

УДК 681.5
DOI [https://doi.org/10.15589/znp2025.3\(501\).17](https://doi.org/10.15589/znp2025.3(501).17)

IMPROVEMENT OF ELECTRIC DRIVES FOR METALWORKING MACHINES

УДОСКОНАЛЕННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ МЕТАЛООБРОБНИХ ВЕРСТАТІВ

Oleg V. Savchenko

savchenko1984@gmail.com

ORCID: 0000-0002-9718-7857

О. В. Савченко,

завідувач лабораторіями, викладач

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

Abstract. *Purpose.* Synthesis of a control system for a machine tool feed drive based on a synchronous motor with permanent magnets. *Methodology.* Modeling of transient processes in an electric drive for a machine tool feed based on a synchronous motor with permanent magnets using modern theory of automatic control and electric drive, simulation modeling in MATLAB, processing and analysis of the obtained results. *Results.* An analysis of control systems for electric drives for machine tools feeds was carried out and a comparative analysis of the main types of electric drives was carried out and it was established that electric drives with a synchronous motor have the best technical characteristics. To study the automated electric drive in the work, mathematical modeling was chosen, which is today one of the effective methods for studying complex systems. A functional diagram of an electric drive for a feed based on a vector control system for a synchronous motor with permanent magnets was built. The KEB COMBIVERT servo drive, which is used in machine tools and machining centers, was chosen. A structural diagram was constructed based on a functional diagram using a model of a synchronous motor with permanent magnets. The parameters of the electric drive control system regulators were calculated provided that the speed loop was set to the symmetrical optimum, and the current and position loops were set to the technical optimum. Using the simulation model, the transient modes corresponding to the operation of the feed electric drive were simulated. The results were analyzed and it was proven that the control quality indicators satisfy the conditions for a smooth start of the electric drive and ensure trouble-free operation. *Scientific novelty.* It was proven that the use of a synchronous motor with permanent magnets with a vector control system allows to achieve high accuracy and smoothness of movement, as well as the possibility of operating in a constant torque and speed mode. Vector control allows to optimize the excitation current, reducing losses. Also, replacing mechanical gearboxes with a direct drive reduces backlash and increases processing accuracy. *Practical significance.* The use of the proposed model of modernization of the feed drive of a lathe will ensure reliable operation and accuracy of part processing, increase stability and energy efficiency, and also expand the functionality of the machine and integration with modern control systems.

Key words: synthesis; electric drive; nonlinear controller; optimization; vector control; modeling; transient response; feed drive; synchronous electric drive; nonlinear system; rotating transformer.

Анотація. *Мета.* Синтез системи керування привода подачі верстата на основі синхронного двигуна з постійними магнітами. *Методика.* Моделювання перехідних процесів в електроприводі подачі верстата на основі синхронного двигуна з постійними магнітами з використанням сучасної теорії автоматичного керування та електропривода, імітаційне моделювання в MATLAB, обробка та аналіз отриманих результатів. *Результати.* Проведено аналіз систем керування електроприводів подач верстатів і здійснено порівняльний аналіз основних типів електроприводів та встановлено, що електроприводи з синхронним двигуном мають найкращі технічні характеристики. Для дослідження автоматизованого електропривода в роботі обрано математичне моделювання, яке сьогодні є одним з ефективних методів вивчення складних систем. Побудовано функціональну схему електропривода подачі на основі системи векторного керування синхронним двигуном з постійними магнітами. Обрано сервопривод KEB COMBIVERT, який застосовується у верстатах та оброблювальних центрах. Побудовано структурну схему на базі функціональної схеми з використанням моделі синхронного двигуна з постійними магнітами. Виконано розрахунок параметрів регуляторів системи керування електропривода за умови налаштування контуру швидкості на симетричний оптимум, контурів струму та положення – на технічний оптимум. За допомогою імітаційної моделі виконано моделювання перехідних режимів, які відповідають роботі електропривода подачі. Виконано аналіз результатів та доведено, що показники якості керування задовольняють умовам плавного пуску електропривода та забезпечують безаварійну роботу. *Наукова новизна.* Доведено, що використання синхронного двигуна з постійними магнітами при векторній системі керуван-

ня дозволяє досягнути високої точності та плавності руху, а також можливість роботи в режимі постійного моменту та швидкості. Векторне керування дозволяє оптимізувати струм збудження, знижуючи втрати. Також заміна механічних редукторів на прямий привод знижує люфти та підвищує точність обробки. *Практична значимість.* Використання запропонованої моделі модернізації привода подач токарного верстата забезпечить надійну роботу та точність обробки деталей, підвищить стабільність та енергоефективність, а також розширить функціональність верстата та інтеграцію з сучасними системами керування.

