



The Ministry of  
Education and Science  
of Ukraine

<https://nure.ua/>

Kharkiv National  
University of  
Radio Electronics

**KITAM**

3  
2  
0  
2

# COLLECTION

OF STUDENTS' SCIENTIFIC PAPER

«Automation and Development of Electronic Devices»

ADED-2023

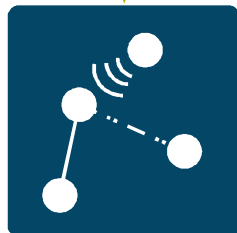
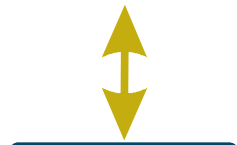
(Part 1)



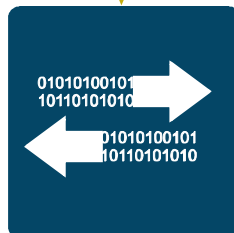
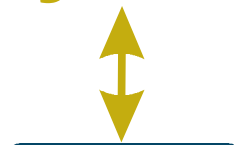
**Industry 4.0**



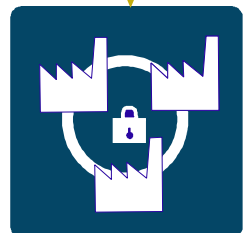
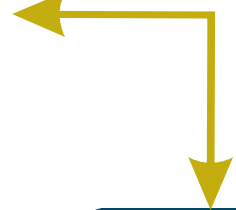
Digital control  
life cycle



Distributed Computer  
Systems



Fast  
integration and  
flexible  
configuration



Cyber-physical  
system

3  
2  
0  
2

# ЗБІРНИК

студентських наукових статей  
«Автоматизація та приладобудування»  
ADED-2023  
(Випуск 1)  
[електронне видання]



Industry 4.0

- Головий редактор** **Невлюдов Ігор Шакирович**, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки, Харківського національного університету радіоелектроніки.
- Редакційна колегія:** **Филипенко Олександр Іванович**, доктор технічних наук, професор, декан факультету Автоматики та комп'ютеризованих технологій, Харківського національного університету радіоелектроніки.  
**Цимбал Олександр Михайлович**, доктор технічних наук, професор кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки, Харківського національного університету радіоелектроніки.  
**Андрусевич Анатолій Олександрович**, доктор технічних наук, професор, начальник Криворізького коледжу національного авіаційного університету  
**Косенко Віктор Васильович**, доктор технічних наук, професор, зам. директора Державного підприємство «Південний державний проектно-конструкторський та науково-дослідний інститут авіаційної промисловості».  
**Замірець Микола Васильович**, доктор технічних наук, професор, директор Державного підприємства Науково-дослідного технологічного інституту приладобудування.  
**Свищ Володимир Митрофанович**, доктор технічних наук, професор, радник директора Державне науково-виробниче підприємство «Об'єднання Комунар».  
**Фомовська Олена Владиславівна**, кандидат технічних наук, доцент завідувач кафедри «Електронних апаратів» Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського.  
**Кухаренко Дмитро Володимирович**, кандидат технічних наук, доцент кафедри «Електронних апаратів» Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського  
**Демська Наталія Павлівна**, кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки, Харківського національного університету радіоелектроніки.  
**Фурманова Наталія Іванівна**, кандидат технічних наук, доцент, в.о. декана факультета Радіоелектроніки і телекомунікацій, Національного університету «Запорізька політехніка».
- Відповідальний редактор:** **Євсєєв Владислав В'ячеславович**, доктор технічних наук, професор кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки, Харківського національного університету радіоелектроніки.

Автоматизація та Приладобудування («Automation and Development of Electronic Devices» ADED-2023) [Електронний ресурс]: збірник студентських наукових статей / Харківський національний університет радіоелектроніки ; [редкол.: І.Ш. Невлюдов та ін.]. – Харків : ХНУРЕ, 2023. – Вип. 1. – 336с.

Collection of Students' Scientific Paper «Automation and Development Of Electronic Devices» ADED-2023 Part 1 (Key infrastructure 2023) - Kharkiv/ The Editorial.: Nevlyudov I.Sh. (head), that all. Kharkiv: Kind of Kharkiv National University of Radio Electronics [electronic edition], 2023. – 336p with.

