

Міністерство освіти і науки України
Національна Академія Наук Вищої Освіти України
Донбаська державна машинобудівна академія,
J.J.Strossmayer University of Osijek, Mechanical Engineering Faculty (Хорватія)
University of Zielona Góra (Польща)
Academy of Professional Studies Šumadija - Kragujevac (Сербія)
DAAAM International Vienna
Belgrade University Faculty of Mechanical Engineering in Podgorica (Montenegro),
Міжнародний університет безперервної освіти
ГО «Юнацький технопарк»
ПАТ «Новокраматорський машинобудівний завод»
ТОВ Cogum Group
Кафедра «Інноваційних технологій і управління»
Студентське наукове товариство з технологій машинобудування
Мала академія наук з науково-промислового профілю



МОЛОДА НАУКА - РОБОТИЗАЦІЯ І НАНО- ТЕХНОЛОГІЇ СУЧАСНОГО МАШИНОБУДУВАННЯ

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ

міжнародної молодіжної науково-технічної конференції
20 червня 2022 р.

За загальною редакцією
д-ра техн. наук, проф. С. В. Ковалевського and
Hon.D.Sc., Prof. Predrag Dašić

Краматорськ
ДДМА, 2022

Ministry of Education and Science of Ukraine,
National Academy of Higher Education of Ukraine,
Donbass State Engineering Academy (DSEA),
J.J. Strossmayer University of Osijek, Mechanical Engineering Faculty (Croatia),
University of Zielona Góra (Poland),
Academy of Professional Studies Šumadija - Kragujevac (Serbia),
DAAAM International, Vienna (Austria),
University of Montenegro, Faculty of Mechanical Engineering in Podgorica (Montenegro),
International University Continuing Education,
Public Organization "Junior Industrial Park",
JSC "Machine Building Plant Novokramatorsky",
Corum Group Ltd.,
Department of Innovative Technologies and Management,
Student Society Technology Engineering,
Small Academy of Sciences for Scientific and Industrial Profile



YOUNG SCIENCE - ROBOTICS AND NANO- TECHNOLOGY OF MODERN MECHANICAL ENGINEERING

COLLECTION OF SCIENTIFIC PAPERS
International Youth Scientific and Technical Conference
June 20, 2022

According to the general edition
Doctor of Technical Sciences, Prof. SV Kovalevsky and
Hon.D.Sc., Prof. Predrag Dašić

Kramatprsk
DSEA, 2022

УДК 621
М 75

Рецензенти - Reviewers :

Соколов В.І., д-р техн. наук, проф., Head of the Department of Mechanical Engineering and Applied Mechanics, Volodymyr Dahl East Ukrainian National University;

Sokolov V.I., Doctor of Technical Sciences, Prof., Head of the Department of Mechanical Engineering and Applied Mechanics of the Ukrainian National University of Volodymyr Dal;

Самотугін С.С., д-р техн. наук, проф., зав. каф. металорізальних верстатів ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет».

Samotugin S.S., Doctor of Technical Sciences, Prof., Head of the Department of Metal-Cutting Machines, Azov State Technical University.

Затверджено на засіданні вченої ради ДДМА (протокол № 9 від 27.05.2022 р.)

Approved at the meeting of the Academic Council of the DSEA (protocol № 9 from 27.05.2022)

М 75 Молода наука - роботизація і нано-технології сучасного машинобудування: збірник наукових праць Міжнародної молодіжної науково-технічної конференції, 20 червня 2022 р. / за заг. ред. С. В. Ковалевського, д-ра техн. наук., проф., and Hon.D.Sc., Prof. Predrag Dašić – Краматорськ : ДДМА, 2022. – 226 с.

Young science - robotics and nano-technologies of modern mechanical engineering: a collection of scientific papers of the International Youth Scientific and Technical Conference, June 20, 2022 / for general. ed. S.V. Kovalevsky, Dr. Tech. Science, Prof., and Hon.D.Sc., Prof. Predrag Dašić - Kramatorsk: DSEA, 2022. - 226 p.