Ключові слова: синтез; електропривод; нелінійний регулятор; оптимізація; векторне керування; моделювання; перехідна характеристика; привод подачі; синхронний електропривод; нелінійна система; обертовий трансформатор.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Ціллю даного проекту являється підвищення точності, надійності та енергоефективності привода подачі токарного верстата за рахунок використання сучасної системи керування та актуалізації виконавчих механізмів. Верстат 16A20Ф3 має наступні проблеми: низька точність позиціонування; відсутність зворотного зв'язку по моменту та положенню; високі пульсації моменту та нестабільність швидкості; обмеження можливості інтеграції з сучасними ЧПК; підвищені енергозатрати.

Задачею модернізації системи керування електропривода подач є вибір та встановлення нового електродвигуна, розробка системи керування, інтеграція датчиків, моделювання та верифікація, оцінка ефективності. Як результат, очікувано отримати підвищення точності, оптимізація часу перехідного процесу, зменшення перерегулювання, підвищення стійкості системи, збільшення енергоефективності.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Модернізація – це спосіб продовження терміну служби обладнання, яке більше не може отримувати технічне обслуговування від виробника [1]. Відповідно до Straus et al. [2], Stock and Seliger [3] та Kim et al. [4], реалізація таких функцій, як профілактичне обслуговування може продовжити термін служби виробничих машин, може полегшити нові етапи їх використання і може скоротити незаплановані простої. Внаслідок необхідності створення цифрових зв'язків усередині виробничої лінії компанії стикаються з рішенням; модернізувати існуючі активи чи замінити їх новими [5, 6]. Заміна обладнання може призвести до позитивних короткострокових ефектів, пов'язаних із оцифруванням виробничої лінії. Однак цей вибір вимагає великих витрат і вступає у суперечність із принципами сталого виробництва [7, 8], оскільки призводить до втрати функціонального обладнання. Для вирішення цієї проблеми стає все більш привабливою та економічно ефективною модернізація обладнання.

Модернізацію можна визначити як процес внесення змін до традиційного обладнання з метою підвищення його ефективності за одночасної мінімізації фінансових та тимчасових витрат та ризиків [9, 10]. Промислова інфраструктура може бути

автоматизована та продовжити термін її служби за рахунок модернізації обладнання за допомогою апаратного та програмного забезпечення, а також мережових можливостей для збирання даних для обробки та аналізу [11, 12]. Модернізація також може сприяти сталому розвитку та подолання неоднорідності у рамках загального виробничого процесу [13]

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Розглянуто компонування, технічні характеристики та електрообладнання верстата 16A20Ф3. Встановлено, що токарний верстат з ЧПК 16A20Ф3 оснащений асинхронним приводом «Розмір 2М-5-21/11» та системою ЧПК «Електроніка НЦ-31», які зібрано на застарілій елементній базі і зняті з виробництва.

Проведено аналіз систем керування електроприводів подач верстатів. Виявлено, що до електроприводів подач пред'являються наступні вимоги:

- мінімальні розміри електродвигуна при високому обертовому моменті;
- висока максимальна швидкість;
- значна переважувальна здатність привода в режимах короткочасного і повторно-короткочасного навантаження;
- широкий діапазон регулювання;
- висока стабільність характеристик;
- висока швидкодія при розгоні і гальмуванні, підключенні і відключенні навантаження;
- висока рівномірність руху при різному навантаженні на всіх швидкостях;
- зручність конструктивної установки двигуна на верстаті і вбудовування керуючих перетворювачів у шафи, ніші шаф і ніші верстатів.

Здійснено порівняльний аналіз основних типів електроприводів, розроблених спеціально для механізмів подачі верстатів з ЧПК та встановлено, що електроприводи з синхронним (вентильним) двигуном мають найкращі технічні характеристики.

Складено план модернізації електропривода поздовжньої подачі (переміщення по осі Z) токарного верстата 16A20Ф3, який містить:

- заміну асинхронного електродвигуна на синхронний (вентильний);
- встановлення сучасного комплектного електропривода подачі;
- заміну системи ЧПК «Електроніка НЦ-31».