Рекомендовано рішенням  
Науково-технічної ради  
Харківського національного  
університету радіоелектроніки  
протокол №6 від 29.11.2018

Рекомендовано рішенням Вченої ради  
факультету Автоматики і комп'ютеризованих технологій  
Харківського національного  
університету радіоелектроніки  
протокол № 6 від 01.05.2023

Збірник містить наукові статті здобувачів першого (бакалаврського), другого (магістерського) рівнів вищої освіти кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки (КІТАМ) Харківського національного університету радіоелектроніки, кафедри Інформаційних технологій електронних засобів (ІТЕД) Запорізького національного технічного університету та кафедри Електронних апаратів (ЕА) Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського які навчаються за спеціальностями: 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, 172 Телекомунікації та радіотехніка, 171 Електроніка та 163 Біомедична інженерія. Статті надані в авторській редакції.

©ХНУРЕ, 2023 рік

## ЗМІСТ

<i>Бацуля Р. В.</i> Аналіз сучасних розробок у сфері робототехніки .....	9
<i>Дяченко Е.С.</i> Аналіз сучасних розробок в області розумного будинку .....	15
<i>Кап'юнкін В.Г.</i> Розроблення системи голосового керування сайтом для людей з обмеженими можливостями .....	19
<i>Карташова В.В.</i> Аналіз сучасних роботизованих та експертних систем .....	24
<i>Кащев В. А., Артюх В. С.</i> Аналіз створення інтерфейсів користувача програмного забезпечення автоматизованих систем .....	31
<i>Кравченко С. В.</i> Аналіз автоматизованих систем керування технологічними процесами сучасного підприємства .....	36
<i>Наумов М. С.</i> Автоматизація приладобудівних приміщень .....	42
<i>Остапенко І.В.</i> Комп'ютерне зорове сприйняття .....	47
<i>Перебийніс Д. А.</i> Аналіз сучасного стану розробок в області автоматизації .....	52
<i>Рудакова Г. В.</i> Аналіз сучасних розробок в області комп'ютерного зору .....	57
<i>Дмитрієв Д.В.</i> Розробка макету пристрою дистанційного керування антропоморфним хватним пристроєм .....	61
<i>Андреев А.С.</i> Перспективи використання PHP та MYSQL в проектах .....	66
<i>Вінниченко С.О.</i> Огляд можливих ризиків кібератаки для віртуального підприємства та способів їх запобігання .....	70
<i>Гребенков Д. В.</i> Огляд сучасних безпілотних літальних апаратів .....	74
<i>Кирпота Ф., Халімонов Я.</i> Особливості QR-кодів та проблеми Fishing .....	78
<i>Макушев І.А.</i> Огляд сучасних роботів-маніпуляторів .....	82
<i>Олінкевич Я.В.</i> PHP & HTML: файли cookie, сесії, автентифікація .....	86
<i>Поліканов К. А.</i> Безпека QR-кодів та Phishing атаки .....	91
<i>Коноваленко К.</i> Розробка структурної схеми мобільної маніпуляційної платформи для розмінування ...	95
<i>Реука Є.</i> Розробка структурної схеми PID контролера для керування позиціонування сонячної панелі для автономних мобільних роботів .....	100

