу по радіусу залишається.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] He Y., Wang Z., Evans T.J., Yu A.B., Yang R.Y. DEM study of the mechanical strength of iron ore compacts. *Int. J. Miner. Process.* 2015. Vol. 142. P. 73–81.
- [2] Martin C. L., Bouvard D. and Shima S. Study of particle rearrangement during powder compaction by the discrete element method. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids.* 2003. Vol. 51, Issue 4. P. 667-693.
- [3] Martin C. L., Bouvard D., Delette G. Discrete element simulations of the compaction of aggregated ceramic powders. *Journal of the American Ceramic Society.* 2006. Vol. 89, Num. 11, P. 3379-3387.
- [4] Феноменологические теории прессования порошков / М. Б. Штерн, Г. Г. Сердюк, Л. А. Максименко и др. Киев: Наукова думка, 1982. 140 с.
- [5] Roscoe K.H., Schofield A.N., Wroth C.P. On the yielding of soils. *Géotechnique.* 1958. Vol. 8, Issue 1. P. 22–53.
- [6] Drucker D. C., Prager W. Soil mechanics and plastic analysis or limit design. *Q. Appl. Math.* 1952. Vol. 10. P. 157–165.
- [7] DiMaggio F.L., Sandler I.S. Material model for granular soils. *J. Eng. Mech. Div., ASCE,* 1971. Vol. 97, Issue 3. P. 935–950.
- [8] Грин Р. Дж. Теория пластичности пористых тел. *Механика,* 1973. № 4. С. 109 - 120.
- [9] Мартынова И. Ф., Штерн М. Б. Уравнение пластичности пористых тел, учитывающие истинные деформации металла основы. *Порошковая металлургия.* 1978. № 1. С. 23-29.
- [10] Shima S., Oyane M. Plasticity theory for porous metals. *Jut. Y. Mech. Sciences.* 1976. V. 18. Vol. 6. P. 285-291.
- [11] М. В. Штерн, О. В. Михайлов, А. О. Михайлов, Theory and technology of forming process generalized continuum model of plasticity of powder and

- porous materials, Powder Metallurgy and Metal Ceramics, Vol. 60, Nos. 1-2, May, 2021 (Russian Original Vol. 60, Nos. 1-2, Jan.-Feb., 2021. – pp. 27-44). - pp.20-36 DOI: 10.1007/s11106-021-00211-7
- [12] GID. The personal pre and post processor developed by the International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE, Barcelona, Spain). URL: <https://www.gidsimulation.com/> (дата звернення 01.07.2024).
- [13] SolidWorks. (Dassault Systèmes, France). URL: <https://www.3ds.com/products-services/solidworks/> (дата звернення 01.07.2024).
- [14] Abaqus. Unified FEA. (Dassault Systèmes, France). URL: <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/abaqus/> (дата звернення 01.07.2024).
- [15] LS-DYNA. (LST, USA). URL: <https://www.lstc.com/> (дата звернення 28.06.2024).
- [16] Kwon Y. S., Lee H. T., Kim K. T. Analysis for Cold Die Compaction of Stainless-Steel Powder. Journal of Engineering Materials and Technology, 1997. Vol. 119, Issue 4. P. 366 - 373.
- [17] Fischmeister H. F., Arén B., Easterling K. E. Deformation and densification of porous preforms in hot forging. Powder metallurgy. 1971. Vol. 14, Issue 27. P. 144-163.
- [18] Михайлов А.О., Штефан Є.В., Михайлов О.В. Моделювання процесів виготовлення тонкостінних втулок з поруватих заготовок з використанням прямого видавлювання та радіального ущільнення. Успіхи матеріалознавства. Київ: ІПМ ім. І. М. Францевича НАН України, 2023. № 7. С.19 - 26. DOI: 10.15407/materials2023.07.002

SIMULATION OF PRODUCT MOLDING PROCESSES FROM POWDER AND POROUS MATERIALS

¹*Mikhailov, A. PhD, Junior Researcher.*

²*Shtefan, Ye. DThSc., Full Prof.*

¹*Mikhailov, O. DThSc., Leading Researcher.*

^{1,2}*Shtern, M. DThSc., Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine*

¹*Institut for Problems of Material Sciences National Academy of Sciences of Ukraine / Ukraine*

²*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" / Ukraine*

Abstract. A mathematical model of the formation processes of structurally inhomogeneous porous materials has been developed. The model includes analytical, algorithmic and digital models. The relations of the theory of plasticity of a porous body are used. The theory of plasticity equations are allow to describe the deformation of both powder and porous blanks. Modeling was performed using the finite element method. Two cases of behaviour were considered: the plastic and

elasto-plastic ones. Deformation problems were solved step by step, using the sequential loading method. At each of the stages, the necessary parameters of the model were determined as a result of the iterative procedures. Algorithmic models were implemented in the form of corresponding digital models. In turn The digital model of plastic deformation has the following main blocks: a preprocessor, simulation module, and postprocessor. It is possible to use existing geometric modeling programs, as well as pre- and post-processing data processing programs. The digital model of elastic-plastic deformation was implemented in the form of subroutines, which were implemented in the finite element modeling software systems. To check the adequacy of the developed digital models, the obtained results were compared with experimental data and simulation results obtained by other authors. Double side pressing as well as the free uniaxial straining have been examined in our model to compare it with same pressing paths, obtained by another authors. The patterns of deformation of porous blanks during radial compaction along the inner diameter were studied. Deformation was carried out in two passes. It was established that the deformation of the material occurs locally. The influence of the number of passes on the evolution of the parameters that determine the properties of the products is shown.

Keywords: resource-saving technologies, powder metallurgy, dispersed systems, powder materials, porous blanks, plasticity, pressure treatment, modelling, finite element method.

Дата першого надходження
статті до видання
29.09.2025 р.

Дата прийняття статті до друку
статті після рецензування
14.10.2025 р.

Дата
оприлюднення
23.12.2025 р.

DOI: <https://doi.org/10.36910/4293-52779-2025-17-02-06>
УДК 681.5:66.063.8

Маркіна Л.М.
старший викладач
ORCID: 0000-0003-0735-0743

Луцький національний
технічний університет / Україна

Сацик В.О.
канд. с.-г. наук, доцент
ORCID: 0000-0002-7132-3363

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ВИРОБНИЦТВА ЕТАНОЛУ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ПІДХОДУ У ПРОСТОРІ СТАНІВ

***Анотація:** у даній роботі розглянуто процес приготування замісу, який може бути використаний для оптимізації виробництва харчового та паливного етанолу. Розроблено автоматичну систему оптимального керування процесом підготовки суміші, що базується на вимірюванні витрат сировини та концентрації суміші, а також регулюванні подачі води. Запропонований контролер забезпечує підтримання необхідного рівня суміші шляхом зміни витрати потоків. Змінюючи витрати компонентів, оптимальний контролер підтримує сталу концентрацію суміші та стабілізує потоки. Розроблений удосконалений оптимальний контролер базується на робастному керуванні нелінійним процесом, що забезпечує більш стабільну роботу системи, підвищення якості замісу та кінцевого етанольного продукту, плавні переходи між режимами та економію енергетичних витрат.*

***Ключові слова:** оптимальне керування, динамічне моделювання, виробництво етанолу, система у просторі станів.*

ВСТУП, ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Сучасна промисловість характеризується високим енергетичним попитом, що зумовлений значним споживанням енергії та палива в технологічних процесах. Особливо це проявляється у виробництві етанолу, яке традиційно є матеріало- та енергоємним, потребує переробки великих обсягів рослинної сировини та супроводжується суттєвими енерговитратами на реалізацію технологічних операцій. Висока собівартість продукції, складність утилізації відходів та значні інвестиції у виробничі потужності знижують рентабельність галузі та стримують її розвиток.

Зростаючий інтерес до етанолу як альтернативного паливного ресурсу обумовлений необхідністю зменшення залежності від викопних енергоносіїв, зниження рівня атмосферного забруднення та протидії глобальному потеплінню. Біоетанол розглядається як перспективний компонент автомобільного палива завдяки відновлюваній сировинній базі, високому октановому числу та можливості комбінованого використання з традиційними

видами пального. Однак економічна доцільність його виробництва значною мірою визначається ефективністю технологічних процесів, що особливо актуально для підприємств малої та середньої потужності. Попри нижчі капітальні витрати та швидшу окупність, такі підприємства часто виявляються неконкурентоспроможними через високі матеріальні та енергетичні витрати на одиницю продукції.

Одним із ключових етапів виробництва етанолу є процес приготування замісу, який формує якісні характеристики напівпродукту та впливає на ефективність подальших стадій гідролізу та зброджування. Параметри зерново-водної суміші під час водно-теплової обробки зазнають значних структурних змін під впливом температури, мікробіологічних і термохімічних процесів, що ускладнює підтримання стабільних технологічних режимів. Традиційні системи автоматичного керування, засновані на регулюванні подачі води та контролі витрат сировини, не забезпечують необхідної точності підтримання концентрації замісу, не компенсують динамічні зміни процесу та не гарантують оптимального енергоспоживання.

Відсутність ефективного оперативного контролю показників якості замісу часто призводить до порушення регламентів, погіршення характеристик подальших стадій виробництва та зростання витрат енергоресурсів і ферментних препаратів. Традиційні методи визначення концентрації розчинених речовин є трудомісткими та непридатними для використання у реальному часі, що обумовлює необхідність пошуку інформативних технологічних параметрів, придатних для автоматизованих систем керування.

Таким чином, постає завдання розроблення ефективної системи автоматичного керування процесом приготування замісу, яка б забезпечувала стабілізацію технологічного процесу в умовах збурень, підтримання необхідної концентрації замісу, зниження енергоспоживання та підвищення економічної ефективності виробництва. Вирішення зазначеної проблеми можливе шляхом застосування математичного моделювання та побудови динамічної моделі у просторі станів, що дозволяє враховувати нелінійність процесу та забезпечує прогнозовану реакцію системи на збурення.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Проблематика підвищення ефективності виробництва етанолу та розширення сфер його застосування як альтернативного палива відображена у значній кількості зарубіжних досліджень. У роботах [1-5, 8, 11-14] розглядаються екологічні та економічні переваги використання біоетанолу, зокрема його роль у зниженні викидів парникових газів, зменшенні залежності від викопних енергоносіїв та підвищенні енергетичної безпеки. Окрему увагу приділено аналізу структури паливних сумішей, впливу біоетанолу на роботу двигунів внутрішнього згоряння та оцінці потенціалу біопалива у глобальному енергетичному балансі. Водночас, як зазначено в [2], [3], інформація щодо матеріальних балансів і досягнутих виходів продукції подається переважно без детального розгляду енергоефективності та динамічних властивостей технологічних процесів.

Значний науковий інтерес спрямований на дослідження альтернативної

сировини для виробництва етанолу. У роботах [4], [5] розглядається можливість отримання біопалива з деревини, а в [6], [7] – процеси переробки деревної біомаси з використанням внутрішніх рециркуляцій, що сприяє зниженню енергетичних витрат технологічних схем. Такі підходи демонструють ефективність оптимізації потоків речовини та енергії, а також удосконалення систем рекуперації, проте здебільшого базуються на статичних або квазістаціонарних режимах без урахування динаміки керування технологічними процесами.

Окремий напрямок досліджень пов'язаний із застосуванням методів оптимального та робастного керування в задачах моделювання технологічних систем. У працях [9], [10] представлено методологію побудови моделей у просторі станів та синтезу оптимальних регуляторів, що враховують динамічні властивості об'єкта керування та забезпечують задані показники якості перехідних процесів. Роботи [13], [14] підтверджують ефективність таких підходів при керуванні складними технологічними об'єктами, однак їх результати практично не застосовуються до стадії приготування замісу у виробництві етанолу.

Проведений аналіз свідчить, що, попри значну кількість досліджень, присвячених екологічним аспектам використання біоетанолу, альтернативній сировині та енергоефективності виробництва, питання розроблення динамічних моделей і оптимальних робастних стратегій керування саме процесом приготування замісу, як ключовим етапом зернового етанольного виробництва, залишаються недостатньо опрацьованими.

Аналіз технологічного процесу приготування замісу показав, що густина та в'язкість є параметрами, тісно пов'язаними з концентрацією крохмалю під час термічної обробки, та можуть використовуватися як інформативні показники якості замісу. Експериментальні дані підтверджують залежність між зазначеними параметрами, що відкриває можливість побудови автоматизованої системи контролю на їх основі.

Недостатній рівень автоматизації процесу, значні коливання технологічних параметрів та вплив збурень зумовлюють необхідність удосконалення систем керування початковими стадіями виробництва спирту. Для підвищення ефективності виробництва доцільним є створення комплексної автоматизованої системи керування, здатної забезпечити стабільність параметрів замісу, зниження енергоспоживання та покращення якості кінцевого продукту.

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Метою статті є підвищення ефективності процесу приготування замісу у виробництві етилового спирту шляхом створення динамічної моделі процесу та формування принципів побудови автоматизованої системи керування. Особлива увага приділена моделюванню взаємодії технологічних параметрів у нестационарних умовах, що дозволяє врахувати нелінійну динаміку процесу та вплив збурень.

У статті пропонується розробити математичне представлення процесу у просторі станів, яке забезпечить прогнозування поведінки об'єкта керування

та синтез оптимальних алгоритмів регулювання. Запропонований підхід спрямований на стабілізацію технологічного режиму, зниження енергетичних витрат та забезпечення необхідних показників якості напівпродукту.

Досягнення поставленої мети створює підґрунтя для впровадження високоєфективних автоматизованих систем керування початковими стадіями виробництва етанолу та підвищення конкурентоспроможності підприємств спиртової галузі.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ДОСЛІДЖЕННЯ

Процес приготування замісу є початковою та однією з визначальних стадій зернового виробництва етилового спирту, оскільки саме на цьому етапі формується вихідна структура та концентраційний склад суміші, що впливають на ефективність подальшого гідролізу та зброджування. Процес змішування зерна з водою та ферментами визначає концентрацію крохмалю в суслі, яка є ключовим показником якості подальших технологічних перетворень та виходу готового продукту [18].

Основним завданням системи керування на даному етапі є підтримання необхідного співвідношення вхідних компонентів та стабільності технологічних параметрів, зокрема витрати зерна, ферменту, води та температури. Традиційні системи автоматичного керування передбачають регулювання витрат зернової суміші та води з використанням трьох контурів керування: витрати зерна, рідкої фази та концентрації замісу. Такі схеми забезпечують базовий контроль, однак залишаються чутливими до змін властивостей сировини та нестабільності вхідних потоків, що призводить до коливань вихідних параметрів.

Сучасні підходи до керування пропонують удосконалення шляхом розрахункового визначення концентрації та застосування нелінійних законів регулювання подачі води, що підвищує точність підтримання параметрів процесу. Водночас ключовою проблемою більшості існуючих систем залишається відсутність контролю за в'язкістю замісу, яка зростає зі збільшенням концентрації сухих речовин. Це ускладнює транспортування суміші, знижує ефективність гідролізу та негативно впливає на вихід спирту, а також обмежує можливість застосування енергозберігаючих режимів роботи.

Таким чином, актуальним є впровадження систем керування, заснованих на динамічних моделях процесу, які описують зміну об'єму та концентрації в часі, враховують нелінійність і вплив збурень. Використання PID-регуляторів та оптимального LQR-регулювання відкриває можливості для підвищення стабільності технологічного процесу, енергоефективності та покращення якості замісу і кінцевого етанольного продукту.

Для розробки системи автоматичного керування процесом приготування замісу взято за основу загальну модель змішування двох потоків зі сталими концентраціями у резервуарі з перемішуванням. Така модель широко використовується для опису масообмінних процесів у хімічній та харчовій промисловості, однак у даній роботі вона адаптована до особливостей спиртового виробництва, де на перебіг процесу суттєво впливають ферментативні реакції, зміна реологічних властивостей сировини (ступінь

подрібнення, вид зерна та вологість) та коливання концентрації сухих речовин.

Для досягнення поставленої мети було сформовано узагальнену математичну модель процесу приготування замісу із зернової сировини та його водно-теплової обробки, що розглядається як комплексний масообмінний процес змішування з тепловим впливом. Цей етап виробництва є критичним, оскільки саме в процесі змішування формується початкова концентрація крохмалю в суслі, рівномірність розподілу ферментів та реологічні властивості середовища, які визначають ефективність ферментативної деструкції та подальшого спиртового бродіння. Виробничі спостереження на спиртових заводах України показали, що нестабільність параметрів замісу призводить до зниження виходу етанолу, збільшення енерговитрат та появи залишкових запасів сусла у технологічній системі.

Технологічний об'єкт являє собою змішувач безперервної дії, у який подаються два основні потоки: вода з ферментним препаратом та подрібнена зернова маса. Вміст змішувача інтенсивно перемішується, що забезпечує однорідність суміші та дає можливість застосувати припущення про рівність концентрації вихідного потоку концентрації суміші в ємності. Такий підхід широко використовується у хімічній і харчовій промисловості під час моделювання безперервних реакторів та змішувальних апаратів, що дозволяє адекватно описати зміну концентрації розчинених компонентів у часі.

Динаміка зміни об'єму замісу визначається рівнянням матеріального балансу, формула 1, 2 [15,18]:

$$\frac{dV(t)}{dt} = F_1(t) + F_2(t) - F(t), \quad (1)$$

де $F_1(t)$ – витрата води з ферментом,

$F_2(t)$ – витрата зернової маси,

$F(t)$ – загальна витрата готового.

Матеріальний баланс концентрації описується співвідношенням:

$$\frac{d}{dt} [c(t)V(t)] = c_1 F_1(t) + c_2 F_2(t) - c(t)F(t), \quad (2)$$

де c_1 і c_2 – концентрації сухих речовин у вхідних потоках,

$c(t)$ – концентрація крохмалю в замісі.

У стаціонарному режимі система задовольняє співвідношенням, формула 3, 4:

$$0 = F_{10} + F_{20} - F_0, \quad (3)$$

$$0 = c_1 F_{10} + c_2 F_{20} - c_0 F_0, \quad (4)$$

що дозволяє визначити рівноважні значення параметрів та встановити робочу точку технологічного процесу. На основі виробничих даних спиртових заводів було встановлено, що саме коливання витрат F_1 та F_2 , а також зміна концентрації в зерновій масі є основними причинами нестабільності процесу.

Для подальшого аналізу виконано лінеаризацію моделі відносно стаціонарної точки, що дало змогу перейти до опису у просторі станів, формула 5:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), \quad (5)$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2\theta} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{\theta} \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ \frac{c_1 - c_0}{V_0} & \frac{c_2 - c_0}{V_0} \end{bmatrix}; \quad x(t) = \begin{bmatrix} \xi_1(t) \\ \xi_2(t) \end{bmatrix}; \quad u(t) = \begin{bmatrix} \mu_1(t) \\ \mu_2(t) \end{bmatrix}.$$

Змінні стану ξ_1 і ξ_2 описують відповідно відхилення об'єму та концентрації замісу, а керуючі дії μ_1 і μ_2 визначаються зміною витрат вхідних потоків. Аналіз характеристик отриманої моделі показав, що система є асимптотично стійкою, а перехідні процеси мають експоненційний характер, що підтверджує можливість застосування оптимальних методів керування на її основі.

