УДК 621.791.92

Лавріненко В.І., докт. техн. наук, професор
Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, lavrinen52@gmail.com
Солод В.Ю., канд. техн. наук, доцент
Дніпровський державний технічний університет МОН України, v_solod@ukr.net

СУЧАСНІ НАПРАЦЮВАННЯ В НАПРЯМКУ РОЗРОБКИ МЕТОДИК ПРОГНОЗУВАННЯ РУХУ РІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ, ЙОГО ЗНОШУВАННЯ ТА ШОРСТКОСТІ ОБРОБЛЕНОЇ ПОВЕРХНІ

Останнім часом зростає зацікавленість дослідників у розробці та визначенні методів завчасного прогнозування показників механічної обробки, насамперед зносу інструменту, або показників якості обробленої поверхні. В даній роботі нами зупинена увага саме на найсучасніших напрацюваннях, які є у наукових публікаціях за початок 2025 р. Вкажемо, що тут нас найбільше цікавили розробки у напрямку процесів виключно одноточкової токарної обробки, щоби оцінити подальшу можливість застосування таких методик для вже багатоточкового алмазно-абразивного інструменту.

Алмазна токарна обробка сервоприводом широко застосовується для обробки складних поверхонь вільної форми завдяки своїм детермінованим можливостям видалення матеріалу. Але властиві обмеження смуги пропускання поточної технології сервоприводу із повільним ковзанням призводять до значних похибок відстеження, що створює критичні проблеми для досягнення високої ефективності і точності виготовлення складних поверхонь. Для вирішення цього в роботі [1] пропонується нова модель на основі даних для модифікації траєкторії інструмента, яка прогнозує похибки відстеження осей сервоприводу і коректує траєкторію еталонного інструмента перед операціями різання, тим самим забезпечуючи ефективну компенсацію прямого зв’язку. Двомірна модель надточної нейронної мережі (2D-CNN) застосовується для визначення динамічних властивостей похибок відстеження, властивих осям сервоприводу, з особливим акцентом на ось вздовж напрямку глибини різання. Прогнозовані похибки відстеження слугують умовами компенсації прямого зв’язку для початкової еталонної траєкторії, генеруючи змінену траєкторію алмазного інструмента. Експериментальна перевірка на трикоординатному надточному верстаті засвідчила, що за допомогою запропонованого метода модифікації, похибка від пика до впадини (PV) для сегментів траєкторії відстежуваного інструмента зменшується з 1,29 мкм до 0,59 мкм, а середньоквадратична похибка (RMS) зменшується з 373 нм до 138 нм; похибка PV для профілів поперечного перерізу оброблених поверхонь вільної форми зменшується з 1,25 мкм до 0,65 мкм, а середньоквадратична похибка зменшується з 196 нм до 117 нм. В статті [2] для вирішення вказаної вище проблеми пропонується нова стратегія управління прямим зв’язком на основі даних частотної характеристики (FRD) для зміни траєкторії при алмазній токарній обробці сервоприводом інструмента. Ця стратегія застосовує FRD для проєктування фільтра кінцевої імпульсної характеристики, який апроксимує зворотну поведінку осі сервоприводу. Експерименти показують істотне підвищення точності форми оброблених поверхонь вільної форми, досягаючи 70% зниження похибки PV і 96% зниження похибки RMS у порівнянні з тими, які були отримані без контролера прямого зв’язку.

Надійна модель моніторингу зносу інструмента (TWM) необхідна для забезпечення точності даних в системі цифрового двійника і підвищення надійності оцінок стану зносу. Але існуючі моделі моніторингу в першу чергу розглядають обмеження процесу зносу в середньому сенсі і не гарантують суворої відповідності базовому фізичному механізму. Для вирішення цієї проблеми в [3] пропонується модель TWM, що інтегрує нейрону мережу на основі знань і даних (PINN) в інтелектуальний моніторинг цифрового двійника для процесу фрезерування. На основі розгляду монотонності процесу еволюції зносу потенціальний