ISBN 978-966-379-982-7

У збірнику опубліковано матеріали праць аспірантів, магістрантів, студентів і учнів – членів Малої академії наук з науково-промислового профілю. Пропонуються перспективні ідеї, аналіз конкретних проблемних питань автоматизації машинобудування, створення робочих функціональних поверхонь деталей машин; подано розробки, готові до впровадження. Призначений для використання в практичній діяльності студентів, магістрів ВНЗ і фахівців машинобудівних підприємств.

The collection contains materials of works of graduate students, undergraduates, students and pupils - members of the Small Academy of Sciences in science and industry. Perspective ideas, the analysis of concrete problematic questions of automation of mechanical engineering, creation of working functional surfaces of details of cars are offered; ready-to-implement developments are submitted. It is intended for use in practical activity of students, masters of high school and experts of the machine-building enterprises..

ISBN 978-966-379-982-7

УДК 621
© ДДМА, 2022

36. **Romanchenko S.P.** (*Ukraine, Kramatorsk, DSEA*). **GALVANIC MECHANICAL CHROME CHROME AS A METHOD OF INCREASING THE WEAR RESISTANCE OF WORKING SURFACES OF PARTS.** 157
37. **Romanchenko S.P.** (*Ukraine, Kramatorsk, DSEA*). **METHOD OF LOCAL STRENGTHENING OF STEEL PARTS.** 161
38. **Rudakova K.A.** (*Ukraine, Kramatorsk, DSEA*). **FEATURES OF FORMATION OF THE TRAINING TRACTOR OF THE TOOL IN THE WORKING ZONE OF THE HEXAPOD.** 163
39. **Самсонова Т.М.** (*Україна, Слов'янськ, Відокремлений структурний підрозділ «Слов'янський фаховий коледж Національного авіаційного університету»*). **ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПРИ ВИКЛАДАННІ ЕКОНОМІКИ.** 165
40. **Сапон С.П., Космач О.П., Власюк В.А.** (*Україна, Чернігів, Національний університет «Чернігівська політехніка»*). **ПОКАЗНИКИ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ, ЯК ІНСТРУМЕНТ МОНІТОРИНГУ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ШПИНДЕЛЬНИХ ВУЗЛІВ.** 169
41. **Сидюк Д.М., Ковалевський С.В.** (*Україна, Краматорськ, ДДМА*). **ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РОЗМІРНИХ ПАРАМЕТРІВ В ЖИТТЕВОМУ ЦИКЛІ ВИРОБІВ МАШИНОБУДУВАННЯ.** 177
42. **Сидюк Д.М., Ковалевський С.В.** (*Україна, Краматорськ, ДДМА*). **СИГНАТУРНИЙ ПІДХІД ДЛЯ УПРАВЛІННЯ ЖИТТЕВИМ ЦИКЛОМ ВИРОБІВ МАШИНОБУДУВАННЯ.** 180
43. **Соколова О.А., Вислоух С.П.** (*Україна, Київ, НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»*). **ДО ПИТАННЯ ТОЧНОСТІ ПОЗИЦІОНУВАННЯ ПРОМИСЛОВИХ РОБОТІВ.** 186
44. **Трембач І.О.** (*Україна, Краматорськ, ПрАТ «НКМЗ», ДДМА*), **Гринь О. Г.** (*Україна, Краматорськ, ДДМА*). **МУЛЬТИФАЗНА СТРУКТУРА МАНГАНОВОЇ СТАЛІ – ЗАПОРУКА ПІДВИЩЕННЯ ЇЇ ЗНОСОСТІЙКОСТІ.** 194
45. **Третяк В.В., Ряполов В.Д., Приходько С.О., Шульга М.О.** (*Україна, Харків, НАУ (ХАІ)*). **ПРОГРАМНИЙ РОЗРАХУНОК ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ДЛЯ ШТАМПУВАННЯ ЛИСТОВИХ ДЕТАЛЕЙ НА ПРЕС-ГАРМАТІ.** 198
46. **Turkenich I.S.** (*Ukraine, Kramatorsk, DSEA*). **METHOD OF EDITING NON-RIGID PLANE DETAILS.** 205
47. **Фраймович А.В., Кравцова Д.Ю., Бондар О.В.** (*Україна, Кривий Ріг, КНУ*). **ДОСЛІДЖЕННЯ СКЛАДНОСТІ СТВОРЕННЯ ЗАСТОСУНКУ МООВОЮ ПРОГРАМУВАННЯ ПАСКАЛЬ ДЛЯ РОЗРАХУНКОВИХ ПОТРЕБ ІНЖЕНЕРА-МЕХАНІКА.** 208
48. **Чаус О.С., Мартиненко І.М., Бурик І.П.** (*Україна, Конотоп, Конотопський інститут СумДУ*). **СИНТЕЗ ТА ФАЗОВИЙ СКЛАД** 212