Подальший аналіз отриманої моделі показав, що динаміка процесу приготування замісу є чутливою до зміни витрат вхідних потоків, що зумовлює необхідність побудови системи автоматичного регулювання, здатної забезпечити стабільність параметрів у широкому діапазоні режимів роботи. Традиційні системи керування, застосовувані на спиртових заводах, переважно реалізують регулювання витрати води за сигналом концентрації суміші, що забезпечує базовий рівень стабільності, проте не враховує взаємозв'язки між каналами керування та їх вплив на динаміку процесу. У результаті в реальних умовах спостерігаються значні перерегулювання, коливання концентрації та об'єму, а також підвищені енерговитрати через надмірне використання сировини.

Для дослідження динаміки системи управління було розглянуто використання класичного регулятора ПІД-регулятора, що є найпоширенішим типом регуляторів теорії автоматичного керування і у промислових системах завдяки простоті налаштування та реалізації. Моделювання системи із застосуванням ПІД-регуляторів виконано в середовищі MATLAB/Simulink з використанням структурної схеми, що передбачає регулювання об'єму та концентрації замісу окремими каналами.

Для перевірки ефективності системи автоматичного керування було проведено моделювання на основі реальних виробничих даних спиртових заводів. На основі отриманих параметрів сформовано математичну модель процесу змішування для різних об'ємів замісу (1; 1,3 м³) та концентрацій розчиненого крохмалю (1,04; 1,09 г/см³), рисунок 1

Для налаштування регуляторів розглянуто кілька класичних підходів теорії автоматичного керування та отримано відповідні перехідні характеристики, що подані на рисунку 2.

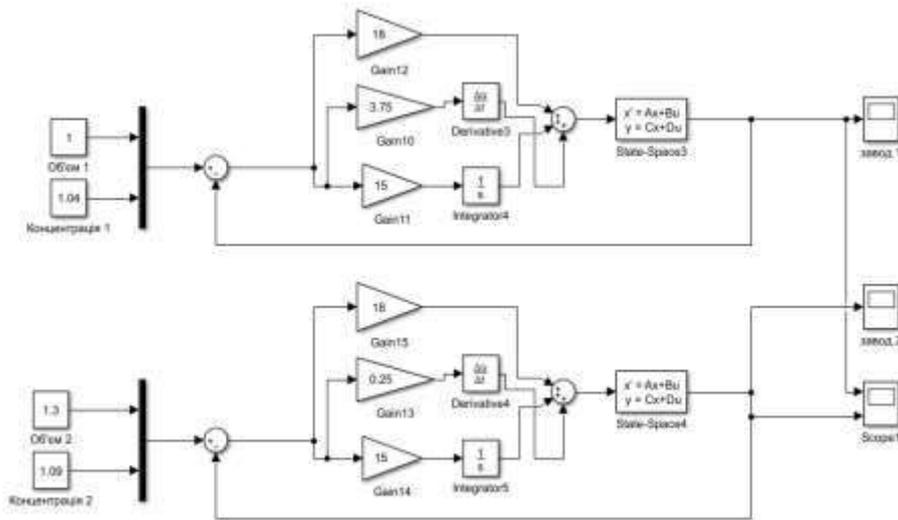


Рисунок 1 – Модель реалізації системи керування з ПІД-регуляторами

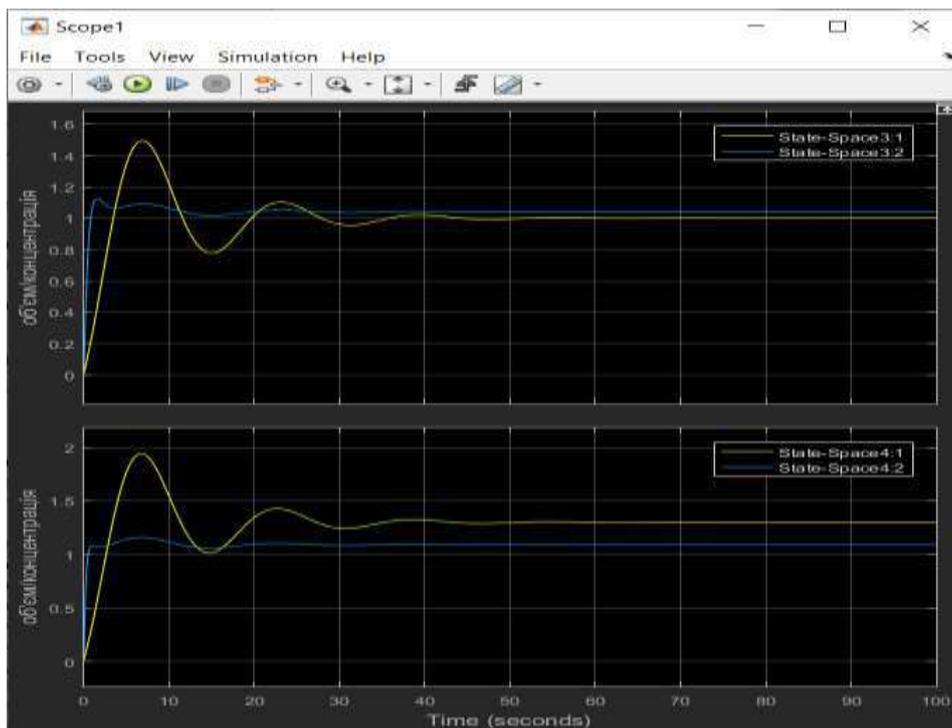


Рисунок 2 – Перехідні характеристики налаштувань ПІД-регулятора

Аналіз результатів моделювання та експериментів засвідчив, що використання ПІД-регуляторів у багатоканальній системі зі взаємопов'язаними контурами призводить до значних перерегулювань (до 15-20 %), збільшення часу встановлення та нестійкої роботи контуру керування. Взаємний вплив витрат води та зернової маси формує неузгоджені керуючі дії, унаслідок чого спостерігаються коливання концентрації та об'єму навіть за незначних

збурень вхідних потоків. Це негативно позначається на перебігу ферментативної обробки, ускладнює транспортування замісу та підвищує ризик мікробного забруднення, що підтверджено виробничими спостереженнями.

Отже, застосування класичних ПІД-регуляторів не забезпечує необхідного рівня якості регулювання та енергоефективності процесу приготування замісу, що обумовлює потребу у впровадженні більш ефективних методів керування. У зв'язку з цим запропоновано використання оптимального LQR-регулятора, який формує закон керування на основі динамічної моделі об'єкта та дозволяє враховувати взаємозв'язки між технологічними параметрами.

Проведені виробничі дослідження показали, що використання LQR-регулятора забезпечує більш ефективне управління процесом приготування замісу порівняно з ПІД-регуляцією. Основною перевагою є те, що регулятор формує керуючі впливи з урахуванням одночасних змін об'єму замісу та концентрації крохмалю, тобто враховує взаємозв'язок між каналами керування.

LQR-регулятор побудовано на основі лінеаризованої моделі у просторі станів, що дозволяє описати поведінку системи поблизу робочої точки. Для цього змінні моделі подано у вигляді відхилень від номінальних значень, формула 6:

$$x(t) = \bar{x} + y, \quad u = \bar{u} + v. \quad (6)$$

Це дає можливість перетворити систему до виду з нульовим рівнем рівноваги. Далі формується закон керування, формула 7:

$$u = \bar{u} - K(x - \bar{x}), \quad (7)$$

де K – матриця коефіцієнтів, яка визначається так, щоб мінімізувати функціонал якості, формула 8:

$$J = \int_0^{\infty} \left[(x - \bar{x})^T Q (x - \bar{x}) + (u - \bar{u})^T R (u - \bar{u}) \right] dt, \quad (8)$$

де $Q = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} \\ q_{21} & q_{22} \end{bmatrix}$ і $R = \begin{bmatrix} r_1 & 0 \\ 0 & r_2 \end{bmatrix}$ – вагові матриці відхилень станів x

(концентрація розчиненого крохмалю та об'єм замісу в чанку) та керувань u (витрати води з ферментом та зерна) від номінальних значень \bar{x} та \bar{u} відповідно.

Важливим етапом синтезу LQR-регулятора є вибір вагових матриць Q та R , які формують функціонал якості J і визначають співвідношення між точністю регулювання та витратами керування. Матриця Q задає пріоритет стабілізації станів системи (об'єму замісу та концентрації крохмалю), тоді як матриця R характеризує «вартість» керуючих дій, обмежуючи надмірні зміни витрат вхідних потоків. Таким чином, збільшення ваг у Q підвищує точність

регулювання, а зростання коефіцієнтів у R забезпечує економність роботи системи.

Для налаштування параметрів LQR-регулятора було проведено моделювання процесу керування приготуванням замісу та його водно-теплової обробки за різних початкових умов і варіантів вагових матриць Q та R. Розглядалися два підходи до їх формування: використання одиничних матриць та налаштування за методом Брісонса [12]. У моделі задавалися характерні технологічні параметри процесу змішування: об'єм замісу 1 м^3 та концентрація розчиненого крохмалю $1,045 \text{ г/см}^3$.

Розрахунок матриці зворотного зв'язку здійснювався в середовищі MATLAB, що дозволило отримати перехідні характеристики системи (рис. 3). Аналіз результатів показав, що класичні налаштування LQR-регулятора забезпечують час регулювання близько 20 с, що є більшим за технологічно допустимий діапазон 2-5 с та супроводжується незначним перерегулюванням. Застосування методу Брісонса дало змогу отримати більш плавний перехідний процес, проте вихід системи на задані значення залишився повільним. Це свідчить про необхідність уточнення вагових коефіцієнтів регулятора для досягнення оптимальних показників керування [17].

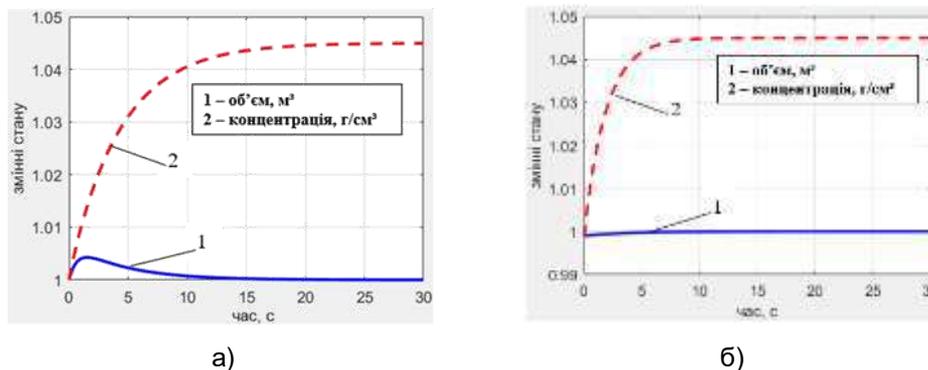


Рисунок 3 – Перехідні характеристики регулювання об'єму та концентрації за класичною методикою (а) і за методом Брісонса (б)

Після етапу параметричного налаштування LQR-регулятора було здійснено його апробацію безпосередньо на виробничих майданчиках українських спиртових підприємств. До досліджень було залучено технологічні лінії Луцького та Марилівського спиртових заводів, для яких попередньо зібрано достовірні експлуатаційні дані щодо витрат сировини, концентрацій та об'ємів замісу. На основі цих даних сформовано параметри математичної моделі [17].

Випробування проводилися в реальному технологічному процесі із подальшим аналізом у середовищі MATLAB. Отримані результати моделювання показали, що застосований LQR-регулятор забезпечує швидке встановлення потрібних значень об'єму та концентрації без коливань і перевищення встановлених режимних параметрів. Графічні залежності (рис. 4) демонструють плавний характер перехідних процесів, що підтверджується

розрахованими матрицями зворотного зв'язку К для різних комбінацій вагових коефіцієнтів Q та R [15-17].

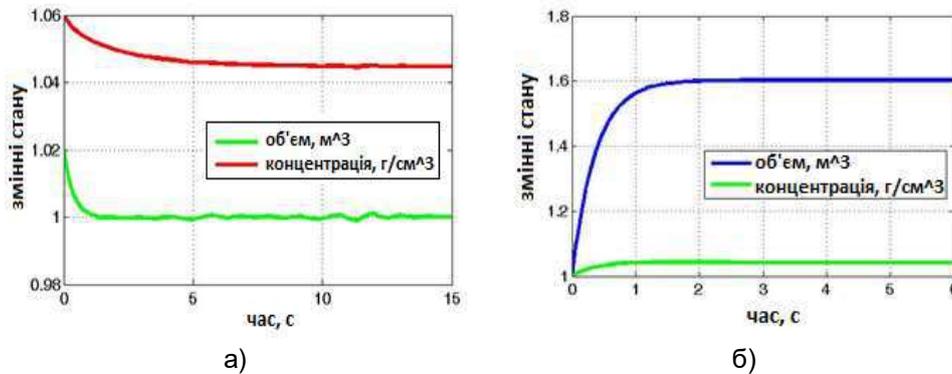


Рисунок 4 – Процес регулювання об'єму та концентрації крохмалю в замесі під час налаштування регулятора

Подальший порівняльний аналіз показав, що ключовим фактором якості керування є забезпечення стабільності об'єму в чанку. Навіть незначні відхилення цього параметра здатні спричинити осідання та налипання продукту на стінках обладнання, порушення транспортування суслу та збільшення мікробіологічних ризиків. Коливання ж концентрації переважно впливають на вихід готового спирту та ефективність подальших стадій переробки.

З огляду на це, під час коригування матриці Q було підвищено вагу стабілізації об'єму порівняно з концентрацією. Такий підхід забезпечив значно кращі динамічні показники: час регулювання зменшився до 0,5–5 с, при цьому перехідні процеси відбувалися без перевищення та коливань (рис. 5). Розраховані коефіцієнти зворотного зв'язку гарантували точне досягнення цільових параметрів навіть за умов змін навантаження та зовнішніх збурень [16].

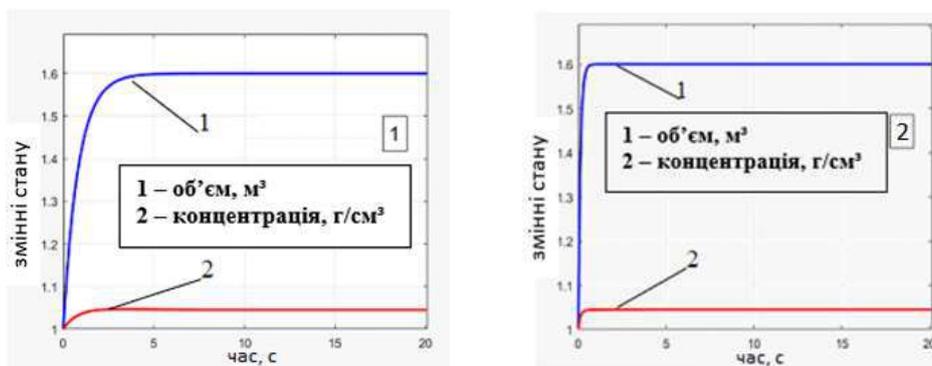


Рисунок 5 – Процес регулювання об'єму та концентрації крохмалю в замесі за умови врахування пріоритетності параметрів

Додатково слід відзначити, що налаштування матриць Q та R фактично реалізовувало модальний підхід до синтезу регулятора. Кожна зміна їхніх параметрів впливала на розміщення полюсів замкненої системи в комплексній площині, що дозволяло непрямим чином здійснювати модальне керування динамікою процесу.

Зменшення елементів матриці R та підвищення ваг у Q зміщували полюси системи лівіше, забезпечуючи швидке згасання режимів та скорочення часу перехідного процесу. Натомість збалансовані значення ваг переміщували полюси ближче до уявної осі, що формувало більш плавну і згладжену динаміку.

Проведені дослідження підтвердили, що варіювання вагових матриць дозволяє не лише отримати необхідні перехідні характеристики для конкретних виробничих умов, але й сформувати стійку модально керовану структуру системи з урахуванням технологічних особливостей процесу [15].

Таким чином, результати промислових випробувань підтвердили доцільність застосування оптимального LQR-регулювання для автоматизації стадії приготування замісу. Запропонований підхід дозволив підвищити стабільність технологічного процесу, покращити керованість і створив передумови для впровадження енергоощадних режимів у виробництві спирту.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Результати моделювання та промислових випробувань показали, що застосування LQR-регулятора забезпечує значно кращу якість керування порівняно з ПІД-регуляторами. Час встановлення параметрів скоротився до 0,5-5 с, усунені коливання та перерегулювання, а система зберігає стабільність навіть за наявності збурень у витратах та концентрації. Надання пріоритету стабілізації об'єму замісу дозволило уникнути технологічних проблем, таких як налипання та нерівномірне перемішування, що було підтверджено виробничими випробуваннями на підприємствах.

ВИСНОВКИ

У роботі розроблено та досліджено систему автоматичного керування процесом приготування зернового замісу на основі динамічної моделі у просторі станів. Показано, що традиційні PID-регулятори не забезпечують необхідної якості керування через взаємозв'язок каналів, що призводить до перерегулювань, коливань параметрів та підвищених енергетичних витрат.

Запропоноване застосування оптимального LQR-регулятора дало змогу значно покращити динаміку процесу: час встановлення зменшено до 0,5–5 с, усунуто коливання та перерегулювання, забезпечено точне підтримання об'єму та концентрації замісу за наявності технологічних збурень. Оптимізація вагових матриць дозволила врахувати пріоритетність стабілізації об'єму, що є критичним для безперервності виробництва.