<i>Александров В.О.</i>	
Перспективи розвитку повітряної робототехніки в Україні .....	105
<i>Савін В.А.</i>	
Аналіз сучасних методів виявлення вибухонебезпечних об'єктів .....	110
<i>Залож Є.</i>	
Управління збутом продукції виробничого підприємства на основі динамічних QR-кодів .....	115
<i>Воронов Д.О.</i>	
Розробка програмних модулів на основі датчика LIDAR для системи управління БПЛА .....	119
<i>Коротун Є.В.</i>	
Факторний аналіз фотополімерних смол для 3D-друку .....	124
<i>Світайло Д. М.</i>	
Аналіз причин кібератак та інформаційної безпеки .....	128
<i>Долгуля А.В.</i>	
Дослідження переміщення чотирилапого зооморфного робота «Робокіт» у невизначеному просторі .....	132
<i>Кривий М.В.</i>	
Робототехнічні системи та їхнє використання .....	138
<i>Нієнова Д. V.</i>	
Programmable Providing of Data on Functional Dependencies of Material Characteristics ...	143
<i>Білоус М.Ю., Іщенко М.Д.</i>	
Автоматизація розподілу сервісних робіт на підприємстві .....	147
<i>Кравченко С. В.</i>	
Аналіз сучасного фреймворка ASP.NET CORE для WEB-додатків .....	151
<i>Башкір Б.В.</i>	
Переваги та недоліки термопластавтоматів .....	156
<i>Зибенко О. О.</i>	
Впровадження електроерозійних варстатів з ЧПК в розумне виробництво .....	160
<i>Кальченко А.С.</i>	
Особливості 3D-ДРУКУ для принтерів FDM/FFF .....	165
<i>Маковоз С. К.</i>	
Комп'ютерне моделювання механічної частини плазмового ЧПУ верстата .....	170
<i>Піхтерьов А.Д.</i>	
Переваги та недоліки 3D-принтерів з полярною кінематикою .....	174
<i>Придятько Д.Р.</i>	
Огляд можливостей систем технічного зору для пошуку вибухонебезпечних предметів .....	178
<i>Шерстюк А. М.</i>	
Системологічний аналіз проблеми автоматизації виявлення браку продукції приладобудівельного підприємства .....	183
<i>Лукеча І.</i>	
Математична модель системи позиціонування стимулюючого електрода на біологічно активні точки .....	189
<i>Обозін Я.В.</i>	
Особливості засобів для ремонту пошкоджених автомобілів .....	195
<i>Shevchenko A.A.</i>	
Development of Program Tools to Provide Automated Data Plots Visualisation for Scientific Aided Computation Software .....	199

<i>Шишко А.Т., Кулешов Д.С.</i>	
ІоТ-рішення для автоматизації виробничого приміщення на базі ESP8266 та Веб-сервера .....	205
<i>Білошапка І.В.</i>	
Розробка методів щодо створення програмних модулів автоматизованого проектування деталей для системи LibreCAD .....	209
<i>Левченко К.О.</i>	
Кінематика 3D – принтерів .....	215
<i>Муравка Р.</i>	
Дослідження роботи мобільного робота з використанням різних сенсорів для збору даних про зовнішнє середовище .....	219
<i>Скляр М. В., Тарасенко К. А.</i>	
Впровадження технологій 3D візуалізації у виробництво та навчання .....	224
<i>Скрипниченко В.О.</i>	
Вплив автоматичних регуляторів на лінійні об'єкти автоматизації .....	229
<i>Пустовалов Д.</i>	
Дослідження методу триангуляції та його застосування у робототехніці та повсякденному житті .....	235
<i>Леонов Ю.С.</i>	
Аналіз систем підігріву та підтримання температури повітря в 3D-принтер .....	241
<i>Щербина В.</i>	
Розробка віддаленої системи екстреного керування мобільним роботом на базі ESP8266 .....	245
<i>M. Sc. Isabelle Elisabeth Metzen, Nienova D.V.</i>	
Utilizing Engineering and Programming Approaches Implemented in a Multidisciplinary Experiment as an Innovation Platform for Biological Climate Change Research .....	248
<i>Ахмад Д.Х.</i>	
Сервер для організації обміну даними та керування мобільною платформою .....	253
<i>Бузніков В.Р.</i>	
Використання технології комп'ютерного зору для виявлення вибухонебезпечних предметів .....	257
<i>Гребенюк Б.А.</i>	
Розробка підсистеми управління інтелектуальним роботом .....	263
<i>Карпов М.С.</i>	
Аналіз бездротових сенсорних мереж .....	270
<i>Поддубняк І. А.</i>	
Розробка мобільної платформи для пошукових робіт .....	277
<i>Шаталюк Р.Р.</i>	
Інтелектуальна автоматизація технологічних процесів .....	283
<i>Візір Ю.С., Кравченко К.В.</i>	
Система автоматизованого контролю та підтримки оптимального рівня освітленості у приміщеннях .....	287
<i>Лащин З.В.</i>	
Автоматизація процесу управління ресурсами навчальних лабораторій .....	291
<i>Шаталюк Р.Р.</i>	
Аналіз сучасних інтелектуальних технологій, які застосовуються при виробництві приборів та систем .....	296