Сапон С.П., Космач О.П., Власюк В.А. (Національний університет «Чернігівська політехніка», м. Чернігів)

ПОКАЗНИКИ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ, ЯК ІНСТРУМЕНТ МОНІТОРИНГУ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ШПИНДЕЛЬНИХ ВУЗЛІВ

Основною концепцією верстатів нового покоління є можливість інтелектуального моніторингу та керування його вузлами. Застосування показників енергоспоживання, як інструменту моніторингу стану шпиндельних вузлів дозволяє здійснювати такий моніторинг не втручаючись в конструкцію шпиндельного вузла. В роботі представлено огляд можливостей застосування даних про споживану потужність та силу струму приводного двигуна в якості інструментів моніторингу стану та управління інтелектуальними шпиндельними вузлами.

The ability to intelligently monitor and control its components is the basic concept of the new generation of machine tools. The use of energy consumption indicators as a tool for monitoring the condition of spindle units allows such monitoring without interfering with the design of the spindle unit. An overview of the possibilities of using data on power consumption and current of the drive motor as tools for monitoring the condition and control of intelligent spindle units is presented in the paper.

Постановка проблеми. Інтелектуальні шпинделі є основними компонентами нового покоління SMART-верстатів, які розширюють їх функціональні можливості в напрямку вимірювання і локальної обробки даних про їхні параметри у відповідності до парадигми кібер-фізичних систем у рамках Industry 4.0. Основною концепцією верстатів нового покоління є можливість інтелектуального моніторингу та керування його вузлами. Відповідно створення і дослідження функціональних можливостей інтелектуальних шпиндельних вузлів найближчим часом будуть актуальними.

Інтелектуальні шпиндельні вузли передбачають інтеграцію різних датчиків, які здатні визначати динамічні характеристики, експлуатаційні параметри, стан шпинделя та процесу обробки. Особливості процесів механічної обробки різанням, конструкція сучасних високошвидкісних шпиндельних вузлів вносять певні обмеження та вимагають компактної інтеграції і оптимального розміщення датчиків, приводів, контролерів у структурі інтелектуальних шпиндельних вузлів. Застосування показників енергоспоживання, як інструменту моніторингу стану шпиндельних вузлів дозволяє здійснювати такий моніторинг не втручаючись в конструкцію шпиндельного вузла.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Запропонована в роботі [1] енергетична модель технологічної системи операції може бути застосована як основа методики оцінки енергоефективності основних та допоміжних

процесів, що реалізуються виконавчими вузлами та системами обробних верстатів, зокрема шпиндельними вузлами також.

В монографії [2] розроблена методика функціонального діагностування енергоефективності асинхронних електродвигунів за результатами вимірювань експлуатаційних параметрів (струмів і напруг). Показано, що запропонована методика може застосовуватися в системах моніторингу, функціонального діагностування, а також для проведення порівняльної оцінки енергоефективності різних типів асинхронних електроприводів, зокрема для оцінки енергоефективності приводів шпиндельних вузлів металорізальних верстатів.

Запропонована в роботі [3] модель для оцінки і прогнозування теоретичного споживання енергії в процесі фрезерування може бути прикладом підходу для розробки моделей енергоспоживання інших процесів обробки.