Результати моделювання та виробничих випробувань на спиртових підприємствах підтвердили ефективність запропонованого підходу та можливість його практичного впровадження. Використання оптимального керування забезпечує підвищення стабільності технологічного процесу, зменшення енергоспоживання та покращення якості кінцевого продукту.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] C. A. Cardona Alzate, O. J. Sánchez Toro, Energy consumption analysis of integrated flowsheets for production of fuel ethanol from lignocellulosic biomass, *Energy*, Volume 31, Issue 13, 2006, Pages 2447-2459, ISSN 0360-5442.
- [2] C. Tengborg et al. Reduced inhibition of enzymatic hydrolysis of steam-pretreated softwood *Enzyme Microb Technol* (2001) D. Gregg et al. Bioconversion of lignocellulosic residue to ethanol: process flowsheet development. *Biomass Bioenergy* (1995)
- [3] D. Gregg et al. Techno-economic evaluation of a generic wood-to-ethanol process: effect of increased cellulose yields and enzyme recycle. *Bioresource Technol.* (1998)
- [4] M. von Sivers et al. A techno-economical comparison of three processes for the production of ethanol from pine. *Bioresource Technol.* (1995)
- [5] M. Galbe et al. Simulation of ethanol production processes based on enzymatic hydrolysis of woody biomass. *Comput. Chem. Eng.* (1994)
- [6] R. P. Tengerdy et al. Bioconversion of lignocellulose in solid substrate fermentation. *Biochem. Eng. J.* (2003)
- [7] L. Olsson et al. Fermentation of lignocellulosic hydrolysates for ethanol production. *Enzyme Microb. Technol.* (1996).
- [8] J.R. Moreira Sugarcane for energy-recent results and progress in Brazil *Energy. Sust. Dev.* (2000).
- [9] Kuzmych, O., Hajjaji, A., Aitouche, A., Bosche, J. and Telmoudi, A. (2017). Sum of squares based nonlinear control design. application to biodiesel engine., *IEEE Conference Publications: 2015 4th International Conference on Systems and Control (ICSC), Hammamet, Tunisia; IEEE Xplore Digital Library.* DOI: 10.1109/CoDIT.2017.8102564.
- [10] Brian, D., Anderson, O. and Moore, J. (1989). *Optimal Control. Linear Quadratic Methods.*, Department of Systems Engineering, Australian National University, Canberra, Prentice-Hall International, Inc., ISBN 0-13 -638651-2.
- [11] Wongsurakul, P.; Termtanun, M.; Kiatkittipong, W.; Lim, J.W.; Kiatkittipong, K.; Pavasant, P.; Kumakiri, I.; Assabumrungrat, S. Comprehensive Review on Potential Contamination in Fuel Ethanol Production with Proposed Specific Guideline Criteria. *Energies* 2022, 5, 2986. <https://doi.org/10.3390/en15092986>
- [12] Chen Chi Tsong. *Linear System Theory and Design : 3 тє вид. : Oxford Univ. Press, 1998. 352 p.*
- [13] Christensen, E.; Fioroni, G.M.; Kim, S.; Fouts, L.; Gjersing, E.; Paton, R.S.; McCormick, R.L. Experimental and theoretical study Of oxidative stability of alkylated furans used as gasoline blend components. *Fuel* 2018, 212, 576–585. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.10.066>.
- [14] Haaz, E.; Fozer, D.; Toth, A.J. Development of Anhydrous Ethanol Purification: Reduction of Acetal Content and Vapor–Liquid Equilibrium Study of the Ethanol–Acetal Binary System. *ACS Omega* 2021, 6, 1289–1298. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c04750>.
- [15] Markina L., Palchevskiy B., Hrudetskiy R., Smoliankin O., Melnychuk Y., Khrystynets N. Optimization of Ethanol Production Using State-Space Modeling and Optimal Control Technology, 2023 13th International Conference on

- Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT), Athens, Greece, 2023, pp. 38-45
- [16] Lyudmila Markina, Viktor Satsyk, Oleksandr Reshetylo, Roman Hrudetskyi, Oleh Smoliankin and Nadiia Kuts. "Effective Ethanol Production Based on Intelligent Robust Control", Published in: Conference Program – 2024 13th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT), Athens, Greece, October 11-13, 2024, Conference Timetable: p.2 - FRIDAY 11 OCTOBER 2024, paper ID 129.
- [17] L. Markina, B. Palchevskyi, R. Hrudetskyi, O. Smoliankin, Y. Melnychuk and N. Khrystynets, "Optimization of Ethanol Production Using State-Space Modeling and Optimal Control Technology," Published in: Conference Program - 2023 13th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT), Athens, Greece, October 13-15, 2023, Conference Timetable: p.2 - FRIDAY 13 OCTOBER 2023, paper ID 6224.
- [18] Кузьмич О. І., Маркіна Л. М., Якимчук Л. М. Моделювання та розробка системи керування процесом змішування на базі процесу водно-теплової обробки при виробництві спирту. Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво, № 30-31, Луцький НТУ, 2018. С. 220-227.

MODELING AND OPTIMAL CONTROL OF THE ETHANOL PRODUCTION PROCESS USING THE SPATIAL STATE APPROACH

Markina, L. Senior Lecturer
Satsyk, V. PhD, Associate Professor
Lutsk National Technical University / Ukraine

Abstract. This paper considers the process of preparing a mixture that can be used to optimize the production of food and fuel ethanol. An automatic system for optimal control of the mixture preparation process has been developed, based on measuring the consumption of raw materials and the concentration of the mixture, as well as regulating the water supply. The proposed controller maintains the required mixture level by changing the flow rates. By changing the flow rates of the components, the optimal controller maintains a constant mixture concentration and stabilizes the flows. The developed improved optimal controller is based on robust control of a nonlinear process, which ensures more stable system operation, improved quality of the mash and the final ethanol product, smooth transitions between modes, and energy savings.

Keywords: optimal control, dynamic modeling, ethanol production, state space system.

Дата першого надходження статті до видання	Дата прийняття статті до друку статті після рецензування	Дата оприлюднення
07.10.2025 р.	25.10.2025 р.	23.12.2025 р.

DOI: <https://doi.org/10.36910/4293-52779-2025-17-02-07>
УДК 629.4.086

Сільник М. Я.
аспірант
ORCID: 0009-0008-2135-0022
Фединець В. О.
д-р, техн., наук, професор
ORCID: 0000-0002-9392-7491

Національний університет
“Львівська політехніка” /
Україна

СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КОНТРОЛЮ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ РУХОМОГО СКЛАДУ ПІД ЧАС РУХУ ПОЇЗДА

Анотація: в статті розглянуто удосконалення систем автоматичного контролю за технічним станом рухомого складу під час руху поїзда. Описано наслідки, що виникають при несправності буксового вузла, обґрунтовано принципи виявлення нагрітих аварійно букс. Розглянуто основні дачачі інфрачервоного випромінювання та їх характеристики, що застосовуються в системах контролю температури. В статті наведено оглядову інформацію та обґрунтовано доцільність оновлення систем автоматичного контролю за технічним станом рухомого складу під час руху поїзда на залізницях України.

Ключові слова: букса, температура, тепловізор, рухомий склад, інфрачервоне випромінювання, фотоприймачі.

ВСТУП, ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

На даний час апаратура контролю найбільш відповідальних вузлів рухомого складу – це стаціонарні комплекси, які розміщуються з інтервалом у 40-60 кілометрів. Таке розміщення контролюючих приладів дає змогу завчасно виявити неполадки і сповістити персонал про їх наявність [1]. Слід зазначити, що на залізницях багатьох країн з успіхом використовуються різні моделі апаратури контролю окремих вузлів рухомого складу, впроваджуються нові системи комплексного контролю рухомого складу з централізованим збором і опрацюванням інформації. На залізницях України продовжується експлуатація системи пристроїв виявлення перегрітих аварійно букс (ПВНАБ-3). На заміну даної системи, яка фактично застаріла, поступово вводиться новітня система автоматизована система дистанційного контролю букс (АСДК-Б).

Для удосконалення автоматичного контролю за технічним станом рухомого складу під час руху поїзда доцільно проаналізувати технічний стан та виконати аналіз існуючих систем діагностичного контролю буксових вузлів залізничного рухомого складу [2]. Аналіз багаторічних спостережень і досліджень авторів показали, що збільшення швидкостей руху поїздів, підвищення навантаження на вісь колісної пари, подовження термінів між плановими оглядами, раціоналізація та оптимізація управління перевізним

процесом обумовлено наявністю контролю стану буксових вузлів (рис. 1 та 2) рухомого складу технічними засобами для виявлення їх неполадок.

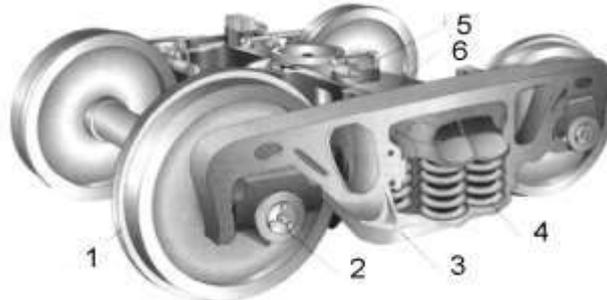


Рисунок 1 – Двохвісний візок вантажного вагона

1 – колісна пара; 2 – букса на роликових підшипниках; 3 – бокова рама;
4 – ресорний комплект; 5 – горизонтальний ковзун; 6 – надресорна балка

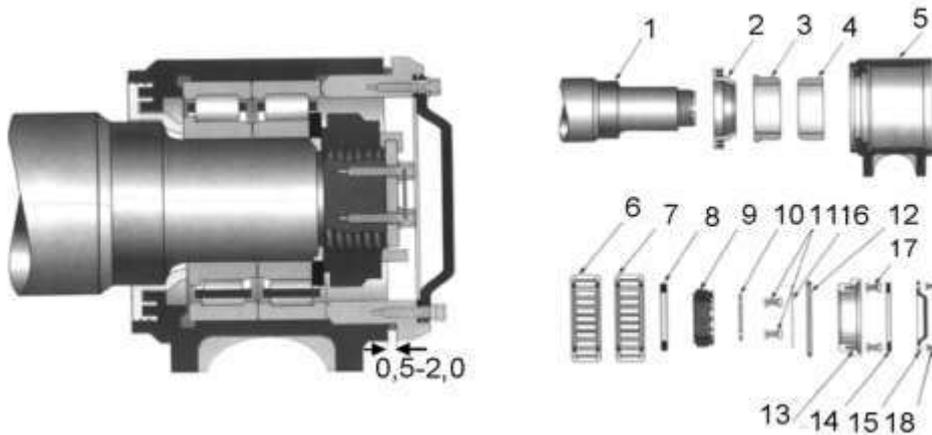


Рисунок 2 – Буксовий вузол

1 – шийка осі; 2 – лабіринтне кільце; 3, 4 – внутрішні кільця; 5 – корпус букси;
6, 7 – блок підшипника; 8 – упорне кільце; 9 – торцева гайка М110;
10 – стопорна планка; 11 – болти М12 з шайбами; 12 – ущільнююче кільце;
13 – кришка кріплення; 14 – гумова прокладка; 15 – оглядова кришка;
16 – провід; 17 – болти М20 з шайбами; 18 – болти М12 з шайбами

Значну увагу необхідно приділяти моніторингу за буксовими підшипниками, що мають тенденцію до нагрівання, за заклиненними колісними парами, які сприяють виникненню аварійних ситуацій для процесу перевезень [3]. Доведено, що перегрів буксового підшипника може призвести до зламу шийки осі колісної пари і, як наслідок, сходженню рухомого складу з рейок. У свою чергу заклинювання колісних пар сприяє їх недопустимому нагріванню, руйнуванню гальмівних пристроїв, виникненню повзунів, зламу колісних дисків і бандажів. При виникненні такої ситуації рухомий склад має великий запас кінетичної енергії і може стати джерелом різноманітних факторів ураження (сила інерції, механічна сила конструкцій рухомого складу, тощо). Джерелом

техногенних та екологічних катастроф при сходженні рухомого складу з рейок можуть стати вантажі, що перевозяться в поїзді (горючі, хімічні, отруйні, радіоактивні, вибухові, небезпечні біологічні речовини, тощо).

Як бачимо, розвиток та удосконалення залізничного транспорту в Україні, яка є однією з важливих галузей народного господарства в державі як в мирний час, так і, особливо у воєнний час. А це вимагає повних гарантій безпеки як для самої системи перевезення, так і для обслуговуючого персоналу.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Апаратура системи автоматичного контролю нагріву букс за її розміщенням поділяється на станційне обладнання та перегінне [3]. У свою чергу перегінне обладнання поділяють на обладнання розміщене на верхній будові залізничної колії та постове (рис. 3).

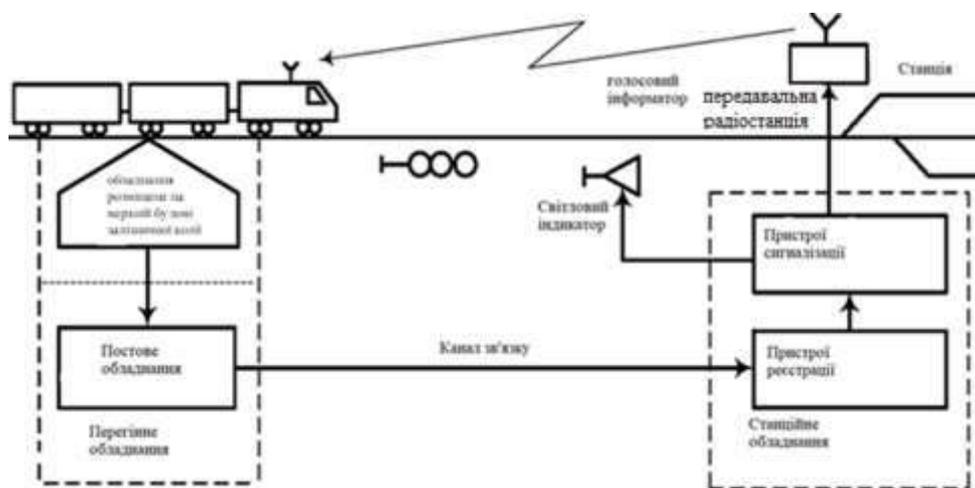


Рисунок 3 – Схема розташування пристроїв автоматичного контролю буксових вузлів рухомого складу

Обладнання розміщене на верхній будові залізничної колії встановлюється безпосередньо на верхній будові залізничної колії.

Постове обладнання розміщується в безпосередній близькості від обладнання розміщеного на верхній будові залізничної колії обладнання в спеціальному приміщенні, шафі або контейнері.

Станційне обладнання розташовується в приміщенні чергового станції (ДСП).

Пристроями вимірювального тракту апаратури контролю нагріву букс рухомого складу здійснюється [4]:

- приймання теплової (інфрачервоної) енергії від корпусів букс та перетворення її в електричний сигнал;
- нормування прийнятого сигналу за тривалістю і виключення можливості подальшої обробки сигналів від інших частин вагонів і локомотивів;

- підсилення електричного сигналу;
- корекція коефіцієнта передачі вимірювального тракту залежно від зміни температури довкілля.

До складу приймально-підсилювального тракту входять:

- приймач ІЧВ з оптичною системою і попередній підсилювач сигналів, що розташовані в камері яка розміщена на верхній будові залізничної колії;
- кінцевий підсилювач сигналів постового обладнання;
- пристрій керування періодами часу приймання інформації від ІЧВ приймачів;
- кінцевий каскад вимірювального тракту;
- давач температури довкілля;
- давачі проходження коліс (ДПК), що розміщені з внутрішньої сторони рейки;
- блок формування строб-імпульсів від ДПК;
- фіксатор рівня сигналів від ДПК;
- реєструючий пристрій.

Для двостороннього контролю буксових вузлів камери які розміщені на верхній будові залізничної колії з приймачами ІЧВ встановлюють по обидва боки залізничної колії.

За принципом дії всі приймачі ІЧВ можна розділити на два великі класи: теплові та фотонні з основними параметри приймачів ІЧВ, до яких відносять інтегральну чутливість, напругу шумів, поріг чутливості, постійну часу приймача.

З теплових приймачів ІЧВ для апаратури контролю нагріву букс інфрачервоної енергії тією чи іншою мірою відповідають наведеним вище вимогам болометри та пірометричні приймачі.

Авторами був проведений порівняльний аналіз апаратури виявлення перегрітих букс закордонних компаній. Так, апаратура компанії Servo Corporation of America (США) моделі 8000 полегшує роботу поїздної бригади та робить застосування такої апаратури ефективнішим.

В апаратурі компанії General Electric (GE), використано принцип уловлювання та перетворення в електричні сигнали енергії ІЧВ, що випромінюється задньою стінкою корпусу букси.

Апаратура виявлення перегрітих букс компанії CSEE (Франція) побудована за принципом апаратури телевимірювання з видачею телеметричної інформації на самописець.

Апаратура компанії Hawker siddeley dynamics engineering (HSDE, Велика Британія) побудована на принципах телесигналізації. Вся первинна телеметрична інформація обробляється постовим обладнанням, але в реєструючий пристрій станційного обладнання надходить лише інформація про результати контролю.

Відома також апаратура виявлення перегрітих букс МН2 підприємства TESLA (Чехія). Відмінною особливістю цієї апаратури порівняно з іншими закордонними моделями є видача інформації про технічний стан букс контрольованого поїзда на центральний пост управління. Апаратуру побудовано за принципами апаратури телесигналізації. Температура задньої

стілки корпусу букси вимірюється по відношенню до температури рами вагона (температури доквілля).

Слід зазначити, що на Федеральних залізницях Австрії після введення системи змішаних автомобільно-залізничних перевезень наприкінці 1980-х років почалася реалізація програми впровадження пристроїв виявлення перегрітих букс і заклинених коліс (пристрій виявлення нагріву букс і заклинених коліс ТК99). Пов'язано це було з тим, що часто спостерігалися сходження вагонів з рейок, обумовлені зламами осей колісних пар вантажних вагонів.

При модернізації пристроїв і систем залізничного транспорту в Україні відмічається тенденція застосування мікропроцесорної техніки. Ця техніка використовується в станційних та перегінних системах інтервального регулювання руху поїздів, диспетчерської централізації, діагностування та диспетчерського контролю пристроїв залізничної автоматики та агрегатів рухомих одиниць, автоматичної ідентифікації рухомого складу, в системах оповіщення та пасажирської автоматики. Вважаємо за доцільне використання такої техніки при аналізі великих обсягів інформації, її зберігання та передавання в реальному часі без порушення технологічного процесу руху поїздів.

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Удосконалити автоматичний контроль за технічним станом рухомого складу під час руху поїзда. Для цієї мети необхідно: впроваджувати сучасні досягнення науки та техніки, в галузі розроблення засобів автоматики, обчислювальної техніки, телемеханіки та ІТ-технологій зв'язку.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ДОСЛІДЖЕННЯ

Впровадження пристроїв виявлення аварійних букс та заклинених коліс рухомого складу має такі задачі:

- підвищення рівня безпеки руху поїздів;
- покращення якості пасажирських та вантажних перевезень;
- виконання графіка процесу перевезень;
- попередження аварій, зменшення шкоди доквіллю під час перевезення небезпечних вантажів;
- мінімізація ризику виникнення аварій у тунелях, на штучних спорудах.

Пристрої виявлення аварійних букс побудовані на застосуванні вимірювання інфрачервоного випромінювання від корпусу букси та елементів колісної пари. Виявлення аварійного стану визначається перевищенням температури.

Проведений авторами аналіз зарубіжних та вітчизняних досліджень [3]-[7] технологічних методів вимірювань фактичної температури елементів показав, що найбільш ефективними при безконтактному методі виявлення температурних режимів експлуатації елементів буксового вузла та механічного обладнання вагона є пристрої інфрачервоної діагностики.

Основними перевагами таких пристроїв є:

- достовірність і точність результатів;

- безпека персоналу та незначні трудовитрати при проведенні вимірювань;
- діагностика контактних, безконтактних та механічних пристроїв у процесі їхньої роботи без порушення чи зупинки технологічного процесу;
- виявлення навіть незначного нагрівання елементів для подальшого аналізу можливих наслідків;
- великий обсяг робіт, що виконуються за одиницю часу.

Відомо, що до складу електромагнітного спектру входять (за ступенем зменшення довжини хвилі): радіохвилі, інфрачервоне випромінювання, видиме світло, ультрафіолетове випромінювання, рентгенівське випромінювання, гамма-випромінювання.

Інфрачервона частина спектру знаходиться між радіохвилями та видимою частиною спектра (рис. 4). Зазвичай довжина хвилі інфрачервоного випромінювання (ІЧВ) вимірюється в мікронах (мкм), до нього відносять частину спектра із довжиною хвилі від 0,7 до 1000 мкм.

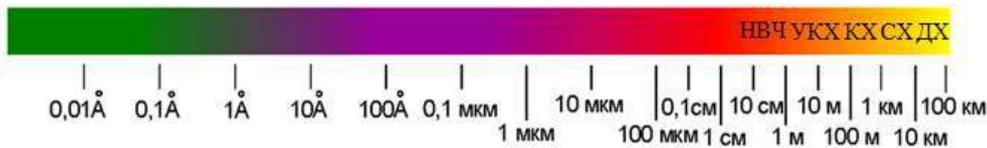


Рисунок 4 – Шкала електромагнітного випромінювання

Відомо, що людське око здатне сприймати лише електромагнітне випромінювання в діапазоні довжин хвиль від 0,4 до 0,8 мкм, що визначає область видимого спектра. Хвилі меншої довжини відносяться до ультрафіолетового випромінювання, а область хвиль більшої довжини відносять до інфрачервоного випромінювання ІЧВ, яке в свою чергу поділяють на кілька піддіапазонів:

- від 0,76 до 1,5 мкм – ближнє ІЧВ;
- від 1,5 до 5,5 мкм – короткохвильове ІЧВ;
- від 5,6 до 25 мкм – довгохвильове ІЧВ;
- від 25 до 1000 мкм – далеке ІЧВ.