<i>Сокол Б.В.</i>	
Порівняльне моделювання кінематик 3D принтера .....	300
<i>Бєлий Я.В.</i>	
Особливості управління багатоступневими взаємопов'язаними нелінійними об'єктами .....	305
<i>Шаталюк Р.Р.</i>	
Інтелектуальна автоматизація технологічних процесів .....	308
<i>Бєлий Я.В.</i>	
Розробка однорівневої системи контролю та управління доступом .....	313
<i>Шаталюк Р.Р.</i>	
Аналіз сучасних інтелектуальних технологій, які застосовуються при виробництві приборів та систем .....	318
<i>Монзер А.А.</i>	
Автоматичне визначення області сканування в адаптивній бінарізації зображення .....	322
<i>Савченко П.М.</i>	
Особливості виробничих адаптивних систем автоматичного управління .....	326
<i>Савченко П.М.</i>	
Розробка системи управління світломузичною установкою на базі arduino Nano .....	330
<i>Катишев І.А., Катишев В.І.</i>	
Збільшення ефективності вакуумного сонячного колектора .....	333

## ВПРОВАДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНИХ ВАРСТАТІВ З ЧПК В РОЗУМНЕ ВИРОБНИЦТВО

**О. О. Зибенко**

Харківський національний університет радіоелектроніки

Україна, 61166, Харків, пр. Науки 14

E-mail: oleksandr.zybenko@nure.ua

**Анотація:** системи ЧПК (числове програмне керування) відіграють надзвичайно важливу роль у керуванні електроерозійними верстатами (EDM) та процесами їх обробки. Дотепер існуючі системи ЧПК не забезпечують достатньої відкритості, яка б дозволяла дослідникам та інженерам розширювати свої можливості та функціональні можливості у відповідь на зростаючі вимоги інтелектуального виробництва; з іншого боку, перетворення машини EDM, виготовленої малими та середніми верстатобудівниками, на розумну виробничу систему ніколи не було легкою роботою. Для вирішення проблем і подолання труднощів, які блокують шлях до інтелектуального виробництва, у цій статті розглядається платформа ЧПУ з відкритою архітектурою для верстатів EDM. Ця платформа використовує найсучасніші технології для реалізації апаратного та програмного забезпечення без шкоди для обмежень застарілих технологій.

**Ключові слова:** автоматизація, ЧПК, електроерозійний верстат, інтелектуальне виробництво.

## IMPLEMENTATION OF CNC EDM IN THE SMART PRODUCTION

**O. Zybenko**

Kharkiv National University of Radio Electronics

Ukraine, 61166, Kharkiv, Nauky av., 14

E-mail: oleksandr.zybenko@nure.ua

**Annotation:** CNC (computer numerical control) systems play an ultimately important role in controlling EDM (electrical discharge machining) machine tools and their machining processes. Till now, existing CNC systems do not offer sufficient openness that supports researchers and engineers to expand their capabilities and functionalities in response to the increasing demands of smart manufacturing; on the other hand, transforming an EDM machine made by small and medium-sized machine tool builders, into a smart manufacturing system has never been an easy job. To address the issues and overcome the difficulties which block the way towards smart manufacturing, this paper proposes an open architecture CNC platform for EDM machine tools. This platform utilizes state-of-the-art technologies in the implementation of the hardware and software without compromising the constraints of obsolete techniques.