Формулювання раніше невирішених частин загальної проблеми. Слід відмітити, що кожен верстат, кожен його вузол або система мають свої індивідуальні особливості. Не існує двох абсолютно однакових за всіма параметрами верстатів або шпиндельних вузлів. Це зумовлено анізотропією властивостей матеріалів, з яких вони виготовлені, розсіюванням показників точності обробки базових та виконавчих поверхонь деталей верстатів, похибками складання, умовами і режимами експлуатації тощо. Паспортні результати випробувань верстата на точність абсолютно достовірні лише в умовах, де верстат випробовувався. Ці показники в процесі експлуатації еволюціонують. Причому не всі абсолютно прогнозовано і далеко не лінійним чином. Модульний принцип компонування верстатів дозволяє комбінувати і створювати верстати під конкретні вимоги і умови обробки. Причому це повинно здійснюватись максимально швидко. Тому вкрай важливо мати максимально достовірну інформацію про стан вузла (модуля), його функціональні можливості, показники і характеристики. Відповідно для максимально точного діагностування стану вузла верстата потрібен комплексний підхід, який ґрунтується на інтеграції сигналів з різних вимірювачів та датчиків. В повній мірі це відноситься до шпиндельних вузлів, як ключового елемента в процесі формоутворення поверхонь.

Метою роботи є огляд можливостей і доцільності застосування показників енергоспоживання, таких як споживана потужність та сила струму приводного двигуна в якості інструментів моніторингу стану та управління інтелектуальними шпиндельними вузлами та процесами обробки різанням.

Відомо, що методи вимірювання динамічних характеристик та експлуатаційних параметрів шпиндельних вузлів поділяються на прямі та непрямі. Прямі методи вимірювання мають більш високу точність, тоді як непрямі методи менш складні, але більш придатні для моніторингу стану та інтеграції в системи управління інтелектуальними шпиндельними вузлами.

[4]. Існує багато непрямих методів моніторингу вібрацій, різального інструменту, стану підшипників шпindelного вузла, точності, якості, продуктивності обробки різанням. Практично всі вони засновані на вимірюванні сил різання чи інших фізичних величин, отриманих як похідні від сил різання. Серед таких можна назвати значення струму/потужності двигуна приводу головного руху, згин/переміщення інструментів і крутний момент. Такі системи моніторингу, засновані на тому принципі, що спрацювання різального інструменту, коливання припуску і характеристик заготовки, вібрації, несправності шпindelного вузла тощо в переважній більшості викликають збільшення відповідних складових сили різання. А поломки різального інструменту проявляються у вигляді розривів або імпульсних змін в одній або кількох компонентах сили різання [4, 5].

Регенераційні автоколивання і вимушені вібрації, зумовлені технологічним навантаженням безпосередньо впливають на якість оброблюваної поверхні, зниження терміну служби різального інструменту та експлуатаційного ресурсу шпинделя. Такі коливання зазвичай вимірюються акселерометрами, які, залежно від технологічних особливостей процесу обробки, закріплюються на заготовці або корпусі шпинделя. Вібрації та сили різання безпосередньо пов'язані. А зміна зусилля різання безпосередньо відображається на величині споживаної потужності двигуном приводу головного руху верстата. Тому вимірювання показників електроспоживання можна застосовувати для визначення зміни зусиль різання і як непрямий спосіб моніторингу та керування вібрацією та іншими процесами в технологічній оброблюючій системі.

Головна перевага моніторингу вібрацій на основі вимірювання струму або споживаної потужності двигуна полягає в тому, що метод не потребує датчиків вібрації, а вимірювальний апарат не порушує процес обробки. В роботах [6, 7] за допомогою вимірювання струму двигуна приводу шпинделя здійснювався моніторинг вібрацій в процесах фрезерування. Для покращення результатів моніторингу вібрації сигнали струму/потужності двигуна можна об'єднувати з іншими сигналами, наприклад такими як акустична емісія [8]. Незважаючи на переваги сигналів струму/потужності, важко за допомогою їх забезпечити моніторинг вібрації в реальному часі через невелику затримку в часі між появою вібрацій та отриманими сигналами. Крім того, підвищені температури, властиві електричним двигунам, змінюють сигнал споживаної потужності, що може вплинути на точність виявлення вібрацій [4].