Розподіл потоку випромінювання за довжиною хвилі описується спектральним потоком випромінювання:

$$\Phi_{e\lambda} = \frac{dF_e}{d\lambda}, \quad (1)$$

якщо спектр випромінювання лежить в інтервалі довжин хвиль від λ_1 до λ_2 , то інтегральний (сумарний) потік випромінювання може бути описаний:

$$\Phi_{e\lambda_2}^{\lambda_1} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{e\lambda} d\lambda. \quad (2)$$

Основною фотометричною величиною є сила світла I_c , яка визначається

відношенням світлового потоку Φ_c , який розповсюджується від джерела світла всередині елементарного тілесного кута $d\varphi$ до цього кута:

$$I_c = \frac{d\Phi}{d\varphi}. \quad (3)$$

У тепловому зображенні та тепловому вимірюванні об'єктів важливу роль відіграє залежність від температури T спектральної енергетичної світимості абсолютно чорного тіла (функція M_λ , яка визначається формулою Планка):

$$\frac{dM_\lambda}{dT} = M_\lambda \frac{c_2 \exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right)}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right)^{-1}}, \quad (4)$$

де $c_2=14388$ мкм – постійний коефіцієнт;
 λ – довжина хвилі, мкм.

Оскільки в області максимального випромінювання $\exp(c_2/\lambda T) \rightarrow 1$, то:

$$\frac{dM_\lambda}{dT} \approx M_\lambda \frac{c_2}{\lambda T^2}. \quad (5)$$

Це значно полегшує розрахунки залежності ІЧВ об'єкта діагностування від температури.

У світовій практиці для вивчення ІЧВ були розроблені спеціальні прилади – інфрачервоні камери та на їх основі – тепловізори (термографи). Ці прилади дають змогу не тільки реєструвати ІЧВ, але й вимірювати його параметри, а також перетворювати низько енергетичне випромінювання на видиме для ока людини зображення.

Таким чином, теплобачення – це отримання видимого теплового зображення об'єкта на підставі власного ІЧВ для оцінки розподілу та вимірювання теплових полів. У свою чергу, тепло вимірювання – це визначення температури будь-якої точки на поверхні досліджуваного об'єкта.

ІЧВ концентрується системою спеціальних лінз на фотоприймачі, який вибірково налаштований за чутливістю до певної довжини хвилі інфрачервоного спектра. Потрапивши на фотоприймач ІЧВ призводить до зміни його електричних властивостей, в результаті чого змінюються параметри вихідного сигналу фотоприймача. Цей сигнал після посилення та цифрового перетворення передається до блоку відображення інформації, який має нормативну колірну палітру. Кожному значенню вхідного сигналу надається певний колір і тоді на екрані монітора з'являється точка, колір якої відповідає чисельному значенню ІЧВ. Скануюча система (дзеркала або напівпровідникова матриця) проводить послідовний огляд усіх точок об'єкта та доквілля в межах поля видимості фотоприймача, внаслідок чого на екрані

тепловізора відображається видима картина ІЧВ (чорно-біла або кольорова) залежно від температури елементів об'єкта діагностування та заданої колірної палітри.

Одним із основних елементів тепловізорів є фотоприймач. Сучасні фотоприймачі мають фокально-площинні інфрачервоні-матриці (ІЧ-матриці), які можуть бути виконані на основі різних матеріалів – халькогенідів (бінарні сполуки елементів з халькогенами – елементами 6 групи головної підгрупи (S, Se, Te, Po) свинцю (PbS, PbSe), сполуки кадмій-ртуть-телур – HgCdTe, антимоніду індію (InSb), силіциду платини (PtSi), домішок кадмію (Si:x) та германію (Ge:x), багат шарових структур із квантовими ямами на базі GaAs/AlGaAs (так званих QWIP детекторів – Quantum Well Infrared Photodetector), мікроболометрів та піроелектриків. Основні параметри деяких із них наведено у таблиці 1.

Сучасні тепловізійні камери мають високу роздільну здатність та можливість виявлення температури з точністю до 0,06°C. Безконтактний принцип роботи тепловізора дає змогу застосовувати його для обстеження теплового стану будь-яких пристроїв залізничної автоматики, як у стаціонарному, так і мобільному режимах.

Відомо, що максимум спектральної щільності випромінювання у міру зростання температури будь-якого тіла розташовується в області коротких хвиль (короткохвильове ІЧВ з λ від 1,5 до 5,5 мкм). Для корпусів більшості перегрітих букс, температура яких може змінюватися від 0 до 80 °C, максимум спектральної щільності випромінювання також припадає на область короткохвильового ІЧВ. Ці значення довжин хвиль повинні враховуватися при виборі приймача ІЧВ для апаратури контролю нагріву букс. Однак, щільність випромінювання Сонця має максимум при довжині хвилі близько 0,5 мкм і дуже незначна її частина припадає на довжину хвиль більше 5 мкм. Тому для захисту апаратури контролю від впливу відбитої сонячної енергії приймач ІЧВ повинен мати загороджувальні фільтри довжин хвиль коротше 5 мкм.

Нормальна робота буксового вузла характеризується постійним режимом теплообміну між його елементами, колісною парою і довкіллям у процесі руху поїзда, тобто режимом, коли кількість тепла, що виділяється, дорівнює кількості тепла, яке розсіюється елементами букси і колісної пари в довкілля. Температура шийки осі колісної пари в постійному режимі залежить від швидкості руху поїзда, температури довкілля, механічного навантаження на підшипник буксового вузла та інших факторів.

Для буксового вузла з підшипником ковзання гранична температура шийки осі колісної пари становить орієнтовно в діапазоні 100-140°C. Критичною температурою, при якій починається руйнування поверхневого шару шийки осі колісної пари і відбувається захоплення (явище місцевого з'єднання двох твердих тіл (металів) у результаті взаємного тертя або сумісного деформування при температурі, нижчій від температури рекристалізації) металів поверхонь, що труться, є температура 140°C і вище.

Для буксового вузла з роликowymi підшипниками ознакою несправності є підвищення температури корпусу букси в процесі руху поїзда до 70...75° C в літній період і до 40...50 °C взимку.

Технологічні комплекси • Technological Complexes
2025
Том 17. № 2 • Vol. 17. No 2

Таблиця 1 – Основні параметри деяких фокально-площинних ІЧ-матриць фотоприймачів для тепловізійних приладів

Країна, фірма	Тип матриці	Робоча область спектру, мкм	Формат (число пікселів)	Розмір пікселя, мкм	Робоча температура, К	Температурна чутливість (NETD), мК
ФРН, AEG Infrared-Module GmbH	QWIP	8-10	640x512	24x24	70	25
США, Raytheon	QWIP	8-12	640x486	18x18	70	30
США, Hughes, SBRS	KPT	8,5-11	256x256	30x30	80	65
США, Hughes, SBRS	KPT	3-4,5	128x128	40x40	300	50
США, Hughes, SBRS	KPT	3-4,5	256x256	30x30	300	65
ФРН, AEG Infrared-Module GmbH	PtSi	3-5	256x256	24x24	75	75
США, Hughes	PtSi	3-5	256x256	30x30	40	
США, Boeing Comp	PtSi	1-5	486x640	24x24	75	70
США, Cincinnati Electronics Corp.	InSb	3-5	256x256	30x30	77	40
Японія, Mitsubishi Electric Co.	Ge:Si/Si (бар'єр Шоттки)	8-12	512x512	34x34	43	80

Тепло, що виділяється під час руху поїзда в зоні тертя підшипника буксового вузла об вісь колісної пари, поширюється двома шляхами: через шийку осі на колесо та вісь, а також через підшипник на корпус букси. За даними відомих досліджень на колесо і вісь відводиться до 77% тепла, що виділяється, на корпус букси – 23%. Основними елементами тепловиділення буксового вузла є підшипники – шийка осі, але ці елементи недоступні для прямого контролю. У зв'язку з цим при технічній реалізації пристроїв

виявлення перегрітих буксових вузлів повинен передбачатися контроль таких елементів корпусу буксового вузла або колісної пари, які найбільшою мірою відображають температуру підшипників і шийки осі і є доступними для такого контролю в процесі руху поїзда.

Контроль температури поверхні кришки буксового вузла не може забезпечити достовірних результатів, оскільки ця температура не відображає реальну температуру осі, особливо для букс з підшипниками ковзання.

Температуру шийки осі найкраще характеризує її підступінчаста частина колісної пари із зовнішнього боку колеса. Однак, через невеликі розміри цієї зони технічно складно здійснити надійний контроль при поперечних зсувах колісної пари під час руху поїзда. При цьому до зони зчитування можуть потрапляти нагріті гальмівні колодки.

Найбільш раціональною є апаратура, що контролює задню стінку корпусу букси з зовнішньої сторони рами візка. Верхня частина задньої за ходом руху поїзда стінки корпусу букси менше інших елементів букси охолоджується зустрічним потоком повітря та доступна для контролю. За температурою її нагрівання з достатньою точністю можна робити висновки про температуру шийки осі.

На загал приймачі ІЧВ, які застосовують в апаратурі контролю температури, реагують на перевищення потужності випромінювання нагрітого тіла над нормативною потужністю випромінювання, прийнятого за еталон. За еталон може бути прийнята температура довкілля, яка була виміряна на момент сканування елементів контролю.

При вимірюваннях температури корпусів букс існує два способи вибору температури еталона: температура еталона стала; температура еталона є пропорційною (в окремому випадку – дорівнює) температурі довкілля.

В сучасних системах виявлення перегрітих букс по ходу руху поїзда (наприклад, АСДК-Б) застосовано новий спосіб вирішення проблеми вибору температури еталону. Так, з урахуванням температури довкілля, за еталон температури прийнята температура калібратора камери, виміряна в безпосередній близькості від місця установлення приймача ІЧВ при заході поїзда до зони контролю. Завдяки цьому виключається вплив всіх перелічених вище факторів, що негативно впливають на якість контролю.

Виявлення перегрітих букс у рухомих одиницях за ходом руху поїзда можна забезпечити удосконаленням алгоритмів обробки сигналів від буксових вузлів та автоматизувати процес виявлення їх нагріву та за прийнятими температурними граничними значеннями визначити ступінь аварійності.

ВИСНОВКИ

Проведений аналіз показує, що системи автоматичного контролю технічного стану рухомого складу під час руху поїзда в Україні потребують модернізації, вони морально застарілі. Для забезпечення безпеки руху, уникнення техногенних та екологічних катастроф необхідно впроваджувати нові перспективні вітчизняні та зарубіжні технології із впровадженням повної комп'ютеризації систем автоматичного контролю технічного стану рухомого складу.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Pravyla bezpechnoi ekspluatatsii prystroiv avtomatyky, telemekhaniky ta zviazku na zaliznytsiakh Ukrainy. Nakaz Ukrzaliznytsi № 288-Ts vid 17.11.2023.
- [2] Pro vprovadzhennia na zaliznychnomu transporti Ukrainy perspektyvnykh informatsiinykh tekhnolohii. Nakaz Ukrzaliznytsi № 583-Ts vid 29.10.2021.
- [3] Borzylov, I. Udoskonalennia tekhnolohii tekhnichnoho obsluhovuvannia ta remontu vahoniv zasobamy tekhnichnoi diahnostyky. Kharkiv : UkrDAZT, 2023. Ch. 1. Pp. 91.
- [4] Koshovyi, S. Systema avtomatychnoi identyfikatsii rukhomoho skladu SAI "Transtelekart". Informatsiino-keruiuchi systemy na zaliznychnomu transporti. 2015. № 5. P. 48-53.
- [5] Samsonkin, V., Boiynk, A., Sokolov, O. Bezpeka rukhu poizdiv na zaliznychnomu transporti. Keiv :KUETT, 2005. Pp. 170.
- [6] Tarawneh, C., Montalvo, J., Wilson, D. (2021). Defect detection in freight rail cartapered-roller bearings using vibration techniques. Rail. DOI: 10.1007/s40534-020-00230-x.
- [7] An Implementation Guide for Wayside Detector Systems : U.S. Department of Transportation Federal Railroad Administration. (2019) Office of Research, Development and Technology Washington. Pp. 99.

SYSTEMS OF AUTOMATIC CONTROL OF THE TECHNICAL CONDITION OF THE ROLLING STOCK DURING THE MOVEMENT OF THE TRAIN

Silnyk, M. PhD student

Fedynets, V. DThSc., Professor

Lviv Polytechnic National University / Ukraine

Abstract. The article deals with the improvement of automatic control over the technical condition of rolling stock during train movement. The consequences arising from a malfunction of axlebox node are described, the principles of detecting the emergency heating of the axleboxes are justified. The main detectors of infrared radiation and their characteristics used in temperature control systems are listed. The expediency of updating these devices on Ukrainian railways is substantiated. The paper analyzes both current domestic (PVNAB-3, ASDK-B) and foreign diagnostic control systems, concluding that the rear wall of the axlebox housing is the most rational control area. The authors emphasize the necessity of modernizing Ukrainian systems by implementing microprocessors and full computerization to enhance safety and prevent accidents.

Keywords: axlebox, thermal imager, rolling stock, infrared radiation, photo receivers.

Дата першого надходження статті до видання	Дата прийняття статті до друку статті після рецензування	Дата оприлюднення
13.10.2025 р.	30.10.2025 р.	23.12.2025 р.

DOI: <https://doi.org/10.36910/4293-52779-2025-17-02-08>
УДК 681.5: 004.9

Олекса В. Л.
магістрант
Гуменюк Л. О.
канд. техн. наук, доцент
ORCID: 0000-0002-7678-7060
Гуменюк П. О.
канд. техн. наук, доцент
ORCID: 0000-0002-6251-8548

Луцький національний
технічний університет / Україна

АВТОМАТИЗОВАНИЙ АНАЛІЗ РОЗДІЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ ТА КОНТРАСТУ ОПТИЧНИХ СИСТЕМ

Анотація: у роботі виконано аналіз факторів, що впливають на якість оптичних систем при виготовленні та при експлуатації. Визначено, що якість оптичних систем визначається не лише технічними характеристиками окремих компонентів, а й комплексом факторів, що охоплюють проектування, виробництво, збірку та експлуатацію. Описано методології та техніки аналізу якості оптичних систем. Розроблено алгоритм і виконано програмну реалізацію системи оцінки якості оптичних систем за допомогою аналізу модуляційної передавальної функції (MTF) методом похилого краю з побудовою теплових карт та виявленням зниження якості у периферійних зонах. Він виявляє тестові мішені на зображенні, аналізує їхні межі та обчислює ключові показники, такі як MTF50, MTF10 і контраст. Проведено експерименти за допомогою камери Canon EOS R8 з об'єктивом Canon RF 15-30 мм у різних конфігураціях і протестовано ефективність запропонованого методу. Проведений аналіз зображень показав високу якість оптичної системи. Отримані результати відповідають фізичним обмеженням сенсора та оптики у межах проведеного тестування.

Ключові слова: якість оптичних систем, моделювання, обробка зображень, алгоритм.

ВСТУП, ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Якість оптичної системи визначає, наскільки ефективно оптична система передає просторову, спектральну й інтенсивнісну інформацію від об'єкта до сенсора. У більшості застосувань – від наукових приладів до споживчих камер – якість отриманого зображення напряму залежить від характеристик оптичної системи.

Висока оптична якість дозволяє мінімізувати аберації, підвищити роздільну здатність, зберегти геометричну точність і забезпечити високу контрастність. Це особливо важливо для застосувань, де від зображення залежить результат аналізу або управління процесом, як-от у промисловій

автоматизації, медичній візуалізації чи автономному транспорту. Точна передача зображення визначає, наскільки ефективно система виконує свою функцію, зокрема в умовах складного освітлення або динамічного середовища [1].

З розвитком цифрових камер, роздільна здатність яких постійно зростає, основним обмеженням у якості зображень стає саме оптика, а не сенсор. Саме об'єктив визначає рівень деталізації, контрасту та передачі світла. Вплив мають такі параметри, як фокусна відстань, відносна апертура, кут поля зору. Наприклад, менше число діафрагми означає більшу апертуру, що покращує світлочутливість системи. Вибір сенсора також відіграє важливу роль: CCD-камери забезпечують низький рівень шуму, але мають повільну передачу сигналу; CMOS-сенсори працюють швидше; GigE-системи підходять для задач, де критична швидкість зчитування. Всі ці компоненти – оптика, сенсор, програмне забезпечення – формують єдину систему, в якій якість зображення залежить від збалансованої взаємодії усіх елементів.

Традиційна оцінка оптичної якості базувалась на ручній інспекції. Цей підхід був суб'єктивним, нестабільним і схильним до помилок. З появою автоматизованих систем оптичного контролю ситуація змінилася. У 1980-х роках такі системи почали замінювати ручну перевірку на алгоритми аналізу, що дозволило досягти більшої точності та швидкості. Сьогодні застосовуються системи, що базуються на алгоритмах обробки зображень, які суттєво підвищують ефективність аналізу. Вони здатні обробляти великі обсяги даних з високою повторюваністю та стабільністю [2].

Автоматизована оцінка якості дозволяє стандартизувати процес, забезпечити повторюваність і виявити дефекти на ранніх етапах. Це скорочує цикл виробництва й підвищує надійність продукту в період експлуатації.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

1. Фактори впливу на якість оптичних систем при виготовленні.

Якість оптичних систем формується ще на етапі проєктування і виготовлення. Конструктивні рішення мають прямий вплив на довговічність, точність і стабільність роботи системи. Зокрема, визначальне значення мають архітектура системи, вибір матеріалів і встановлення технічних допусків. Матеріали, з яких виготовлені оптичні компоненти, повинні мати поєднання оптичної однорідності, механічної стабільності та термостійкості. Наприклад, кремнієвий карбід і берилій є придатними для конструкцій, де критичними є жорсткість і мала маса. Проте їх використання вимагає врахування умов експлуатації, таких як вібрації, температурні поля чи радіаційне навантаження [3]. Допуски на технічні характеристики окремих елементів задають допустимі межі їхніх відхилень. Ці межі повинні бути жорстко пов'язані з загальними допусками системи. Помилка в цьому розрахунку може призвести до втрати якості, навіть якщо виготовлення проведено точно.

Таким чином, конструктивні фактори не є ізольованими – вони формують єдину систему, де кожен етап підготовки впливає на кінцеву якість. Вибір матеріалу має фундаментальний характер, бо визначає не лише початкові властивості, а й стійкість до зовнішніх чинників. Навіть за високоточних

технологій обробки невдалий вибір матеріалу створює ризики, які неможливо компенсувати на пізніших етапах.

Виробничі допуски та дефекти. Високоточні допуски в оптичному виробництві регламентуються чіткими цифровими межами, які задають допустимі відхилення для кожного критичного параметра. Це дозволяє забезпечити стабільність характеристик системи в широкому діапазоні [4].

Дефекти матеріалів. Дефекти матеріалів мають критичне значення для функціональності оптичних систем. Неоднорідність показника заломлення в об'ємі матеріалу призводить до викривлення хвильового фронту. Неоднорідність у матеріалі означає, що показник заломлення змінюється в різних частинах оптичного елемента. Це може стосуватись всього об'єму або лише окремих ділянок. Якщо ці зміни складають хоча б одну мільйонну, світло починає розсіюватися, що викривляє його напрям і знижує точність фокусування [5-6].