**Key words:** automation, CNC, EDM, smart manufacturing.

Системи ЧПК (числового програмного керування) відіграють надзвичайно важливу роль у керуванні електроерозійними верстатами та процесами їхньої обробки. До цього часу існуючі системи ЧПК не пропонують достатньої відкритості, яка б дозволила дослідникам та інженерам розширювати їх можливості та функціональність у відповідь на зростаючі вимоги інтелектуального виробництва; з іншого боку, перетворення електроерозійного верстата, виготовленого малими та середніми виробниками, в інтелектуальну виробничу систему ніколи не було легкою справою. Для вирішення цих питань і подолання труднощів, які стоять на шляху до інтелектуального виробництва, в цій статті розглядається варіант відкритої архітектури ЧПК для електроерозійних верстатів. З точки зору практикуючого фахівця, відкритість і стандартизація є ключовими факторами, які дозволяють людям з академічних кіл

і промисловості вносити знання своєї галузі для збагачення екосистеми розумного виробництва.

Як одна з найбільших рушійних сил економіки, обробна промисловість в Україні відіграла домінуючу роль у виробництві великої кількості товарів для клієнтів у всій країні та у всьому світі протягом останніх десятиліть. Тому модернізація обробної промисловості в цілому в найближчі десять років має велике значення для країни та її виробничих підприємств.

Оскільки інтелектуальна виробнича система [1] або промисловість 4.0 [2, 3] з'явилась над горизонтом у відповідь на зростаючі вимоги диверсифікованих ринкових потреб, підкреслюючи конкурентоспроможність виробничих галузей, в останні роки було досягнуто консенсусу, що обробна промисловість повинна наздогнати темпи швидкого розвитку нової промислової революції на чолі з розумним виробництвом або промисловість 4.0. Як потужний метод виробництва, електроерозійна обробка (EDM - Electric discharge machining) і її верстати постійно розвиваються разом з іншими виробничими технологіями у відповідь на швидку зміну виробничої парадигми.

Через те, що більшість виробників електроерозійних верстатів є малими та середніми компаніями, вони, як і більшість підприємств, прагнуть вижити, долаючи серйозні виклики, такі як зростання вартості робочої сили, модернізація технологій обробки, впровадження цифрової системи управління, тощо [4-7]. Відсутність інвестицій і людських ресурсів стає величезною перешкодою, яка блокує рух малих та середніх виробників верстатів на шляху до розумного виробництва. Наприклад, системи числового програмного керування (ЧПК) відіграють надзвичайно важливу роль у виконанні таких критично важливих завдань, як керування рухом верстата, управління процесом обробки, реагування на різні запити інтегрованої виробничої системи, а також відповідна інтеграція з роботами та іншими робочими одиницями для виконання завдань обробки в повністю автоматизованому режимі. Верстати, доступні на нашому ринку, були розроблені майже 20 років тому із застарілою апаратною та програмною архітектурою. Їх майже неможливо модернізувати, просто додаючи більш сучасні функціональні можливості та розширені функції в стару систему ЧПК, яка була створена та залишилася майже незмінною з моменту створення.

Замість того, щоб покладатися на безнадійну еволюцію існуючих старих систем із закритими структурами, винахід повністю нової системи ЧПК шляхом використання новітніх технологій на основі сучасної архітектури для ефективного забезпечення верстатів сучасними функціональними можливостями, необхідними для інтелектуального виробництва або індустрії 4.0, є дійсно кращим вибором без шкоди для обмежень застарілих систем. З іншого боку, все більше і більше нових технологій, таких як штучний інтелект (AI), 5G, інтернет речей (IoT), великі дані, кіберфізичні системи (CPS) тощо, швидко розвиваються і впроваджуються в передові виробничі системи для роботи поверх і/або разом з системами ЧПК, тим самим збагачуючи можливості всієї виробничої системи. Як наслідок, нові системи ЧПК повинні бути масштабованими та адаптивними, щоб відповідати вимогам диверсифікованої конфігурації виробничої системи.

Порівняно зі звичайними виробничими системами, розумна виробнича система працює з більшою автономією, сприймаючи/збираючи великі дані, контролюючи процеси обробки, діагностуючи несправності та навчаючись покращувати свою продуктивність обробки. Як «мозок» виробничої системи, контролер машини, включаючи систему ЧПК, отримує інструкції з керування траєкторією або послідовністю, а також інформацію від датчиків і надсилає керуючі сигнали виконавчим механізмам і пристроям після розрахунків і прийняття рішень відповідно до заданих правил і законів управління. Сучасний контролер машини також працює як вузол в IoT, спілкуючись з іншими терміналами для обміну інформацією та віддаленого виконання операцій.