Основною перевагою використання струму/потужності двигуна приводу шпindelного вузла в якості показників для моніторингу стану інструменту, є те, що вони не потребують втручання в конструкцію різального інструменту, розміщення чутливих елементів в зоні різання або переривання процесу різання [9]. Зокрема в роботах [10, 11] встановлено кореляційну залежність між зносом інструменту та струмом двигуна приводу шпинделя в процесі фрезерування. Окрім зносу інструменту за струмом

двигуна приводу шпинделя можна встановити поломку інструменту [12]. В роботі [13] розроблено модель моніторингу стану різального інструменту шляхом об'єднання сигналів кількох датчиків на основі нейронної мережі. Одним із входів запропонованої моделі був сигнал струму приводу шпинделя. На користь застосування струму/потужності двигуна приводу шпиндельного вузла в якості показників моніторингу стану різального інструменту свідчить можливість сучасних систем ЧПУ надавати доступ до внутрішніх сигналів, таких як потужність двигуна та струм. Це забезпечує можливість інтеграції систем моніторингу стану різального інструменту як модулів у системи ЧПУ.

Показники енергоефективності дозволяють оцінити корисне (ефективне) використання енергетичних ресурсів технологічним обладнанням в цілому та його окремими вузлами для досягнення необхідних показників точності, продуктивності. Вибір показника енергоефективності залежить від характеру роботи обладнання, його технологічних та конструктивних особливостей тощо.

Основний показник енергоефективності – питома витрата електроенергії E_y визначається:

$$E_y = \frac{W}{n}$$

де W – повна витрата електроенергії обладнанням при виготовленні одиниці продукції, кВт год;

n – обсяг виготовленої продукції (число деталей), шт.

За коефіцієнтом корисної дії (ККД) можна визначити енергетичні витрати обладнання та його вузлів та систем. ККД електроприводу шпиндельного вузла визначають згідно виразу:

$$\eta = \frac{W_{e.\phi}}{W_{\Pi}}$$

де $W_{e.\phi}$ – споживана потужність електроенергії приводом ШВ в процесі формоутворення за цикл обробки деталі-представника, кВт год;

W_{Π} – повна споживана потужність електроенергії приводом ШВ за цикл обробки, кВт год.

При випробуваннях інтелектуальних шпиндельних вузлів, як окремих модулів технологічного обладнання, коректніше і зручніше визначати не $W_{e.\phi}$, а W_{xx} - споживану потужність електроенергії шпиндельним вузлом на холостому ході:

$$\eta = 1 - \frac{W_{xx}}{W_{\Pi}}$$

де W_{xx} – споживана потужність електроенергії шпиндельним вузлом на холостому ході, кВт год.

Зниження ККД приводу шпиндельного вузла при незмінних умовах обробки та величинах технологічних навантажень може свідчити про зростання витрат електроенергії в режимі холостого ходу W_{xx} , коли обробка не здійснюється. Причинами цього можуть бути додаткові витрати енергії, зумовлені підвищеним тертям, граничним зношуванням, пружними коливаннями, тепловими процесами тощо.

Таким чином, енергоефективність обладнання, його вузлів та систем, процесів механічної обробки оцінюються шляхом реєстрації електричного споживання всіх можливих елементів, які впливають на показники функціонування за визначений проміжок часу, який відповідає основному та допоміжному часу на обробку заготовки певної довжини.

В науково-дослідній роботі [14] виконувались дослідження електричного споживання основних елементів прецизійного токарного верстата з шпинделем на гідравлічних опорах (рис. 1.)



Рис. 1 – Схема електричного споживання основних елементів верстата з шпиндельним вузлом з гідравлічними опорами: 1 – електрошафа верстату; 2 – електропривод головного руху (постійного струму); 3 – електродвигун примусового повітряного охолодження; 4 – електродвигун для прокачування мастильно-охолоджуючої рідини (МОР); 5 – електродвигун прискореної подачі; 6 – місцеве освітлення; 7 – електродвигун насосної установки; 8 – електродвигун теплообмінника

На рис. 2 схематично наведено споживання потужності приводом головного руху шпинделя, приводом насоса гідравлічної системи живлення шпиндельних опор, та приводом прискореної подачі при обробці.