Помилки покриття та напруження. Покриття, нанесені на підкладки, можуть викликати невеликі зміни у структурі матеріалу, зокрема невідповідність кристалічної решітки. Це призводить до збільшення внутрішніх напружень у тонких плівках, особливо на полірованих поверхнях. Ці напруження впливають на форму поверхні оптичних елементів. Вони можуть деформувати кривизну, що призводить до помилок у формі поверхні. Для вивчення впливу параметрів плівки – напруження, товщини та діапазону покриття – на аберації застосовують метод скінченних елементів (FEM) [7]. За допомогою цього методу можна проаналізувати і оптимізувати характеристики плівки, щоб мінімізувати її негативний вплив на оптичну якість.

Точність збірки та вирівнювання. Зміщення елементів, децентрування та нахил у оптичних системах викликають поступове зниження якості зображення. Температурні зміни провокують розширення та стиснення матеріалів, що призводить до зміни оптичних відстаней, зокрема відстані між лінзами, а також фокусних відстаней [6]. Механічне кріплення лінз має враховувати різницю в коефіцієнтах теплового розширення між компонентами, забезпечуючи достатній зазор для компенсування температурних деформацій. Аналіз допусків і контроль накопичення похибок є необхідними для забезпечення коректної збірки [6]. Навіть ідеально виготовлені лінзи можуть втратити ефективність через неправильний монтаж або температурні коливання, що змінюють оптичний шлях.

2. Фактори впливу на якість оптичних систем при експлуатації.

Після виготовлення та збірки оптичні системи піддаються впливу різноманітних факторів, що можуть спричинити деградацію їхньої якості протягом експлуатаційного періоду.

Аберації, спричинені експлуатацією. Аберации – це оптичні спотворення, при яких реальне зображення відхиляється від ідеального [8]. Наявність абераций, викликаних неправильним налаштуванням оптичної системи, вказує на критичну роль людського фактора. Система, яка виготовлена з високою точністю, може демонструвати погані результати через помилки під час юстування або експлуатації.

Зовнішні фактори. На надійність та якість оптичних систем під час експлуатації суттєво впливають зовнішні фактори, зокрема кліматичні, механічні та біологічні умови. Температура та вологість здатні викликати деформації оптичних матеріалів і компонентів, що змінює їхні геометричні параметри та оптичні властивості [9]. Комбінована дія температури, вологості, забруднень та механічних навантажень створює складне середовище, у якому системи піддаються не лінійним ефектам деградації.

Механічний знос та деградація. Деградація матеріалів в оптичних системах відбувається під впливом часу та зовнішніх чинників, змінюючи фізичні та хімічні властивості компонентів. Полімери, що застосовуються як захисні елементи або конструкційні частини, зокрема піддаються старінню. Під впливом ультрафіолетового випромінювання відбувається розрив полімерних зв'язків, утворення тріщин, крихкість і втрата цілісності матеріалу [10]. Поверхневі забруднення стають джерелами локальних напружень. Вони можуть ініціювати мікротріщини або змінювати оптичні параметри компонентів, зокрема прозорість та коефіцієнт заломлення. Додатково, фотохімічні процеси, що відбуваються за участю ультрафіолетового світла, можуть осаджувати забруднення прямо на оптичних поверхнях, впливаючи на їх спектральні характеристики [11].

Суб'єктивні експлуатаційні фактори. Суб'єктивні фактори експлуатації безпосередньо впливають на надійність оптичних систем і визначають ступінь реалізації їх технічного потенціалу. До них належить кваліфікація персоналу, що відповідає за експлуатацію та обслуговування. Недостатня підготовка може призвести до неправильної інтерпретації технічних параметрів, невчасного виявлення відхилень або порушення процедур [3].

Організація технічного обслуговування включає регулярність, повноту і якість виконання регламентних робіт. Загальна структура експлуатації також впливає на стан систем. Вона визначає, чи забезпечується правильне середовище для роботи, чи враховано графіки навантаження, умови зберігання та використання. Невідповідні методи організації, такі як надмірне навантаження або недотримання режимів, здатні спричинити поступове погіршення характеристик навіть без явних зовнішніх пошкоджень [3].

3. Методології та техніки аналізу якості оптичних систем.

Оцінка якості оптичних систем починається з аналізу оптичних і фізико-хімічних властивостей матеріалів. Основою є вимірювання показників поглинання, заломлення, розсіювання та інших характеристик взаємодії світла з речовиною.

Техніки 3D-вимірювань використовуються для геометричного аналізу деталей. Застосовуються тінювий метод, структуроване світло та триангуляція. Проблемою тінювого методу є недійсність теорії Кірхгофа-Френеля при великих товщинах об'єктів, що знижує точність [12].

Модуляційна передавальна функція (MTF) оцінює здатність системи передавати контраст на різних просторових частотах. Це кількісний стандарт для об'єктивного порівняння оптики, дозволяє виявити аберації та відхилення від ідеальної дифракційної межі [13].

Сенсори хвильового фронту, зокрема типу Шак-Гартмана, вимірюють аберації шляхом аналізу локальних відхилень хвильового фронту. Дані перетворюються на карту фазових похибок, дозволяючи оптимізувати систему під час збірки або експлуатації [12].

Перевага вимірювання хвильового фронту – можливість трасування джерела дефектів. На відміну від MTF, цей метод дозволяє виявити конкретний тип аберації та її локалізацію, що є ключовим для адаптивної оптики, мікроскопії, офтальмології та лазерних систем [14].

Методи аналізу розсіяного світла дозволяють виявити джерела внутрішніх паразитних відбиттів, які погіршують контраст та знижують точність вимірювань. Розсіяне світло виникає через мікродефекти, дифракцію та відбиття від другорядних поверхонь [15].

Комплексне оцінювання якості оптики передбачає поєднання кількох методів. MTF надає глобальну характеристику продуктивності, інтерферометрія мікропрофіль поверхонь, сенсори хвильового фронту – джерело аберацій, а аналіз розсіяного світла – зниження контрасту [13].

Якість оптичної системи визначається не лише макроскопічними параметрами. Для досягнення високої точності необхідно контролювати параметри на мікро- та нанорівні, що вимагає використання комплексного набору методів метрології [13-15].

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Метою роботи є розробка алгоритму і програмної реалізації системи оцінки якості оптичних систем за допомогою аналізу модуляційної передавальної функції (MTF) методом похилого краю з побудовою теплових карт та виявленням зниження якості у периферійних зонах..

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ДОСЛІДЖЕННЯ

Програмне забезпечення призначене для автоматизованого аналізу роздільної здатності та контрасту оптичних систем шляхом обчислення модуляційної передавальної функції (MTF) за методом похилого краю. Алгоритм виявляє на вхідному зображенні тестової міри спеціальні мішені (темні прямокутники), аналізує перехідну характеристику на їхніх межах та розраховує ключові показники якості зображення, такі як MTF10, MTF50 та контраст. Результати представляються у вигляді зображень, теплових карт та порівняльних графіків.

Для експериментальних досліджень було створено установку на базі камери Canon EOS R8 з об'єктивом Canon RF 15-30 мм F4,5-6,3 IS STM. Ця конфігурація дозволяє провести всебічний аналіз якості зображення, використовуючи різні типи тест-мішеней. Установка забезпечує гнучкість у тестуванні, дозволяючи оцінювати роздільну здатність, контраст, MTF та геометричні спотворення.

Усі знімки мішеней було збережено у форматі RAW, що забезпечує повне збереження даних з сенсора без втрати інформації.

Основними вхідними даними для системи є цифрове зображення, отримане з аналізованої оптичної системи. На зображенні зафіксована

тестова таблиця, яка містить сітку з темних прямокутних мішеней на світлому фоні. Кожна мішень повинна мати принаймні один чіткий, дещо нахилений край відносно осей піксельної матриці сенсора. Програмний комплекс приймає стандартні формати зображень, такі як TIFF, JPEG або PNG, які зчитуються за допомогою бібліотеки OpenCV.

На першому алгоритм аналізу здійснює автоматичне виявлення областей інтересу (ROI). Вхідне зображення перетворюється у відтінки сірого, після чого до нього застосовується бінаризація за методом Оцу для відділення темних мішеней від фону. Для усунення шумів та згладжування контурів виконуються морфологічні операції закриття та відкриття. Далі, за допомогою алгоритму пошуку контурів, ідентифікуються всі замкнені області. Контури, що відповідають певним критеріям (мінімальна площа, співвідношення сторін), класифікуються як прямокутні мішені.

Для кожної знайденої мішені виконується процедура розрахунку MTF. Спочатку в межах ROI за допомогою детектора країв Canny та імовірного перетворення Хафа визначається найдовша лінія, що відповідає похилому краю. Кут нахилу цієї лінії має знаходитись у заданому діапазоні (наприклад, від 1° до 89°), щоб уникнути аналізу горизонтальних або вертикальних країв.

Після ідентифікації лінії краю будується функція розмиття краю (Edge Spread Function, ESF). Для цього всі пікселі в ROI проєктуються на вісь, перпендикулярну до знайденого краю. Цей процес виконується з надлишковою дискретизацією (oversampling), що дозволяє отримати профіль краю з точністю меншою за розмір пікселя. Отриманий масив даних (ESF) є одновимірним представленням переходу від темної до світлої області. Далі ESF піддається згладжуванню за допомогою фільтра для зменшення впливу шуму, після чого нормалізується до діапазону значень від 0 до 1.

Наступним кроком є отримання функції розсіювання лінії (Line Spread Function, LSF), яка є похідною від згладженої ESF. LSF обчислюється як перша різниця сусідніх елементів масиву ESF і нормалізується таким чином, щоб її інтеграл дорівнював одиниці.

Модуляційна передавальна функція (MTF) розраховується як модуль швидкого перетворення Фур'є (FFT) від LSF – формула 1:

$$\text{MTF}(f) = |F\{LSF(x)\}|, \quad (1)$$

де $F\{\cdot\}$ – пряме перетворення Фур'є,

$LSF(x)$ – лінійна функція розмиття (нормована так, щоб площа під нею дорівнювала 1),

f – просторова частота.

Перед виконанням FFT до LSF застосовується вікно Ханна для зменшення спектральних витоків – формула 2:

$$\omega(n) = 0,5 \left(1 - \cos \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n}{N-1} \right) \right), \quad 0 \leq n \leq N. \quad (2)$$

де $\omega(n)$ – значення вікна в точці n ,
 N – загальна кількість точок сигналу.

Отриманий спектр нормалізується до одиниці на нульовій частоті.

На основі отриманої кривої MTF розраховуються її ключові характеристики: MTF50 та MTF10, що відповідають просторовим частотам, на яких амплітуда MTF спадає до 50 % та 10 % від максимального значення відповідно. Ці значення знаходяться шляхом лінійної інтерполяції. Додатково для кожної мішені обчислюється локальний контраст за формулою Мікельсона (формула 3):

$$C = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (3)$$

де I_{\max} – максимальна яскравість (інтенсивність),
 I_{\min} – мінімальна яскравість (інтенсивність).

На завершальному етапі всі знайдені мішені класифікуються за їхнім положенням на зображенні («центр», «край», «кут»). Це дозволяє порівнювати роздільну здатність у різних зонах кадру. Генеруються візуальні звіти: вихідне зображення зі значеннями MTF50 та контрасту; будуються 2D теплові карти для візуалізації просторового розподілу цих параметрів; створюється порівняльний графік кривих MTF для центральної та кутових мішеней.

Програмна реалізація виконана мовою Python.

Вихідне зображення зі значеннями MTF50 та вихідне зображення зі значеннями контрасту наведені на рисунках 1-2.

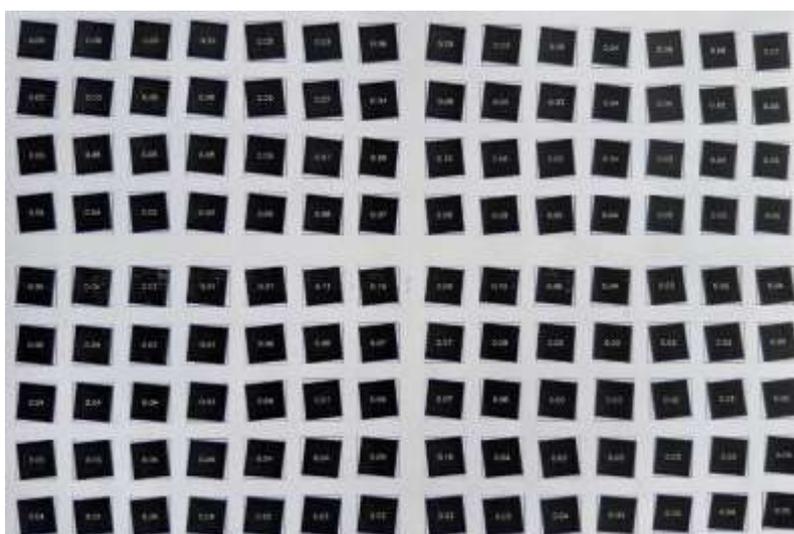


Рисунок 1 – Вихідне зображення зі значеннями MTF50

Якість зображення, отриманого об'єктива Canon RF 15-30 mm при фокусній

віддалі 20 мм і діафрагмі 8. Знімки виконувались у форматі RAW, що дозволило зберегти максимальну деталізацію без додаткових обробок.

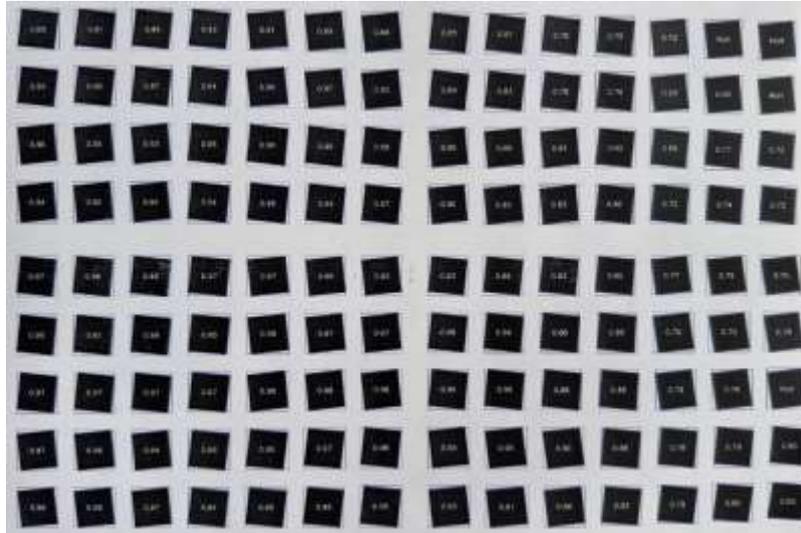


Рисунок 2 – Вихідне зображення зі значеннями контрасту

Криві розподілу MTF для центра зображення та кутів наведені на рисунку 3.

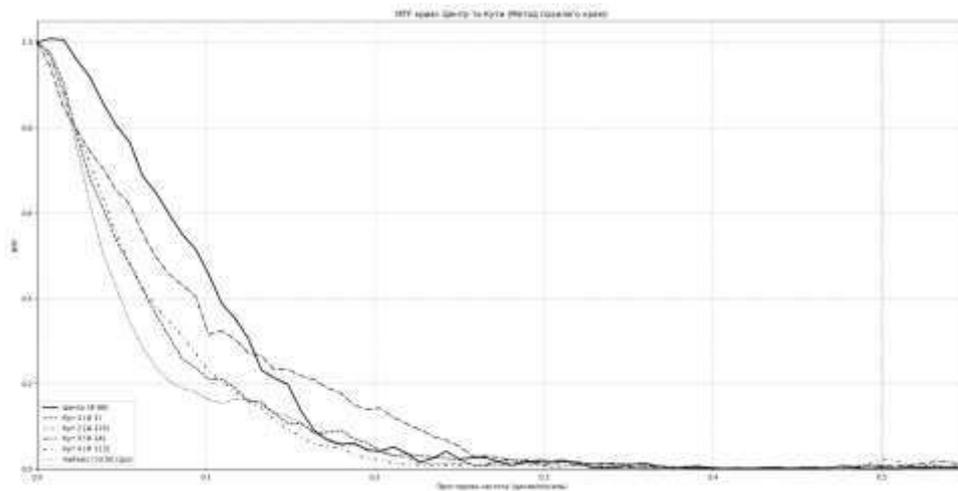


Рисунок 3 – Криві розподілу MTF для центру зображення та кутів

На графіку MTF (рис.3) суцільна лінія показує результати для центру зображення. Тут значення MTF є найвищим, досягаючи приблизно 1,0 на низьких частотах. Центральна частина об'єктива забезпечує найвищу різкість.

Кути зображення демонструють зниження якості. Це відбувається через кілька причин, таких як оптичні аберації, зокрема астигматизм, а також падіння освітлення по краях кадру, відоме як віньєтування, та спотворення поля зору.

На частотах від 0,1 до 0,2 циклів на піксель значення MTF для кутів падає до рівня 0,2-0,4. Межа 0,5 циклів на піксель позначена як найвища можлива якість. Жодна з кривих не перетинає цю межу, що відповідає Nyquist limit. Система не може чітко показати деталі, дрібніші за половину розміру пікселя – це фізичне обмеження.

Отримані результати є реалістичними для оцінки якості друку з роздільною здатністю 300 DPI, коли зображення знято на Cfnop у форматі RAW. Центр кадру очікувано виявився кращим за кути. Графік точно відображає природні оптичні властивості об'єктива та загальної системи камери.

Проаналізуємо побудовану теплову карту. Теплова карта MTF50 для того ж зображення наведена на рисунку 4.

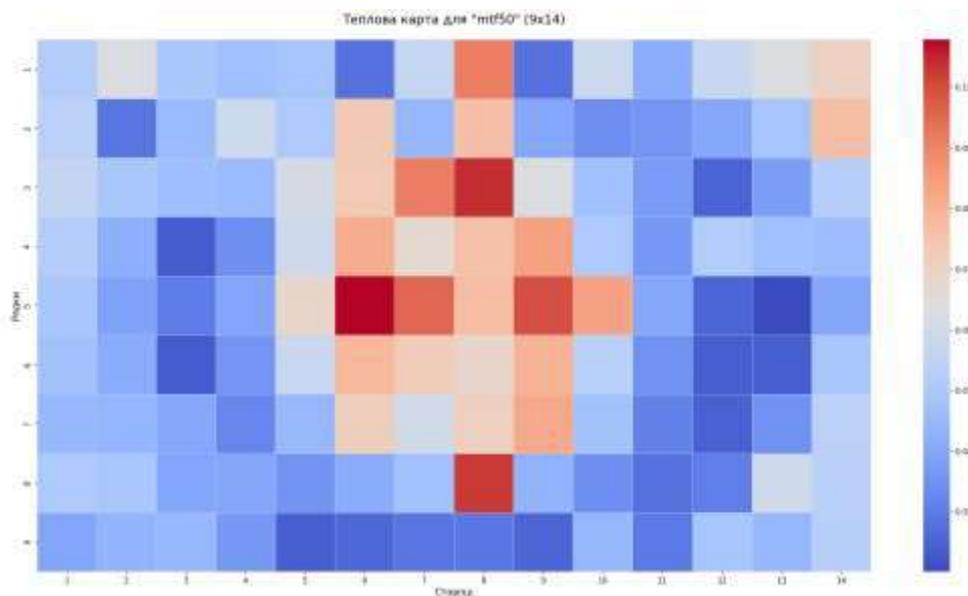


Рисунок 4 – Теплова карта MTF50 для того ж зображення

У центральній області зображення (стовпці 6-9, рядки 3-6) зафіксовані найвищі значення MTF50 – у межах 0,09-0,11 циклів на піксель. Це вказує на високу деталізацію в центрі кадру, що є типовим для будь-якої оптичної системи. Значення вище 0,1 вважаються дуже добрими для камер споживчого класу.