При встановленні сучасних систем керування привода та ЧПК досягаються наступні переваги:

- підвищення надійності роботи верстата;
- розширення технологічних можливостей для роботи сучасним різучим інструментом;
- покращення ремонтпридатності;
- можливість діагностики, складання і установки керуючих програм з віддаленого комп'ютера;
- можливість включення верстата в єдину комп'ютерну мережу для контролю його навантаження і простоїв.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою роботи є синтез системи керування серводвигуном привода подачі верстата. Щоб досягти поставленої мети, слід розв'язати наступні завдання:

1) розглянути компонування, технічні характеристики та електрообладнання верстата 16A20Ф3. Проаналізувати системи керування електроприводів подач верстатів;

2) скласти функціональну схему системи керування електропривода подачі. Обґрунтувати вибір елементів системи керування електропривода;

3) побудувати структурну схему системи керування електропривода подачі та виконати розрахунок параметрів її елементів;

4) провести моделювання системи керування електропривода подачі в MATLAB та дослідити вплив параметрів регуляторів на якість керування.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Об'єкт дослідження. Перехідні процеси в електроприводі подачі верстата на основі синхронного двигуна з постійними магнітами.

Предмет дослідження. Параметри регуляторів системи керування електропривода подачі верстата, які впливають на якість керування.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження виконані із залученням сучасної теорії електропривода, методів теорії автоматичного керування та комп'ютерного моделювання в Matlab.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Токарний верстат з ЧПК 16A20Ф3 призначений для токарної обробки у напівавтоматичному режимі зовнішніх і внутрішніх поверхонь деталей типу тіл обертання зі ступеневим і криволінійним профілем різної важкості.

Область застосування верстата: дрібносерійне і серійне виробництво.

Застосовується концентрація обробки заготовки декількома інструментами одночасно: двома і більше різцями, різцями і свердлом і т.п. Поєднання вказаних та інших прийомів дозволяє швидко і точно вести обробку, компенсує витрати на налагодження автомата і скорочує трудові витрати на виготовлення партії деталей.

Електрообладнання верстата включає в себе:

- пристрій числового програмного керування (ПЧПК) для керування циклом обробки деталі;
- електропривод асинхронний глибоко регульований комплектний для керування приводами подач і приводом головного руху;
- електродвигуни для керування приводами різцетримача, патрона, охолодження, пінолі, мастила напрямних, мастила шпіндельної бабки, транспортера стружковидалення;
- фотоімпульсні датчики контролю переміщення по осях і різьбонарізання;
- апарати захисту, керування і сигналізації;
- інші апарати і пристрої, які здійснюють комутацію, під'єднання електричних ланцюгів і керування механізмами.

Приводи подач є одними із основних вузлів, що визначають точність і продуктивність верстатів з ЧПК. У зв'язку з тим, що ПЧПК практично безінерційно формує сигнали керування приводом, як в режимі руху по заданій траєкторії, так і в режимі позиціонування, вирішальне значення для забезпечення точності визначають характеристики і параметри привода подачі з урахуванням особливостей кінематичної ланки привода [3].

По мірі вдосконалення ПЧПК, підвищення точності датчиків положення, збільшення жорсткості і точності механічних вузлів верстата підвищуються вимоги до швидкодії і точності приводів подачі. Слід виділити три типи електроприводів, розроблених спеціально для механізмів подачі верстатів з ЧПК:

- електроприводи постійного струму із високомоментними двигунами;
- електроприводи змінного струму з синхронними двигунами, які мають ротор з постійними магнітами;
- електроприводи змінного струму з асинхронними двигунами з короткозамкненим ротором.

Порівняння вищенаведених видів приводів подачі показує:

- електроприводи постійного струму через наявність в них двигуна постійного струму із складним і малонадійним щітково-колекторним вузлом поступаються по точності, швидкодії і надійності іншим двома варіантами привода;

- електроприводи з синхронним двигуном мають найкращі технічні характеристики;

- електроприводи з асинхронним двигуном також являються найбільш перспективними. Асинхронні двигуни, незначно поступаючись синхронним (вентильним) двигунам за масогабаритними показниками.

До недоліків вентильного двигуна слід віднести його відносно високу вартість та складність конструкції у порівнянні із асинхронними двигунами.

На підставі вимог, що пред'являються до електропривода здійснюється вибір комплектного електропривода.

Комплектний електропривод має наступні складові частини:

- електродвигун;
- силовий трансформатор (або струмообмежуючий реактор);
- силовий тиристорний перетворювач для живлення двигуна.
- тиристорний перетворювач;
- систему імпульсно-фазового керування, пристрій виділення аварійного режиму, контролю запобіжників і захисту від перенапруг;
- комутаційну і захисну апаратуру;
- пристрій динамічного гальмування (за необхідності);
- шафа високовольтного введення (за необхідності);
- систему керування електроприводом;
- комплект апаратів, приладів і пристроїв, які забезпечують оперативне керування, контроль стану і сигналізацію електропривода.