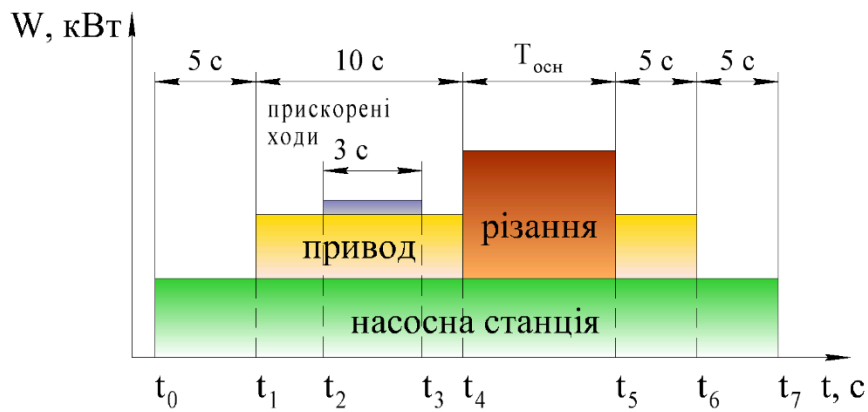


Рис. 2. – Часова діаграма споживаної потужності за цикл обробки однієї заготовки

Послідовність виконання технологічних прийомів при обробці: t_0 – початок, включається насос гідравлічної системи; t_1 – включається привод головного руху та настраюються потрібна частота обертів шпинделя; $t_2 - t_3$ – інтервал часу роботи привода прискореної подачі; $t_4 - t_5$ – інтервал часу різання (обробки) заготовки; $t_5 - t_6$ – інтервал часу роботи привода головного руху на холостому ході після обробки до відключення живлення; t_7 – відключення насоса живлення гідравлічної системи шпиндельних опор.

Зображена на рис. 2 діаграма вказує на можливість застосовувати споживану електричну потужність як інструмент моніторингу процесів в технологічній оброблюючій системі.

Проведені експерименти в режимі холостого ходу при варіюванні частотою обертання шпинделя та величиною дисбалансу дозволили встановити залежність зміни споживання електричної енергії приводом шпиндельного вузла на холостих ходах при зміні частоти обертання n та неврівноваженості $D_{ст}$ технологічного навантаження (рис. 3).

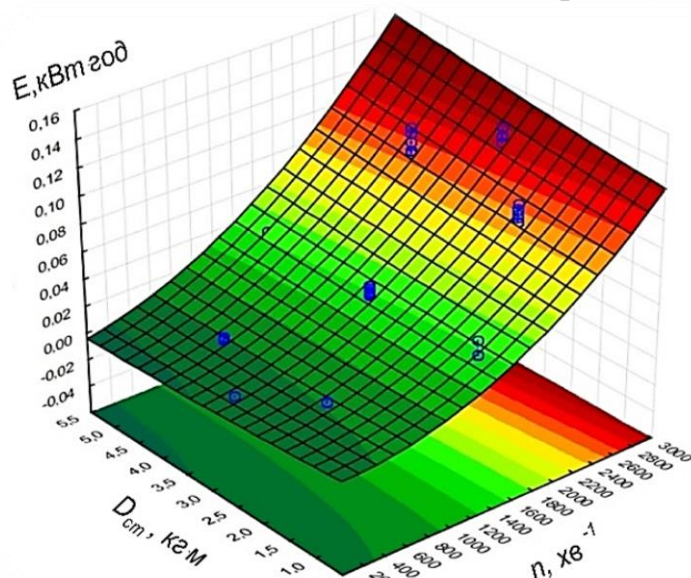


Рис. 3 – Залежність споживаної електричної енергії приводом шпиндельного

вузла від частоти обертання n та невірноваженості обертових елементів технологічної оброблюючої системи $D_{ст}$

З отриманих результатів видно, що невірноваженість обертових елементів шпиндельного вузла, яка виникає внаслідок незбалансованості заготовки, різального інструменту або пошкодження шпинделя однозначно викликає зростання електричного споживання приводом шпинделя при збільшенні частоти обертання.