На периферії значення MTF50 знижуються до рівня 0,025-0,06 циклів на піксель. Найнижчі показники спостерігаються у кутах зображення, зокрема в ділянках стовпців 1-2 і 13-14 та рядках 1 і 9. Це узгоджується зі зменшенням контрастності у крайових зонах, яке було помітно й на відповідних MTF-кривих.

Об'єктив Canon RF 15-30 mm забезпечує відмінну якість у центрі кадру і зниження якості по краях – нормальне явище для ширококутних об'єктивів.

Проаналізуємо побудовану теплову карту контрасту. Теплова карта контрасту наведена на рисунку 5.

У центрі кадру (стовпці 3-9, рядки 3-7) контраст залишається стабільно

високим – понад 0,9. Це свідчить про якісну передачу тонових переходів і чітких меж у центральній частині зображення. Такі результати корелюють із високими показниками MTF50, що підтверджує добру різкість і контрастність.

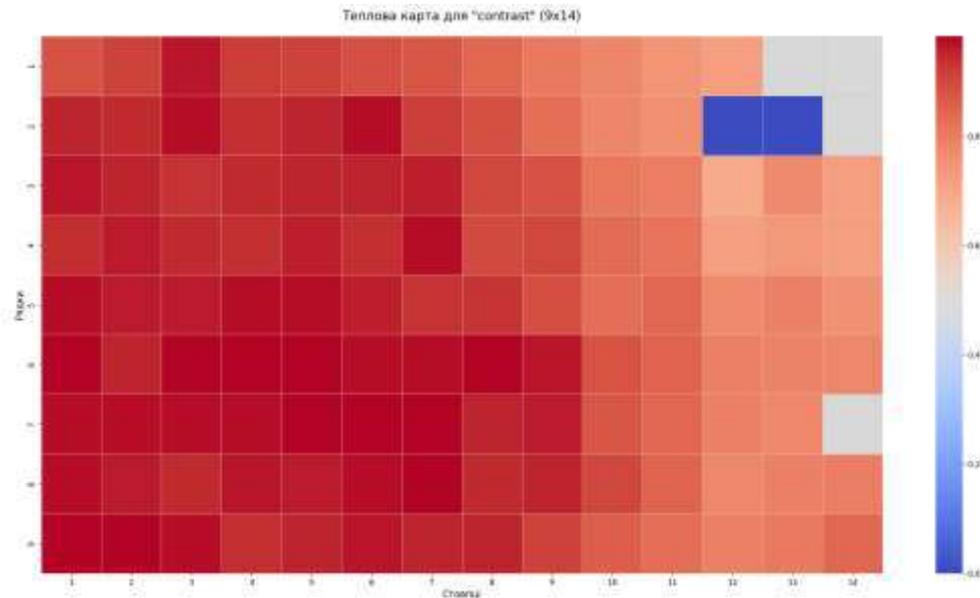


Рисунок 5 – Теплова карта контрасту (normalized contrast)

У правій верхній області (стовпці 12-14, рядки 1-3) спостерігається різке падіння контрасту, яке досягає нуля у точці (13,2). Це вказує на значне погіршення оптичних характеристик або проблеми з фокусуванням у цьому куті. Ймовірно, присутня невелика дисторсія або кривина поля.

Присутність освітлення праворуч на тепловій карті може пояснюватися тим, що ліва сторона оригінальної сцени могла бути краще освітлена, що призвело до більших перепадів яскравості та, відповідно, вищих значень контрасту.

ВИСНОВКИ

Алгоритм та його програмна реалізація дозволяють оцінювати якість оптичних систем за допомогою аналізу модуляційної передавальної функції (MTF) методом похилого краю. Він виявляє тестові мішені на зображенні, аналізує їхні межі та обчислює ключові показники, такі як MTF50, MTF10 і контраст.

Центр зображення характеризується найвищою якістю, про що свідчать високі значення MTF ($\approx 1,0$ на низьких частотах) та контрасту понад 0,9. У кутах зображення якість погіршується, що призводить до зниження MTF до 0,2-0,4.

Обмеження граничної деталізації зумовлені піксельною структурою сенсора, де межа Найквіста становить 0,5 циклів на піксель. Теплові карти чітко відображають розподіл якості: значення MTF50 у центрі коливаються від

0,09 до 0,11, а по краях падають до 0,025-0,06. Контраст у центрі перевищує 0,9, тоді як на краях він різко знижується, іноді до нуля.

Об'єктив Canon RF 15-30 мм (f/8, 20 мм) демонструє типову для ширококутних лінз картину – високу різкість у центрі і помітне падіння якості на периферії. Отримані результати відповідають фізичним обмеженням сенсора та оптики. Метод ефективний для оцінки роздільної здатності, зокрема при друку з роздільністю 300 DPI.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Практикум для самостійної роботи студентів з дисципліни (ДВВС) «Цифрова фотографія». URL: <https://geography.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2021/05/Telehuz-Digital-photo-book.pdf> (дата звернення: 5.05.2025).
- [2] Maximizing PCB Quality - Automated Optical Inspection (AOI). URL: <https://arkcircuits.com/blog/maximizing-pcb-quality-automated-optical-inspection-aoi-benefits-challenges/> (дата звернення: 5.05.2025).
- [3] Вплив різних факторів на показники надійності. URL: <https://learn.ztu.edu.ua/mod/resource/view.php?id=147412> (дата звернення: 5.05.2025).
- [4] Understanding Optical Specifications. URL: <https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/optics/understanding-optical-specifications/> (дата звернення: 5.05.2025).
- [5] Homogeneity and Scatter from Inclusions and Bubbles. URL: <https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/lasers/homogeneity-and-scatter-from-inclusions-and-bubbles/> (дата звернення: 5.05.2025).
- [6] 4 Challenges for Mechanical Integration of Optical Systems. URL: <https://www.simplexitypd.com/blog/4-challenges-and-solutions-for-mechanical-integration-of-optical-systems/> (дата звернення: 5.05.2025).
- [7] Mechanical method to reduce aberrations for a two-sided coating axisymmetric optical lens based on the specialized finite element method. URL: <https://opg.optica.org/abstract.cfm?uri=ao-63-2-429> (дата звернення: 5.05.2025).
- [8] Аберация оптичних систем. URL: <https://surl.lt/kexiio> (дата звернення: 5.05.2025).
- [9] Temperature, Relative Humidity, Light, and Air Quality: Basic Guidelines for Preservation. URL: <https://surl.li/ltvyzu> (дата звернення: 5.05.2025).
- [10] Degradation Rates of Plastics in the Environment. URL: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acssuschemeng.9b06635> (дата звернення: 5.05.2025).
- [11] Contamination Control Engineering Design Guidelines for the Aerospace Community. NASA Technical Reports Server (NTRS). URL: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19960044619/downloads/19960044619.pdf> (дата звернення: 5.05.2025).
- [12] Аналітичний огляд сучасних оптичних систем. URL: https://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2021/3_2021/28.pdf (дата звернення: 5.05.2025).

- [13] MTF Measurement: How to Measure Lens MTF Effectively? URL: <https://www.ci-systems.com/mtf-measurement-lens> (дата звернення: 5.05.2025).
- [14] Wavefront Sensing. URL: <https://www.axiomoptics.com/application/wavefront-sensing-applications/> (дата звернення: 5.05.2025).
- [15] What is Stray Light Analysis? URL: <https://lambdare.com/news/what-is-stray-light-analysis> (дата звернення: 5.05.2025).

AUTOMATED ANALYSIS OF RESOLUTION AND CONTRAST OF OPTICAL SYSTEMS

Oleksa, V. Undergraduate
Gumeniuk, L PhD, Associate Professor
Humeniuk, P. PhD, Associate Professor

Lutsk National Technical University / Ukraine

Abstract. The paper analyzes factors affecting the quality of optical systems during manufacture and operation. It has been determined that the quality of optical systems is determined not only by the technical characteristics of individual components, but also by a complex of factors covering design, production, assembly, and operation. Methodologies and techniques for analyzing the quality of optical systems are described. An algorithm has been developed and a software implementation of a system for evaluating the quality of optical systems has been performed using modulation transfer function (MTF) analysis with the sloping edge method, with the construction of heat maps and the detection of quality degradation in peripheral areas. It detects test targets in the image, analyzes their boundaries, and calculates key indicators such as MTF50, MTF10, and contrast. Experiments were conducted using a Canon EOS R8 camera with a Canon RF 15-30 mm lens in various configurations, and the effectiveness of the proposed method was tested. The image analysis showed the high quality of the optical system. The results obtained correspond to the physical limitations of the sensor and optics within the scope of the testing.

Keywords: quality of optical systems, modeling, image processing, algorithm.

Дата першого надходження
статті до видання
24.10.2025 р.

Дата прийняття статті до друку
статті після рецензування
09.11.2025 р.

Дата
оприлюднення
23.12.2025 р.

DOI: <https://doi.org/10.36910/4293-52779-2025-17-02-09>
UDC 004.896 (075.8)

¹ **Krestyanpol, L.**
PhD, Associate Professor
ORCID: 0000-0003-3617-7900
¹ **Cheb, D.**
student
² **Kaidyk, O.**
PhD, Associate Professor
ORCID: 0000-0002-3620-270X

¹ **Lesya Ukrainka Volyn National
University / Ukraine**
² **Lutsk National Technical
University / Ukraine**

CHALLENGES AND ISSUES IN THE USE OF CERTIFICATE FORMATS IN MODERN INFORMATION SYSTEMS: PATHWAYS TO ENHANCING CYBERSECURITY

Abstract: *This article provides an overview of the main digital certificate data formats used to ensure information security and authentication in computer networks. In particular, it examines the most common formats – X.509, PGP, OpenPGP, PKCS – their structure, areas of application, advantages, and disadvantages. The study analyzes how different formats affect compatibility between software tools and presents examples of each format's use in modern security systems. The material may be useful for cybersecurity professionals, system administrators, and software developers working with certificates.*

Keywords: *digital certificate, data formats, information security, authentication, cryptography.*

INTRODUCTION, PROBLEM STATEMENT

In today's interconnected digital world, ensuring the security of data and communication is of paramount importance. One of the key elements of modern cybersecurity infrastructures is the use of certificates, which are employed to authenticate users, devices, and services across various networks. Certificates, particularly in the context of public key infrastructure (PKI), provide a critical layer of trust, enabling encrypted communications, secure transactions, and the verification of identity.

These certificates are implemented in various formats, each serving specific purposes and requirements. Among the most common formats are X.509, PGP, OpenPGP, and PKCS, each with its own advantages, limitations, and areas of application. While these formats play a crucial role in ensuring digital security, they also pose challenges for integration, management, and scalability in modern IT environments.

Problem Statement. Despite the widespread adoption of certificate-based security mechanisms, organizations face significant challenges in managing and implementing different certificate formats effectively. Issues such as incompatibilities between systems, the complexity of certificate life cycle

management, difficulties in verifying certificate authenticity, and security risks related to key storage pose substantial obstacles for security administrators. Moreover, the increasing demand for scalability in diverse environments, such as the Internet of Things (IoT) and mobile devices, adds further complexity to the adoption and management of certificates.

Furthermore, with the advent of quantum computing and the evolving threat landscape, the current certificate formats may not be sufficiently resilient to emerging threats, necessitating the development of new standards. In light of these challenges, it is crucial to explore solutions to streamline certificate management processes, enhance compatibility across different platforms, and ensure that the integrity of certificate-based security is maintained.

MAIN ARTICLE

Overview of the Main Certificate Data Formats (X.509, PGP, OpenPGP, PKCS, and Others).

Certificates are a key element of modern security infrastructure. They are used to verify the authenticity of users, servers, and devices in networks and electronic communications. Different certificate formats have their own specific features, standards, and areas of application. Among the most common are X.509, PGP, OpenPGP, PKCS, and others. This section explores their characteristics, advantages, and disadvantages.

The X.509 format is the most widely used certificate standard within the context of Public Key Infrastructure (PKI). It is defined by ITU-T recommendations and is utilized in many protocols, including SSL/TLS, HTTPS, and S/MIME. An X.509 certificate contains information about the public key, the subject's name, the serial number, the validity period, and the digital signature of the certificate authority (CA). The X.509 structure is strictly formalized and based on ASN.1 and DER encoding format.

One of the main advantages of X.509 is its support in most modern systems and software. However, due to its complex structure and centralized trust model, this format has several drawbacks. In particular, certificate chain verification can be challenging, and managing trusted certificate authorities requires significant resources. Despite these limitations, X.509 remains the de facto standard for secure communication on the Internet [1].

PGP (Pretty Good Privacy) is a cryptographic system that ensures data confidentiality and authenticity, especially in the field of email communication. PGP certificates implement the "web of trust" concept, as opposed to the centralized PKI model. In this system, users sign each other's keys to indicate that they trust their authenticity. This creates a decentralized and flexible structure for interaction.

The main advantage of PGP is its decentralized approach to trust management. Each user independently decides whom to trust and can build their own trust networks. However, such flexibility often complicates automatic certificate verification, especially in corporate environments. Additionally, the interface and logic of PGP can appear complex to beginners [2, 3].

OpenPGP is an open standard based on PGP, defined in RFC 4880. It includes specifications for symmetric and asymmetric encryption, digital signatures, and key

management. OpenPGP supports many cryptographic algorithms, such as RSA, ElGamal, DSA, and others, making it highly flexible. Due to its open specification, there is a wide range of compatible software, such as GnuPG.

The use of OpenPGP is widespread among privacy-focused communities, as well as among journalists, activists, and IT professionals. The standard allows the creation of key pairs with long validity periods and supports the association of multiple identifiers with a single key. A drawback, similar to that of PGP, is the complexity of building and verifying trust chains in large-scale systems [4].

PKCS (Public-Key Cryptography Standards) is a set of standards developed by RSA Security to ensure the interoperability of cryptographic systems. Specifically, the PKCS#7 format (also known as CMS – Cryptographic Message Syntax) is commonly used to store signed and encrypted messages. PKCS#12 is designed to store private keys, certificates, and associated chains in a secure container.

Unlike X.509, PKCS formats are not only focused on certificate structure but also on key and message management. They are supported by most cryptographic libraries, such as OpenSSL, Windows Crypto API, and others. An important feature is the ability to store multiple certificates and keys in a single file, which is convenient for real-world deployment.

In article [5] discusses the challenges of cybersecurity certification for software. The authors address the importance of integrating security into the software development process and ensuring reliable certification for programs used in critical infrastructures. The study explores the difficulty of maintaining software security in an environment of rapidly evolving cyber threats.

The article [6] is a systematic literature review that analyzes the benefits and challenges of information security certification. The article evaluates different methods and approaches to certification in the context of managing the security of information systems, particularly in business environments. It discusses the challenges of implementing certification processes, their impact on organizational strategies, and the advantages of certification in enhancing trust and system security.

Other formats worth mentioning include PEM (Privacy Enhanced Mail), DER (Distinguished Encoding Rules), CER, and CRT. PEM and DER are used for encoding X.509 certificates. PEM is a text-based format that contains base64-encoded data with appropriate headers, while DER is binary. CER and CRT are simply alternative file extensions for X.509 certificates, which may be encoded in either DER or PEM format.

The significance of different certificate formats lies in their compatibility with software and protocols. For example, web browsers and servers support X.509 in PEM and DER formats, while email clients may work with PGP and OpenPGP. Many libraries allow conversion between formats, but understanding each format's specifics is important for maintaining security.

The certificate infrastructure is constantly evolving. With the advent of quantum computing, new cryptographic approaches are needed, which will also affect certificate formats. Active research in post-quantum cryptography is already laying the groundwork for future standards.

In conclusion, the choice of certificate format depends on the specific task, required level of security, software compatibility, and administrative convenience. In some cases, combining different formats and systems is advisable to achieve an optimal balance between security, flexibility, and scalability.

Challenges and Issues Related to the Use of Certificate Formats in Modern Information Systems.

In modern information systems, certificates play a critical role in ensuring authentication, confidentiality, and data integrity. However, despite their widespread use, certificate formats present a number of issues that complicate their implementation and maintenance. These challenges involve not only technical aspects but also organizational, legal, and human factors, creating a complex and dynamic landscape.

One of the main problems is the complexity of formats and the lack of standardization. For instance, even within the X.509 standard, different encoding methods (PEM, DER) can lead to incompatibility between systems. Additionally, some formats, such as PKCS#12, have limited support in certain environments, particularly open platforms. This creates difficulties for developers and administrators who are forced to work with multiple tools and formats simultaneously.

Another serious issue is the management of the certificate lifecycle. This includes certificate creation, distribution, renewal, and revocation. In large organizations, this can be especially challenging due to the high number of devices and users. If a certificate is not renewed or revoked in time, it can cause service disruptions or significant security breaches.

The complexity of certificate validation is also a challenge. In the case of X.509, for example, the entire trust chain must be verified, including intermediate and root certificate authorities. If an intermediate certificate is missing or misconfigured, validation can fail. This often occurs even in commercial solutions, especially during automatic certificate renewals.

Challenges also arise in managing revoked certificates. Although mechanisms such as Certificate Revocation Lists (CRLs) or the Online Certificate Status Protocol (OCSP) exist, they have limitations. For example, large CRLs can slow down validation, and OCSP servers may be unavailable, preventing real-time verification. This creates opportunities for man-in-the-middle attacks [7].

A significant problem is the security of private key storage. In formats such as PKCS#12, the private key and certificate are stored together, and if user or server files are not adequately protected, unauthorized key usage is possible. This is particularly relevant for mobile devices or poorly secured workstations.

Certificate formats often do not take into account the needs of emerging technologies, such as the Internet of Things (IoT). IoT devices have limited resources, and standard X.509 certificates may be too large for efficient use. This creates a demand for lighter, optimized formats, which have not yet become widely adopted, delaying the deployment of certificate-based security in such environments.

Another critical aspect is the human factor. In many cases, users do not understand the importance of certificates and may, for instance, ignore browser

warnings about invalid certificates. This makes even the most robust certification systems vulnerable to simple social engineering attacks. The need for education and improved digital literacy is becoming increasingly urgent.

Compatibility issues between different systems also remain pressing. For example, certificates generated in one system may not be supported in another due to differences in supported algorithms or formats. This is particularly relevant to interoperability between Windows and Linux, or between different implementations such as OpenSSL, GnuTLS, and others.

Legal aspects also complicate the use of certificates. Different countries have varying requirements for electronic signatures, trust in certification authorities, and the storage of cryptographic materials. For instance, some government services only recognize certificates issued by nationally accredited authorities, limiting the use of international solutions [8].

The introduction of certificate management automation, such as Let's Encrypt, mitigates some problems but introduces new risks. For example, malicious actors can automatically obtain certificates for phishing websites, reducing the effectiveness of a trust model based solely on certificate presence.

Another issue is the limited flexibility when changing encryption algorithms. For example, transitioning from SHA-1 to SHA-256 or from RSA to ECC requires updating certificates, verifying compatibility, and reconfiguring systems. In large-scale infrastructures, this can be a costly and risky process that takes significant time.

Finally, the emergence of quantum computing poses a threat to the integrity of current cryptographic algorithms. Most existing certificate formats are not designed to withstand quantum attacks. Therefore, preparations for a transition period and the development of new, quantum-resistant certificate formats are already necessary to face future threats.