механізм зміни швидкості зносу застосовується у якості жорсткого обмеження для уникнення втрат фізичної інформації. Вводиться фізично значиме відхилення знань для керівництва процесом навчання нейронної мережі, гарантуючи, що вихідні дані моделі будуть зіставлені з областю значень, суворо відповідній фізичному механізму, тим самим поліпшуючи фізичну узгодженість. Результати експериментів по фрезеруванню при трьох різних умовах обробки показують, що у порівнянні із традиційною нейронною мережою запропонована модель PINN демонструє більш високу точність. Крім того, після навчання оптимальної моделі в автономному режимі час відгуку від обробки даних в режимі онлайн до отримання вихідних даних по зносу складає 2 с, в той час як час обчислення моделі PINN складає мілісекунди. Модель PINN надає дані про знос інструмента у реальному часі для інтелектуальної системи моніторингу цифрового двійника з відгуком з малою затримкою і інтегрується із системою підтримки прийняття рішень для спрощення ітеративної оптимізації системи цифрового двійника, що дозволяє здійснювати інтелектуальне прогнозування і обслуговування.

В статті [4] представлено нову модель прогнозування шорсткості поверхні для процесу одноточкової алмазної токарної обробки, яка враховує відносну вібрацію між різальним інструментом і заготовкою. В попередніх моделях прогнозування відносна вібрація між різальним інструментом і заготовкою (або відносна вібрація інструмента-обробки) зазвичай вимірювалася до операції обробки і спрощувалася до суперпозиції декількох сталих простих гармонічних рухів, нехтуючи її змінами протягом всього процесу обробки. Більш того, лише деякі моделі одночасно враховували вплив відносної вібрації інструмента-обробки і властивостей матеріалу, які істотно впливають на шорсткість поверхні. В даному дослідженні розроблена система для збору внутрішніх сигналів верстата, які можуть точно відбивати стани вібрації, що змінюються під час процесу різки. Створена динамічна об’ємна модель імітації топографії для реалізації моделювання генерації поверхні в процесі із застосуванням зібраних внутрішніх сигналів. Для врахування впливу властивостей матеріалу побудована глибока мережа з довготривалою короткостроковою пам’яттю для оцінки змін в топографії поверхні. Експерименти для перевірки запропонованої моделі прогнозування шорсткості поверхні свідчать, що вона може стабільно і точно прогнозувати шорсткість поверхні з відносною похибкою прогнозування менш 10 % для всіх тестових експериментів.

Тобто наведене вище свідчить про те, що дослідники широко застосовують для методів прогнозування показників при токарній обробці модифіковані нейронні мережі з довготривалою короткостроковою пам’яттю.

Список посилань

1. Surrogate model-based tool trajectory modification for ultra-precision tool servo diamond turning / Hao Wu, YiXuan Meng, ZhiYang Zhao, ZhiWei Zhu, MingJun Ren, XinQuan Zhang, LiMin Zhu. P*recision Engineering*. Volume 93, May 2025, Pages 46-57.

2. Frequency response data-based feedforward control strategy for ultra-precision tool servo diamond turning of freeform surfaces / Hao Wu, YiXuan Meng, DingKun Meng, Rui Wang, ZhiWei Zhu, MingJun Ren, XinQuan Zhang, LiMin Zhu. *Mechanical Systems and Signal Processing*. Volume 232, 1 June 2025, 112706.

3. An intelligent tool wear monitoring model based on knowledge-data-driven physical-informed neural network for digital twin milling / Xiaohui Fang, Qinghua Song, Xiaojuan Wang, Zhenyang Li, Haifeng Ma, Zhanqiang Liu. *Mechanical Systems and Signal Processing*. Volume 232, 1 June 2025, 112736.

4. Genshen Liu, Kaiyang Xia, Zhongwei Li, Yuan-Liu Chen. Prediction of surface roughness in single-point diamond turning by combining machine tool internal signals and deep learning method. *Precision Engineering*. Volume 94, June 2025, Pages 113-129.