Паралельно з розвитком виробничих систем, технології обробки також розвиваються у відповідь на виклики, такі як мікро/нано виробництво, свердління малих отворів, складна обробка порожнин із поганим доступом до інструменту та обробка матеріалів, які важко

обробляти. Рішення цих проблем були значно обмежені через дорогу та повільну розробку прототипів машин та їх контролерів. Контролери, датчики або приводи з надзвичайними властивостями, такими як надзвичайно висока роздільна здатність, надзвичайно малий розмір або надзвичайно низька затримка, неминуче потрібні для таких виробничих систем, але вони постачаються лише кількома компаніями з погано підтримуваними стандартними інтерфейсами, як в апаратному, так і в програмному забезпеченні, для з'єднання між контролерами машини та зовнішніми пристроями. Такі погано підтримувані інтерфейси, у свою чергу, призвели до відсутності широко підтримуваних рішень системної інтеграції. Таким чином, розробникам виробничих систем доводиться будувати нову систему практично з нуля для кожного випадку, щоб подолати різні виробничі проблеми.

У результаті, хоча і системи керування машиною, і технології виробництва значно просунулися за останні десятиліття, розрив між ними також збільшився, що ускладнює налаштування контролера машини для задоволення нових вимог, висунутих передовими виробничими технологіями, такими як можливості швидшого та надійного обчислення, широкого зв'язку, обробки великих даних та об'єднання датчиків тощо. Деякі передові застосування електроерозійної обробки, такі як багатоосьова електроерозійна обробка турбінних лопаток і робочих коліс, свердління отворів для охолодження без зворотного удару, а також повністю автоматизоване інтелектуальне виробництво, оснащене електроерозійною обробкою, залежать від складних функцій сучасних контролерів верстатів. Їх можна абстрагувати як можливості позиційно-залежного керування процесом, мультисистемної взаємодії, адаптивного розподілу ресурсів у часі та просторі, широкого діапазону підключення, а також адаптивності.

Під час процесів механічної обробки не всі параметри можна підтримувати постійними. Це пояснюється тим, що стан деяких процесів обробки є нелінійним, змінним у часі та навіть стохастичним та/або хаотичним. Бульбашки та уламки, що утворюються під час розрядів, рухаються вздовж міжелектродного проміжку, який занурений у діелектричну робочу рідину, що підвищує ймовірність виникнення шкідливої дуги та короткого замикання, коли електрод інструменту занурюється всередину заготовки. Тому дії з видалення уламків і бульбашок повинні змінюватися залежно від положення електрода, щоб підтримувати нормальну швидкість розряду на якомога вищому рівні. Тому, на відміну від різальних верстатів, швидкість подачі на кожному сегменті траєкторії для електроерозійних верстатів не визначається простим введенням значення F-коду (швидкість подачі) перед виразом G-коду (рух), а постійно регулюється відповідно до стану розряду в зазорі.

З іншого боку, для планування кінематики верстата такі параметри руху, як швидкість, прискорення і ривок, попередньо розраховуються і оптимізуються на кожному сегменті траєкторії. Це типовий процес, залежний від положення, встановлення і зміна параметрів якого жорстко пов'язані з певним положенням, а не з часом; крім того, сервоуправління шириною зазору і багатоосьове одночасне управління в електроерозійних верстатах, різання під кутом і різання на різну висоту в електроерозійних верстатах, управління виходом і проникненням в електроерозійних верстатах для швидкого свердління малих отворів, а також багато інших - все це хороші приклади процесів, залежних від положення. Ця категорія процесів обробки вимагає особливого механізму управління, в якому кожна подія або дія запускається і вимірюється в певному положенні, а не в певний момент часу. Іншими словами, все синхронізується за положенням уздовж траєкторії, щоб забезпечити бажану продуктивність процесу обробки. Ось чому звичайні системи ЧПК, призначені для різальних верстатів, не можуть бути безпосередньо використані для керування електроерозійними верстатами.