RECOMMENDATIONS FOR IMPROVING THE USE OF CERTIFICATE DATA FORMATS IN CYBERSECURITY SYSTEMS

Centralized certificate management is a crucial aspect of ensuring security within organizations, especially in the face of modern cyber threats. The implementation of a Public Key Infrastructure (PKI) allows for the control of certificate issuance, renewal, and revocation processes, which, in turn, reduces the risk of certificate compromise and enhances overall security. It is essential for organizations to have a clear understanding of how certificates are used within their infrastructure and to ensure proper oversight of these processes. This includes not only technical aspects but also management practices that help maintain the integrity of the system.

1. Automating certificate-related management processes can significantly reduce the likelihood of human errors. Using specialized tools to automate certificate issuance, renewal, and revocation not only simplifies these tasks but also enhances the efficiency of the security team. This allows them to focus on more critical aspects of security, rather than routine operations. For instance, automated systems can provide timely reminders about certificate expiration dates, helping to avoid situations where certificates expire without proper renewal.

2. Regular auditing and monitoring of certificate status are critical for detecting potential threats. Implementing monitoring systems allows for timely responses to changes in certificate status, which can prevent possible attacks. This process also contributes to the creation of a transparent certificate management system, where all changes are documented and analyzed. For example, maintaining a change log can help detect anomalies in certificate usage and take prompt action to address them.

3. Training employees on certificate management increases awareness of security importance. Organizing regular training helps employees understand how to properly use certificates and avoid mistakes. This promotes the development of a security culture within the organization, where each employee is aware of their role in protecting information. Additionally, training can include incident response scenarios, enabling employees to act quickly in the event of a threat.

4. Ensuring integration between different certificate formats enhances system flexibility. This allows organizations to use various technologies without the need to redesign all processes. For example, organizations can integrate new solutions without disrupting existing systems, simplifying the implementation of new technologies.

5. It is also important to adapt certificate formats to the specific needs of various sectors. This will help use these technologies more effectively in different industries, such as finance, healthcare, or the public sector, where security requirements may significantly differ. Developing action plans for certificate compromise scenarios is an essential part of the cybersecurity strategy. Incident response mechanisms must be clearly defined and regularly tested to ensure their effectiveness in the event of a threat.

6. Collaboration with cybersecurity experts and solution providers enables the exchange of experience and the implementation of best practices. This can significantly enhance the level of protection within the organization. For instance, engaging third-party consultants can help conduct an independent audit of the certificate management system and identify weaknesses.

CONCLUSIONS

Certificate data formats are critical elements of modern cybersecurity, ensuring authentication, confidentiality, and data integrity in various information systems. An overview of the main formats, such as X.509, PGP, OpenPGP, PKCS, and others, reveals their diversity and specific uses across different fields. Each format has its own advantages and disadvantages, determining the choice based on specific needs and requirements.

However, several issues and challenges arise when organizations use certificates. These include the complexity of certificate management, compatibility issues between different systems, the security of private key storage, and the need to adapt certificates to new technologies like IoT or quantum computing. Addressing these aspects is crucial for maintaining a stable and secure infrastructure.

Recommendations for improving certificate usage, including centralized management, process automation, regular auditing and monitoring, employee

training, and ensuring integration between different formats, can significantly enhance security within organizations. Additionally, adapting certificates to the specific needs of different industries and collaborating with cybersecurity experts to refine certificate management practices is essential.

Thus, proper implementation and management of certificates are key to ensuring a high level of protection in information systems, minimizing risks, and guaranteeing reliable communications in the digital environment.

REFERENCES

- [1] Soiko, O. (2009). Protective features of passport documents and possible methods of their forgery (Textbook). International Center for Migration Policy Development.
- [2] Milánkovich, Á., & Tuma, K. (2023). Delta security certification for software supply chains. *IEEE Security & Privacy*, 21(6), 24-33.
- [3] Nikolskaia, K. Y. (2021). Analysis of the system of legal means of licensing and certification in the field of cybersecurity. In 2021 International Conference on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&QM&IS) (pp. 90-93).
- [4] Elmasri, R., & Navathe, S. (2021). *Fundamentals of database systems*. Pearson.
- [5] Hernandez-Ramos, J. L., Matheu, S. N., & Skarmeta, A. (2021). The challenges of software cybersecurity certification [Building security in]. *IEEE Security & Privacy*, 19(1), 99-102. <https://doi.org/10.1109/MSEC.2020.3037845>.
- [6] Hulshof, M., & Daneva, M. (2021). Benefits and challenges in information security certification – A systematic literature review. In B. Shishkov (Ed.), *Business Modeling and Software Design* (pp. 107-121). *Lecture Notes in Business Information Processing*, vol 422. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-79976-2_9.
- [7] Pocheptsov, H. H., & Chukut, S. A. (2018). *Information policy*. Knowledge Publishing House.
- [8] Kukarin, O. B. (2019). *Electronic document management and information protection: A textbook*. National Academy of Public Administration under the President of Ukraine. Retrieved from <http://academy.gov.ua/infpol/pages/dop/2/files/dcc74a43-a939-4314-8f50-f6b1e80cf498.pdf> (Accessed: April 6, 2025).

ПРОБЛЕМИ ТА ВИКЛИКИ ВИКОРИСТАННЯ ФОРМАТІВ СЕРТИФІКАТІВ У СУЧАСНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ: ШЛЯХИ ДО ПІДВИЩЕННЯ КІБЕРБЕЗПЕКИ

¹*Крестьянполь Л. Ю. Канд. тех. наук, доцент*

¹*Чиб Д.О. Здобувач освіти*

²*Кайдик О. Л. Канд. тех. наук, доцент*

¹*Волинський національний університет імені Лесі Українки / Україна*

²*Луцький національний технічний університет / Україна*

Анотація: у цій статті наведено огляд основних форматів даних цифрових сертифікатів (X.509, PGP, OpenPGP, PKCS тощо), які використовуються для забезпечення інформаційної безпеки та автентифікації в комп'ютерних мережах. Зокрема, розглядаються їх структура, сфери застосування, переваги та недоліки. У дослідженні аналізуються ключові виклики та проблеми, пов'язані з використанням сертифікатів у сучасних інформаційних системах. Серед них: складність керування життєвим циклом сертифікатів, питання сумісності між різними системами та форматами кодування (PEM, DER), безпека зберігання приватних ключів, а також необхідність адаптації форматів до потреб Інтернету речей (IoT) та постквантової криптографії. На підставі цього, в статті надано практичні рекомендації для вдосконалення процесів використання сертифікатів у системах кібербезпеки (централізоване керування, автоматизація процесів, регулярний аудит та навчання персоналу). Матеріал може бути корисним для фахівців з кібербезпеки, системних адміністраторів та розробників програмного забезпечення, які працюють із сертифікатами та прагнуть мінімізувати ризики, пов'язані з їхнім неправильним впровадженням та експлуатацією..

Ключові слова: цифровий сертифікат, формати даних, інформаційна безпека, автентифікація, криптографія.

Дата першого надходження
статті до видання
27.10.2025 р.

Дата прийняття статті до друку
статті після рецензування
18.11.2025 р.

Дата
оприлюднення
23.12.2025 р.

DOI: <https://doi.org/10.36910/4293-52779-2025-17-02-10>
УДК 621.6: 004.4: 004.9

Гуменюк П. О.
канд. техн. наук, доцент
ORCID: 0000-0002-6251-8548

Луцький національний
технічний університет / Україна

Гуменюк Л. О.
канд. техн. наук, доцент
ORCID: 0000-0002-7678-7060

Дерлюк С. О.
магістрант

ОЦІНКА МОЖЛИВОСТІ ВИНИКНЕННЯ КАВІТАЦІЇ В НАСОСАХ

Анотація: у роботі описано основні параметри, які впливають на процес кавітації – швидкість потоку, тиск та в'язкість рідини. Описано алгоритм, що враховує основні параметри роботи насоса (тиск, температура, об'ємна витрата) для автоматизації розрахунку кавітаційного запасу та виконано його програмну реалізацію на Python. Проаналізовано залежність коефіцієнта кавітації від температури для трьох рідин: води, етанолу та ацетону. Проаналізовано залежність коефіцієнта кавітації від швидкості руху різних рідин. Зроблено висновки про вплив температури і швидкості руху рідини на коефіцієнт кавітації.

Ключові слова: кавітація, насос, кавітаційний запас, моделювання, алгоритм, Python.

ВСТУП, ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Кавітація – це фізичне явище, яке характеризується утворенням, зростанням і подальшим колапсом бульбашок у рідині під дією різних зовнішніх впливів [1]. Вона супроводжується значними енергетичними ефектами, такими як підвищення температури і тиску, які можуть призводити до як позитивних, так і негативних наслідків [2].

Однією з основних проблем при проектуванні та застосуванні відцентрових насосів є можливість контролювати та обмежувати розвиток кавітації. Як правило, малоймовірно, що насос працюватиме в усьому робочому діапазоні без кавітації. Але слід розрізняти загальну присутність кавітації та момент, коли рівень кавітації стає занадто високим і починає впливати на продуктивність насоса та пошкоджувати насос.

Кавітація може виникати на багатьох різних рівнях, починаючи від невеликої групи бульбашок і закінчуючи насосом, який повністю заблокований великою кількістю пари («паровий замок»), що спричиняє повне руйнування напору. Багато насосів, що працюють у виробництві, працюють із кавітацією, але з рівнем, прийнятним для їх призначення.

Відцентрові насоси використовуються через їхню простоту та здатність генерувати відносно високе співвідношення тиску на короткій осьовій відстані. Загалом, відцентрові насоси використовуються скрізь, де необхідна будь-яка

кількість рідини для переміщення з одного місця в інше. Це стосується великої кількості застосувань і послуг, включаючи електростанції, водопровідні установки (тобто каналізаційні, дренажні або зрошувальні тощо), нафтопереробні заводи, хімічні заводи, металургійні комбінати, харчову промисловість, шахти, днопоглиблювальні та струменеві роботи, гідравлічну енергетику, послуги та майже всі судна, які рухаються паровим чи дизельним двигуном [3].

Кавітація на відцентрові насоси може мати серйозні наслідки, такі як пошкодження компонентів насоса, зниження продуктивності, підвищення витрат на обслуговування, шум та вібрація, нестабільна робота, зниження ефективності, складнощі у проектуванні та негативний економічний та екологічний вплив.

Методи виявлення кавітації включають аналітичні та інженерні підходи, кожен з яких має свої переваги та обмеження [4]. Важливо своєчасно виявляти та моніторити кавітацію для запобігання її негативному впливу, що дозволить покращити роботу та надійність відцентрових насосів.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Міжнародне енергетичне агентство (МЕА) повідомило, що 10 % світового споживання енергії припадає на насоси та насосне обладнання. Звідси зроблено висновок, що шляхом підвищення ефективності насосів і зниження їх енергоспоживання в цілому можна досягти реальних змін у глобальному споживанні енергії [5]. Але з іншого боку існують практичні обмеження, які накладаються на конструкцію насоса умовами процесу або середовищем, у якому насос найчастіше працює.

Щоб визначити, який рівень кавітації прийнятний для конструкції, необхідно визначити певний критерій, заснований на тривалості служби або продуктивності.

Процес кавітації можна розділити на три окремі етапи. Першим кроком є початкове утворення бульбашки, інша назва цієї частини – початок кавітації. Після початкового формування (або зародження) бульбашка переходить на наступний етап, а саме на етап зростання, де бульбашка зростатиме до певного розміру, що контролюється силами (тиском), що діють на бульбашку. Колапс бульбашки є основною відмінністю між справжньою кавітацією та переходом рідини до пари.

За механізмом утворення бульбашок у рідині кавітацію відцентрового насоса можна розділити на два основних типи – пароподібна кавітація та газова кавітація [6].

Пароподібна кавітація становить близько 70 % усієї кавітації [4] і є найпоширенішою формою кавітації, яка зустрічається на підприємствах.

Було проведено багато досліджень щодо виявлення кавітації у водяних насосах і водяних турбінах.

Більшість аналітичних методів зосереджено на впливі кавітації на продуктивність відцентрового насоса [7].

До інженерних методів можна віднести вібраційний метод [8], акустичну емісію [9], метод шуму [10], метод пульсації тиску [11] та інші.

Кожен з методів виявлення кавітації має свої переваги та обмеження. Важливо своєчасно виявляти та моніторити кавітацію для запобігання її негативному впливу, що дозволить покращити роботу та надійність відцентрових насосів.

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Метою роботи є розробка автоматизованого методу розрахунку кавітаційного запасу насоса для забезпечення його надійності.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ДОСЛІДЖЕННЯ

Основні параметри, які впливають на процес кавітації – це швидкість потоку, тиск та в'язкість рідини.

Швидкість потоку важлива, оскільки при великих швидкостях руху рідини тиск може опуститися до рівня, коли рідина може утворювати парові бульбашки. Це може статися, наприклад, коли рідина прискорюється або проходить через вузькі отвори.

Тиск також впливає на кавітацію. При зниженні тиску рідина може швидше досягти тиску насичення, за якого вона переходить у парову фазу. Це може статися, наприклад, при зменшенні тиску внаслідок збільшення висоти або через наявність вакууму у системі.

Для кращого розуміння цих процесів використовують кавітаційне число. Кавітаційне число допомагає розуміти, наскільки близько потік рідини до критичної точки, коли кавітація стає помітною [12].

Кавітаційне число описує співвідношення між тиском пари рідини, тиском у рідині та кінетичною енергією рідини.

Значення кавітаційного числа, при якому виникає кавітація, називають критичним. Коли кавітаційне число перевищує критичне значення, це означає, що існує ризик виникнення кавітації в системі.

Кавітаційне число (σ) обчислюється за формулою 1 [13]:

$$\sigma = \frac{P_{in} - P_{vapor}}{0,5 \cdot \rho \cdot V^2}, \quad (1)$$

де P_{in} – тиск на вході насоса (Па),

P_{vapor} – тиску парів рідини (Па),

V – швидкість руху рідини (м/с),

ρ – густина води ($\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$).

Критичне кавітаційне число може варіювати залежно від конкретної системи та умов експлуатації. Для кожного конкретного випадку важливо встановити критичне значення, щоб ефективно запобігти кавітації та максимізувати продуктивність гідродинамічних систем.

Кожен компонент кавітаційного числа має свій вплив на ймовірність виникнення кавітації.

1. Тиск (P_{in}):

– високий P_{in} зменшує ймовірність кавітації. Це пов'язано з тим, що для

утворення бульбашок кавітації потрібна різниця тисків між P_{in} і P_{vapor} – чим вище P_{in} , тим менша ця різниця тисків;

- низький P_{in} збільшує ймовірність кавітації. Це пов'язано з тим, що при низькому P_{in} бульбашкам кавітації легше утворюватися, оскільки різниця тисків між P_{in} і P_{vapor} більша.

2. Тиск пари (P_{vapor}):

- високий P_{vapor} збільшує ймовірність кавітації. Це пов'язано з тим, що при високому P_{vapor} бульбашкам кавітації легше утворюватися, оскільки їм потрібно менше різниці тисків, щоб подолати тиск пари;

- низький P_{vapor} зменшує ймовірність кавітації. Це пов'язано з тим, що при низькому P_{vapor} бульбашкам кавітації важче утворюватися, оскільки їм потрібна більша різниця тисків, щоб подолати тиск пари.

3. Густина рідини (ρ):

- висока густина зменшує ймовірність кавітації. Це пов'язано з тим, що при високій густині рідини бульбашкам кавітації важче утворюватися, оскільки їм потрібно подолати більшу інерцію рідини;

- низька густина збільшує ймовірність кавітації. Це пов'язано з тим, що при низькій густині рідини бульбашкам кавітації легше утворюватися, оскільки їм потрібно подолати меншу інерцію рідини.

4. Швидкість руху рідини (V):

- висока швидкість збільшує ймовірність кавітації. Це пов'язано з тим, що при високій швидкості рідини тиск в точці може знизитися до рівня тиску пари, що призводить до утворення бульбашок кавітації;

- низька швидкість зменшує ймовірність кавітації. Це пов'язано з тим, що при низькій швидкості рідини тиск в точці зазвичай не знижується до рівня тиску пари, що робить утворення бульбашок кавітації менш ймовірним.

Для оцінки можливості виникнення кавітації в насосах розробимо алгоритм, що враховує основні параметри роботи насоса (тиск, температура, об'ємна витрата) для автоматизації розрахунку кавітаційного запасу та виконаємо його програмну реалізацію на Python.

Для визначення залежності кавітаційного числа від вхідних параметрів скористаємось методом імітаційного (стохастичного) моделювання. В основі методу імітаційного (стохастичного) моделювання лежить генерація випадкових вибірок та аналіз їх поведінки.

Визначимо відповідні фактори, що впливають на кавітаційне число, такі як тиск, швидкість, температура тощо. Призначимо розподіл ймовірностей для кожного вхідного параметра. Ці розподіли описують ймовірність набути різних значень для кожного параметра.

Суть моделювання полягає у створенні випадкових наборів вхідних значень на основі заданих розподілів ймовірностей. Це створює велику кількість змодельованих сценаріїв.

Для кожного змодельованого сценарію (комбінації вхідних значень) розрахуємо відповідне кавітаційне число, використовуючи формулу розрахунку. Проаналізуємо отримані значення кавітаційного числа для всіх змодельованих сценаріїв.

Алгоритм побудови моделі та його програмна реалізація включає наступні кроки:

- імпортуємо бібліотеки `numpy` і `matplotlib.pyplot`,
 - визначаємо функцію `generate_random_params`, яка генерує випадкові значення тиску та швидкості на вході,
 - визначаємо функцію `cavitation_number`, яка обчислює число кавітації,
 - створюємо словник зі значеннями густини рідини та тиском пари для різних рідин,
 - визначаємо температури та відповідні тиски пари для кожної рідини.
- Для моделювання обираємо воду, етанол та ацетон.
- Встановлюємо значення для кількості генерацій, тиску на вході насоса та мінімальної та максимальної швидкості руху рідини.
 - Створюємо список `liquids` з даними про рідини та їх характеристиками.
 - Генеруємо випадкові параметри тиску та швидкості на вході.
 - Будуємо графіки розподілу значень тиску та швидкості.
 - Обчислюємо середні значення коефіцієнта кавітації для кожної рідини за допомогою циклу.
 - Будуємо графіки залежності коефіцієнта кавітації від температури для кожної рідини.

Вхідні параметри для моделювання обрано наступні:

- $N = 1000$ – кількість генерацій значень,
- $P_{in} = 200\ 000$ – тиск на вході насоса, Па,
- $V_{min} = 3$ – швидкість руху рідини, м/с,
- $V_{max} = 5$ – швидкість руху рідини, м/с.

3 точки зору імітації роботи насосу, генерація вхідних параметрів – тиску і швидкості – відбувається таким чином, щоб вони відповідали реальним умовам роботи системи, але при цьому були стохастичними, тобто мали випадковий характер.

Значення тиску P_{in} генеруються за допомогою нормального розподілу (`np.random.normal`). Нормальний розподіл часто використовується, коли дані можуть приймати значення від $-\infty$ до $+\infty$ і мають симетричний вигляд. У цьому випадку середнє значення тиску P_{in} визначає центр розподілу, а стандартне відхилення $P_{in} \cdot 0,025$ контролює ширину розподілу, тобто ступінь розсіювання від середнього значення.

Щодо швидкості V , вона генерується за допомогою рівномірного розподілу (`np.random.uniform`). Рівномірний розподіл використовується, коли кожне значення в діапазоні має однакову ймовірність виникнення. У цьому випадку мінімальна швидкість V_{min} та максимальна швидкість V_{max} визначають межі цього діапазону, і кожне значення в цьому діапазоні має однакову ймовірність вибору.