При дослідженні показників енергоспоживання шпиндельних вузлів максимально потрібно враховувати окремі стадії їх роботи, які характеризують процеси енергетичних витрат. Результати багатьох досліджень показують, що підготовчі та заключні етапи роботи шпиндельного вузла складають більшу частину енергетичних витрат в умовах обробки, а в процесі різання загальні енергетичні втрати збільшуються лише на 5...20 %.

Висновки. Цифрові технології та штучний інтелект стають невід'ємною частиною машинобудування. Концепція інтелектуальних smart-шпинделів передбачає застосування вбудованих датчиків, які певною мірою обмежені конструктивними особливостями шпинделя та необхідністю мінімізувати різного роду приєднання до шпиндельного вузла. Тому вимірювання струму/потужності двигуна, як непрямий спосіб визначення експлуатаційних параметрів та динамічних характеристик шпиндельного вузла заслуговують на увагу і подальший розвиток в напрямку інтеграції із засобами штучного інтелекту, такими як штучні нейронні мережі.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

4. Сальников В.С. Ерзин О.А., Шадский В.Г. Анализ энергоэффективности технологических систем. Известия ТулГУ. Технические науки, 2013. №12(1). С.155–163.
5. Закладний О.О. Функціональне діагностування енергоефективності електромеханічних систем: Монографія. К.: Видавництво «Лібра», 2013. 195 с.
6. Resul Sercan Altıntaş. Modelling and optimization of energy consumption for feature based milling / Resul Sercan Altıntaş, Müge Kahya, Hakkı Özgür Ünver. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2016. pp. 1–19. DOI: 10.1007/s00170-016-8441-7.
7. Cao, H., Zhang, X., Chen, X.: The concept and progress of intelligent spindles: a review. International Journal of Machine Tools & Manufacture. 112, (2017). 21–52. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2016.10.005>
8. G. Byrne, D. Dornfeld, I. Inasaki, G. Ketteler, W. König, R. Teti, Tool condition monitoring (TCM) – the status of research and industrial application, CIRP Ann. Manuf. Technol. 44 (1995). 541–567.
9. E. Soliman, F. Ismail, Chatter detection by monitoring spindle drive current, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 13, (1997). 27–34.
10. M. Lamraoui, M. El Badaoui, F. Guillet, Chatter detection in CNC milling processes based on Wiener-SVM approach and using only motor current signals, [Vibration Engineering and Technology of Machinery](#). 23, (2015). 567–578.

11. J.-S. Kwak, M.-K. Ha, *Neural network approach for diagnosis of grinding operation by acoustic emission and power signals*, *J. Mater. Process. Technol.* 147, (2004). 65–71.
12. Mohamed, A., Hassan, M., M'Saoubi, R., & Attia, H. (2022). *Tool Condition Monitoring for High-Performance Machining Systems-A Review*. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 22(6). 2206. <https://doi.org/10.3390/s22062206>
13. Stavropoulos, P., Papacharalampopoulos, A., Vasiliadis, E. et al. *Tool wear predictability estimation in milling based on multi-sensorial data*. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 82, (2016). 509–521. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7317-6>
14. D. Zhang, *An adaptive procedure for tool life prediction in face milling*, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part J: J. Eng. Tribol.* 225, (2011). 1130–1136.
15. H. Liu, L. Lian, B. Li, X. Mao, S. Yuan, F. Peng, *An approach based on singular spectrum analysis and the Mahalanobis distance for tool breakage detection*, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C: J. Mech. Eng. Sci.* 228, (2014). 3505–3516.
16. N. Ghosh, Y. Ravi, A. Patra, S. Mukhopadhyay, S. Paul, A. Mohanty, A. Chattopadhyay, *Estimation of tool wear during CNC milling using neural network-based sensor fusion*, *Mech. Syst. Signal Process.* 21, (2007). 466–479.
17. Розробка енергоефективних високошвидкісних шпиндельних вузлів на адаптивних опорах ковзання [Текст]: звіт про НДР (закл.) / Чернігівський національний технологічний університет; в.о. керівн. С.П. Сапон; викон. О.П. Космач [та ін.]. – Чернігів, 2016. – 318 с. – № д/р 0115U002362