У звичайних системах ЧПК не так просто змінити будь-який параметр процесу в межах одного рядка G-коду руху, наприклад, G01, G02 і G03. Команда встановлення параметра процесу, наприклад, F, яка встановлює швидкість подачі, в одному рядку з G-кодом руху, може бути виконана тільки до або після початку руху, і вона залишається незмінною до тих

під, поки не буде встановлена іншою командою. Якщо параметр процесу потрібно змінити під час руху, єдиний спосіб - розбити команду G-коду руху на два або більше сегментів команд і встановити параметри процесу відповідно до кожного сегмента команди руху. Це може призвести до зниження ефективності та надійності планування подачі, оскільки кількість G-кодів для передбачення обмежена. Таким чином, буде важко реалізувати імпровізовані швидкі багатокординатні рухи, такі як стрибки інструменту в багатокординатному електроерозійному верстаті. Для того, щоб здійснювати позиційно-залежне керування процесом під час обробки з ефективним плануванням подачі, необхідно перевизначити формат даних як для траєкторії руху інструменту, так і для параметрів процесу.

Типова інтелектуальна виробнича одиниця виконує механічну обробку, обробку деталей, зміну інструменту, транспортування, вимірювання, тощо автоматично, без ручних операцій. Мультисистемна взаємодія - це ключ до 100% автоматизації та самовдосконалення. Наприклад, при швидкому електроерозійному свердлінні отворів для охолодження, ідентифікація леза, лазерне вимірювання тривимірного профілю леза, адаптивне планування траєкторії, автоматична генерація G-коду, адаптивне свердління, автоматична обробка деталей, заміна інструментальних електродів, заміна напрямних електродів, а також контроль якості виконуються в рамках співпраці між чотирма 6-координатними електроерозійними свердильними верстатами, одним 6-координатним електроерозійним прохідним верстатом, одним лазерним верстатом для лазерного вимірювання тривимірного профілю леза, двома 6-координатними промисловими роботами, а також системою ідентифікації RFID (радіочастотних ідентифікаторів) і шістьма транспортерами. На додаток до співпраці на рівні системи, співпраця між різними пристроями також відіграє важливу роль у вивченні та застосуванні передових виробничих технологій. На рівні пристрою для точного моніторингу, вимірювання та управління процесом обробки контролер верстата часто повинен співпрацювати із зовнішніми пристроями для активації або зчитування сигналів. Наприклад, для спостереження за станом зазору під час електроерозійної обробки перед зоною обробки можна встановити високошвидкісну камеру для спостереження. Щоб отримати взаємозв'язок між зображеннями, зробленими камерою, і положенням інструменту на верстаті, зображення повинні надходити з точними часовими мітками від контролера верстата.

Збирати дані і запускати рухи або дії синхронно між кожною окремою традиційною виробничою системою і зовнішнім пристроєм не зовсім просто, оскільки кожна система має власне визначення внутрішнього формату даних і мітки часу. Не всі системи ЧПК для верстатів мають інтерфейси для зв'язку з іншими зовнішніми пристроями. Дані, які можна збирати та обмінюватися, також обмежені, що ще більше ускладнює співпрацю із зовнішніми системами.

В останні роки масштаби та складність технічних характеристик продукту, параметрів процесу обробки та сигналів зазвичай розширюються в міру розвитку технологій виробництва, що призводить до зростання складності апаратного та програмного забезпечення систем обробки. Однак, оскільки обчислювальне навантаження на контролер стає все важчим, обчислення в кожному завданні можуть сповільнюватися, а загальне споживання енергії контролером зростає. Також, іноді через обмеження розмірів і/або вартості, апаратне забезпечення контролера не завжди може бути оснащено високою конфігурацією. Межі між реальним і нереальним часом, синхронним і асинхронним, онлайн і офлайн, централізованим і розподіленим значною мірою залежать від часових і просторових обмежень, створених користувачами та доступними апаратними системами.