Таким чином, нормальний розподіл використовується для тиску, тому що він дозволяє врахувати можливість різних значень тиску, які можуть бути симетрично розподілені навколо середнього значення, в той час як рівномірний розподіл використовується для швидкості, оскільки він дозволяє випадковим чином вибирати значення з однаковою ймовірністю з певного діапазону.

Розподіл тиску та швидкості руху рідини наведено на рисунку 1.

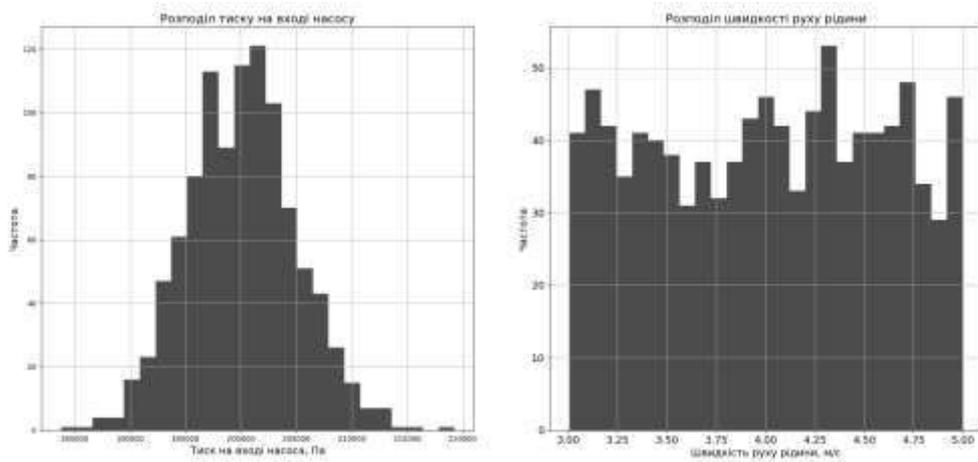


Рисунок 1 – Розподіл тиску та швидкості руху рідини

Залежність коефіцієнта кавітації від температури для різних рідин наведено на рисунку 2.

На основі отриманих даних проаналізуємо залежність коефіцієнта кавітації (σ) від температури (T) для трьох рідин: води, етанолу та ацетону.

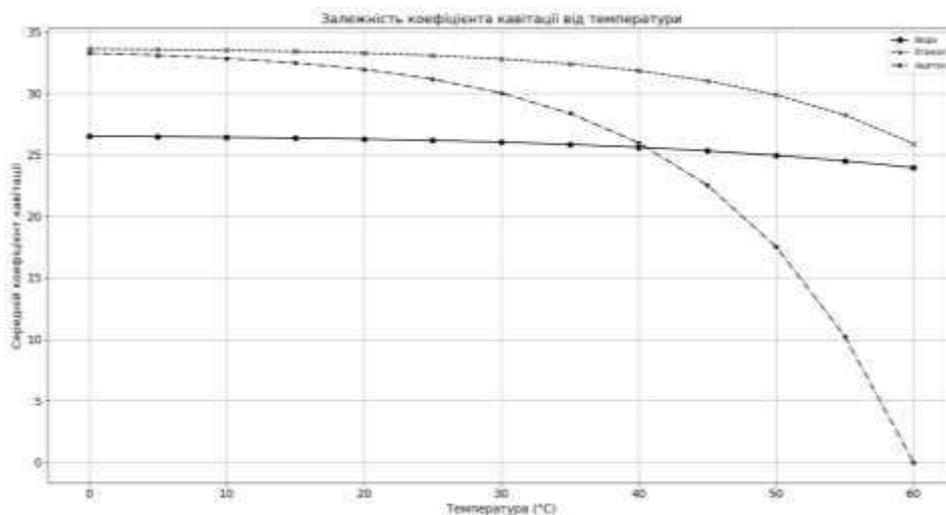


Рисунок 2 – Залежність коефіцієнта кавітації від температури для різних рідин

Для всіх трьох рідин (вода, етанол та ацетон) спостерігається чітка тенденція до зниження коефіцієнта кавітації зі зростанням температури. Це пов'язано з тим, що при нагріванні рідини молекули рухаються швидше, що призводить до зменшення сил зчеплення між ними.

Найбільш виражена залежність спостерігається для ацетону. Коефіцієнт кавітації ацетону при 60 °C майже в 33 рази менший, ніж при 0 °C. Це робить ацетон найбільш схильним до кавітації при низьких температурах.

Найменш виражена залежність спостерігається для води. Коефіцієнт кавітації води при 60 °С лише на 19% менший, ніж при 0 °С. Це робить воду найменш схильною до кавітації з трьох досліджених рідин.

Залежність коефіцієнта кавітації від швидкості руху рідини для води, етанолу та ацетону наведено на рисунках 3-5.

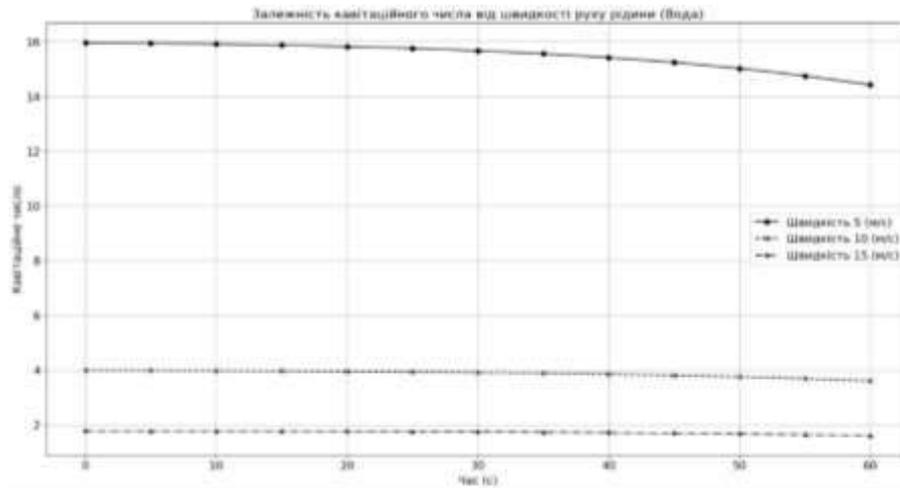


Рисунок 3 – Залежність коефіцієнта кавітації від швидкості руху рідини для води

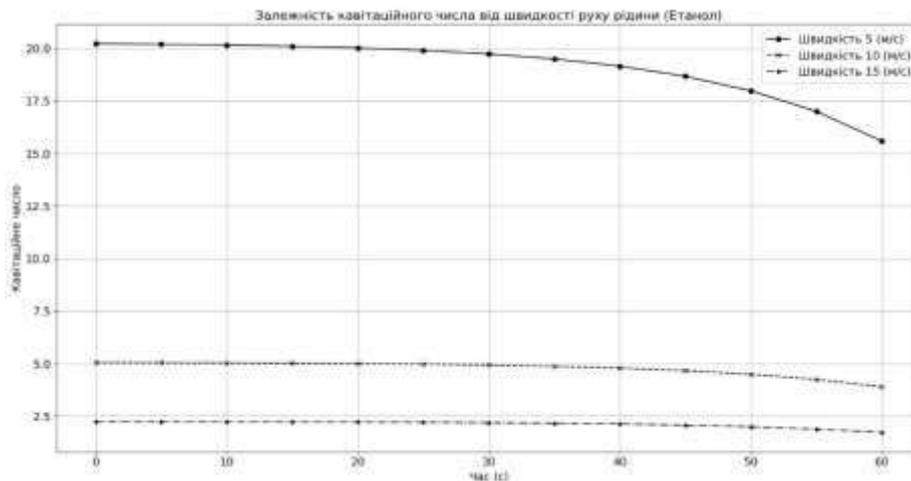


Рисунок 4 – Залежність коефіцієнта кавітації від швидкості руху рідини для етанолу

Проаналізуємо залежності коефіцієнта кавітації від швидкості руху рідини.

Коефіцієнт кавітації значно знижується зі зростанням швидкості руху води. Це пов'язано з тим, що при збільшенні швидкості руху води зростає її динамічний тиск, що робить рідину більш стійкою до утворення кавітаційних бульбашок.

Найбільш виражена залежність спостерігається при низьких температурах.

При 0 °С коефіцієнт кавітації води при швидкості 15 м/с майже в 9 разів менший, ніж при швидкості 5 м/с. Це робить воду більш схильною до кавітації при низьких температурах і високих швидкостях руху.

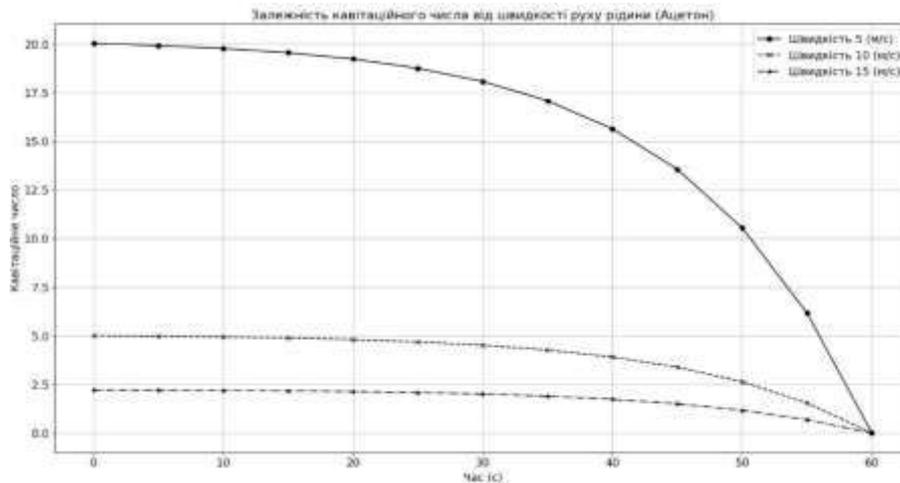


Рисунок 5 – Залежність коефіцієнта кавітації від швидкості руху рідини для ацетону

Найменш виражена залежність спостерігається при високих температурах. При 60 °С коефіцієнт кавітації води при швидкості 15 м/с майже в 2 рази менший, ніж при швидкості 5 м/с. Це робить воду менш схильною до кавітації при високих температурах.

Залежності коефіцієнта кавітації від швидкості руху рідини для етанолу, схожі з водою, але менш виражені.

Різниця в коефіцієнтах кавітації при різних швидкостях для етанолу менша, ніж для води при аналогічних температурах. Наприклад, при 0 °С різниця між коефіцієнтами при швидкостях 5 м/с і 15 м/с для води майже в 9 разів більша, ніж для етанолу.

Для ацетону вплив швидкості руху на коефіцієнт кавітації найбільш виражений при низьких температурах. Це можна побачити на прикладі 0 °С, де різниця в коефіцієнтах кавітації при швидкостях 5 м/с і 15 м/с майже в 2000 разів більша, ніж при 60 °С.

При високих температурах вплив швидкості руху стає значно менш вираженим.

ВИСНОВКИ

Таким чином, для оцінки можливості виникнення кавітації в насосах розроблено алгоритм, що враховує основні параметри роботи насоса (тиск, температура, об'ємна витрата) для автоматизації розрахунку кавітаційного запасу та виконано його програмну реалізацію на Python.

При збільшенні температури коефіцієнт кавітації σ , зменшується для всіх рідин. Це пояснюється зменшенням сил зчеплення між молекулами при підвищенні температури. Найбільш виражена залежність спостерігається для

ацетону, який стає більш схильним до кавітації при низьких температурах, у той час як вода мінімально змінює свій коефіцієнт кавітації при зміні температури.

Друга залежність стосується швидкості руху рідини. При зростанні швидкості руху коефіцієнт кавітації значно знижується для води, що пов'язано зі збільшенням динамічного тиску, що робить воду більш стійкою до кавітації. Найбільш виражена залежність спостерігається при низьких температурах, а вплив швидкості руху стає менш вираженим при високих температурах.

Порівнюючи етанол та ацетон з водою, залежність коефіцієнта кавітації від швидкості руху для етанолу подібна до води, але менш виражена. Вплив швидкості руху на коефіцієнт кавітації для ацетону найбільш виражений при низьких температурах і значно менш виражений при високих.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Taseidifar M., Antony J.J., Pashley R. Prevention of Cavitation in Propellers. *Substantia*. 2021, № 4, P.109-117.
- [2] Experimental and numerical investigations of tip vortex cavitation for the propeller of a research vessel, «The Princess Royal». URL: <https://surl.li/ubypdp> (дата звернення: 15.07.2025).
- [3] Impact of design parameters on the performance of centrifugal pumps. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978919306638> (дата звернення: 15.07.2025).
- [4] Custodio, know and understanding centrifugal pump. URL: <https://sea-connect.com/assets/img/uploads/pdf/fc6ec98d88ba46dc32bf483b7589ff07.pdf> (дата звернення: 15.07.2025).
- [5] Pumping Up Energy Efficiency. URL: <https://www.iea.org/events/10th-annual-global-conference-on-energy-efficiency> (дата звернення: 15.07.2025).
- [6] On cavitation in fluid power. URL: <https://surl.li/uladdr> (дата звернення: 15.07.2025).
- [7] Pump Handbook. URL: <https://turbosan.com/pdf/pumphandbook.pdf> (дата звернення: 15.07.2025).
- [8] A vibration cavitation sensitivity parameter based on spectral and statistical methods. URL: <https://surl.lt/hnxrsb> (дата звернення: 15.07.2025).
- [9] Guo F., Li W., Jiang P., Chen F., Liu Y. Deep Learning Approach for Damage Classification Based on Acoustic Emission Data in Composite Materials. *Materials*. 2022. 15 (12), p. 4270.
- [10] Detection of cavitation in situ operation of kinetic pumps: Effect of cavitation on the characteristic discrete frequency component. URL: <https://surl.lu/hteqyj> (дата звернення: 15.07.2025).
- [11] Zhang N., Li D., Gao B., Ni D., Li Z. Unsteady Pressure Pulsations in Pumps. A Review. *Energies*, 2023, 16, p. 150.
- [12] Toyran E., Rokhsar T.-F., Tzanakis I., Ghorbani M., Kosar A. Cavitating flow morphology determination in cavitation-on-a-chip devices based on local real-time pressure measurements. *Physics of Fluids*. 2025. Vol. 37.
- [13] Fundamentals of fluid mechanics. URL: <https://surl.lt/jpjsya> (дата звернення: 15.07.2025).

ASSESSMENT OF THE POSSIBILITY OF CAVITATION IN PUMPS

Humeniuk, P. PhD, Associate Professor

Gumeniuk, L. PhD, Associate Professor

Derlyuk, S. undergraduate

Lutsk National Technical University / Ukraine

Abstract. The paper describes the main parameters that affect the cavitation process: flow velocity, pressure, and fluid viscosity. An algorithm is described that takes into account the main parameters of pump operation (pressure, temperature, volumetric flow rate) for automating the calculation of cavitation margin, and its software implementation in Python is performed. The dependence of the cavitation coefficient on temperature for three liquids: water, ethanol, and acetone, is analyzed. The dependence of the cavitation coefficient on the velocity of various liquids is analyzed. Conclusions are made about the influence of temperature and fluid velocity on the cavitation coefficient.

Keywords: cavitation, pump, cavitation margin, modeling, algorithm, Python.

Дата першого надходження статті до видання	Дата прийняття статті до друку статті після рецензування	Дата оприлюднення
30.10.2025 р.	21.11.2025 р.	23.12.2025 р.

ЗМІСТ • CONTENTS

Денисюк В. Ю. Модуль точних мікропереміщень двокоординатного столика мікроскопа на базі біморфних п'єзоактуаторів та алгоритм його керування	4
Denysiuk, V. Module of Precise Micromovement of a Two-Coordinate Microscope Stage Based on Bimorphic Piezoactuators and its Control Algorithm	
Свирид Ю. В., Гуменюк Л. О., Гуменюк П. О. Класифікація алгоритмів побудови шляху робота з перешкодами	17
Svyryd, Yu., Gumeniuk, L., Humeniuk, P. Classification of Algorithms for Constructing a Path Working with Obstacles	
Пальчевський Б. О., Герасимчук Д. Ю. Автоматична діагностика стану свердла за декількома діагностичними ознаками	29
Palchevsky, B., Gerasymchuk, D. Automatic Diagnostics of Drill Condition by Several Diagnostic Signs	
Пономаренко С. В., Сапон С. П. Системи управління динамічними характеристиками шпиндельних вузлів. Огляд публікацій	44
Ponomarenko, S. Sapon, S. Control Systems for the Dynamic Characteristics of Spindle Units: A Review of Publications	
Михайлов А. О., Штефан Є. В., Михайлов О. В., Штерн М. Б. Моделювання процесів формоутворення виробів з порошкових та пористих матеріалів	63
Mikhailov, A., Shtefan, Ye., Mikhailov, O., Shtern, M. Simulation of Product Molding Processes from Powder and Porous Materials	
Маркіна Л.М., Сазик В.О. Моделювання та оптимальне керування процесом виробництва етанолу із застосуванням підходу у просторі станів	79
Markina, L., Satsyk, V. Modeling and Optimal Control of the Ethanol Production Process Using the Spatial State Approach	
Сільник М. Я., Фединець В. О. Системи автоматичного контролю технічного стану рухомого складу під час руху поїзда	92
Silnyk, M., Fedynets, V. Systems of Automatic Control of the Technical Condition of the Rolling Stock During the Movement of the Train	
Олекса В. Л., Гуменюк Л. О., Гуменюк П. О. Автоматизований аналіз роздільної здатності та контрасту оптичних систем	103
Oleksa, V., Gumeniuk, L., Humeniuk, P. Automated Analysis of Resolution and Contrast of Optical Systems	

Krestyanpol, L., Cheb, D., Kaidyk, O.

Challenges and Issues in the Use of Certificate Formats in Modern Information Systems: Pathways to Enhancing Cybersecurity

116

Крестьянполь Л. Ю., Чеб Д.О., Кайдик О. Л.

Проблеми та виклики використання форматів сертифікатів у сучасних інформаційних системах: шляхи до підвищення кібербезпеки

Гуменюк П. О., Гуменюк Л. О., Дерлюк С. О.

Оцінка можливості виникнення кавітації в насосах

124

Humeniuk, P., Gumeniuk, L., Derlyuk, S.
Assessment of the Possibility of Cavitation in Pumps

КОЛЕКТИВ АВТОРІВ

ТЕХНОЛОГІЧНІ КОМПЛЕКСИ

Науковий журнал

Комп'ютерний набір та верстка: Олег КАЙДИК
Любов КРЕСТЬЯНПОЛЬ

Зареєстровано Національною радою України з питань телебачення і радіомовлення, як суб'єкта у сфері друкованих медіа (рішення №1413 від 25 квітня 2024 року, ідентифікатор медіа R30-03928).
43018, м. Луцьк, вул. Львівська, 75

Підписано до друку __.12.2025 р. Формат 60x84/8.
Папір офсетний. Гарнітура Аріал.
Цифровий друк. Ум. друк. арк. 15,9. Наклад 50 пр.
Зам. No _____.

Віддруковано з готового оригінал-макета.

Видавництво – Видавничий дім «Гельветика»
65101, Україна, м. Одеса, вул. Інглєзі, 6/1
Телефони: +38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08
E-mail: mailbox@helvetica.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК No 7623 від 22.06.2022 р.



<https://eforum.Intu.edu.ua/index.php/tcomplex>