Деякі завдання в режимі реального часу, такі як інтерполяція траєкторії інструменту, планування/оптимізація швидкості подачі та обробка сигналів, потребують виконання протягом мілісекунд або навіть коротших періодів. Синхронні завдання, такі як переміщення по кількох осях, автоматичне налаштування параметрів процесу та збір даних, вимагають суворого дотримання часових позначок контролера. Онлайн завдання, такі як моніторинг і керування процесом обробки в EDM, не можуть бути виконані повністю до початку процесу

обробки. Бажано максимально спростити завдання в режимі реального часу, синхронні та онлайн завдання в системі, щоб полегшити навантаження на ЦП. Застаріла монолітна/централізована архітектура також може буде замінено масштабованою та розподіленою архітектурою завдяки швидкому зростанню пропускної здатності мережі.

Розумна виробнича система потребує великих даних для навчання. Під "великими" мається на увазі не тільки кількість, але й розмірність. Для того, щоб збирати різні типи даних великої розмірності, датчики повинні бути підключені до контролера верстата за принципом "підключи і працюй" з невеликою кількістю перетворювачів сигналів і мінімальними налаштуваннями. Для обробки заготовки шляхом виконання команд, виконавчі механізми, такі як двигуни, насоси, генератори імпульсів і перемикачі, також повинні бути підключені до контролера верстата і обмінюватися даними за допомогою цифрових сигналів. [7,8]

У звичайних виробничих системах для підключення зовнішніх пристроїв в контролері верстата є лише кілька типів інтерфейсів, що робить його досить незручним для вибору компонентів на етапі розробки системи. Різні дані зазвичай передаються за допомогою специфічних протоколів, і, таким чином, функція аналізу даних повинна адаптуватися до різних форматів даних. Бажано використовувати в інтелектуальних виробничих системах широко підтримувані інтерфейси зі стандартними протоколами, щоб адаптуватися до швидко мінливих вимог від різних виконавчих механізмів і датчиків, починаючи від нанорозмірних до макромасштабних, від наносекунд до секунд, від кіберпростору до фізичного світу. Хоча на прикладному рівні допускається використання формату даних, визначеного користувачем, дані, що передаються на фізичному та каналному рівні протоколу зв'язку, повинні бути у стандартизованих форматах для усунення складних перетворень між різними протоколами.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Lee, J., Kao, H.-A. & Yang, S., 2014. Service innovation and smart analytics for industry 4.0 and big data environment. *Procedia Cirp*, 16, 3-8.
2. Frank, A. G., Dalenogare, L. S. & Ayala, N. F., 2019. Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies. *International Journal of Production Economics*, 210, 15-26.
3. Machado, C. G., Winroth, M. P. & Ribeiro da Silva, E. H. D., 2020. Sustainable manufacturing in Industry 4.0: an emerging research agenda. *International Journal of Production Research*, 58, 1462-1484.
4. Correa, J. E., Toombs, N. & Ferreira, P. M., 2017. A modular-architecture controller for CNC systems based on open-source electronics. *Journal of Manufacturing Systems*, 44, 317-323.
5. Spena, P. R., Holzner, P., Rauch, E., Vidoni, R. & Matt, D. T., 2016. Requirements for the Design of flexible and changeable Manufacturing and Assembly Systems: a SME-survey. *Procedia Cirp*, 41, 207-212.
6. Bejlegaard, M., Brunoe, T. D., Bossen, J., Andersen, A.-L. & Nielsen, K., 2016. Reconfigurable manufacturing potential in small and medium enterprises with low volume and high variety: pre-design evaluation of RMS. *Procedia Cirp*, 51, 32-37.
7. Nevliudov, I., Razumov-Fryziuk, I., Yevsieiev, V., Nikitin, D., Blyzniuk, D., & Strelets, R. (2022). Cost estimation of photopolymer resin for 3D exposure of circuit boards. *Technology Audit and Production Reserves*, 2(2(64)), 43–49. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.256538>
8. Моделі та методи кіберфізичних виробничих систем в концепції Industry 4.0 : монографія / І. Ш. Невлюдов, В. В. Євсєєв, А. О. Андрусевич, С. С. Максимова ; – Oktan Print – Prague. 2023. – 321 с.

**Науковий керівник:** Разумов-Фризюк Євгеній Анатолійович, доцент кафедри КІТАМ, кандидат технічних наук, ХНУРЕ