При роботі із стандартним асинхронним двигуном перетворювач слід обирати з відповідною потужністю. Для підвищення точності підтримання моменту і швидкості на валу двигуна в найбільш досконалих перетворювачах реалізоване векторне керування, яке дозволяє працювати з повним моментом двигуна в області нульових частот, підтримувати швидкість при змінному навантаженні без датчиків зворотного зв'язку, точно контролювати момент на валу двигуна.

Для модернізованої системи було обрано КЕВ COMBIVERT сервопривід (13.F5.A1D-39FA), що застосовується в промисловому обладнанні, верстатах та оброблювальних центрах. Складається із синхронного електродвигуна з датчиком положення ротора і перетворювача частоти із проміжною ланкою постійного струму. Перетворювач частоти працює за принципом широтно-імпульсної модуляції і призначений виключно для безступінчатого регулювання швидкості обертання двигунів.

В якості датчиків зворотного зв'язку для перетворювачів частоти F5-A можуть використовуватися: інкрементальний енкадер, Sin/Cos датчик, резольвер (синусно-косинусний обертовий трансформатор), датчик з HIPERFACE інтерфейсом і датчик з ENDAT інтерфейсом. Перетворювач частоти F5-A може працювати і без датчика зворотного зв'язку в режимі безсенсорного векторного керування.

На відміну від простих перетворювачів частоти без зворотного зв'язку, в котрих, в кращому випадку реалізований зворотний зв'язок за струмом, який дозволяє в невеликих межах компенсувати зміну швидкості обертання електродвигуна при зміні навантаження, ПЧ для сервоприводів мають кілька контурів замкненого зворотного зв'язку:

- зворотний зв'язок за струмом;
- зворотний зв'язок за швидкістю;

- позиціонування;
- утримання при нульовій швидкості (утримання позиції);
- регулювання швидкості з контролем крутного моменту;
- розгін і гальмування із заданим прискоренням або по заданій кривій;
- позиціювання за програмою;
- синхронізація за швидкістю;
- синхронізація за положенням.

Серводвигун на постійних магнітах з електроною комутацією обмоток (вентильні двигуни) для застосувань з високими вимогами по якості керування рухом і по точності переміщення. Серводвигуни серії SM поєднують в собі компактну конструкцію, розмір, вагу, високий номінальний момент і переважувальну здатність.

Серводвигун складається із трифазного статора і 6–10-полюсного ротора (в залежності від моделі) з магнітами із сплаву NdFeB (неодим, залізо, бор), а також включає в себе наступні конструктивні елементи:

- корпус із лакофарбовим покриттям чорного кольору RAL 9005;
- фланець з 4 отворами для осевого кріплення;
- кінець вала: гладкий або із шпонкою (в залежності від моделі);
- прямий штировий герметичний роз'єм із гвинтовим з'єднанням для підключення силового кабелю;
- прямий штировий герметичний роз'єм із гвинтовим з'єднанням для підключення кабелю керування (датчика положення ротора).
- Серводвигуни оснащуються датчиком положення ротора з високою роздільністю, однообертним SinCos Hiperface (SKS36).
- Опційно двигуни можуть оснащуватися надійним електромагнітним утримуючим гальмом. Основні технічні характеристики двигуна приведені в таблиці 1.

Таблиця 1. Технічні характеристики серводвигуна D3.SM9-31A1A

Параметр	M_0 , Н · м	M_n , Н · м	n_n , хв ⁻¹	I_0/I_n
Значення	28	21,2	1500	9/7,3

Однообертовий датчик положення ротора SinCos Hiperface, який вбудований в серводвигун, є стандартним вимірювальним пристроєм, повністю адаптованим до перетворювача частоти КЕВ із платою зворотного зв'язку: «F»: Вхід (Hiperface); Вихід (TTL); «I»: Вхід (Hiperface); Вхід (TTL).

Датчики зворотного зв'язку HIPERFACE поєднують в собі переваги інкрементальних і абсолютних енкадерів. Коли пристрій вмикається, і виконується комутація із зовнішнім лічильником контролера через інтерфейс RS-485, визначається абсолютне положення ротора.

Пристрій числового програмного керування NC-210 застосовується в машинобудуванні, верстатобудуванні, металообробній, деревообробній та інших галузях промисловості. ПЧПК використовують як комплектувальний виріб при створенні комплексів «пристрій – об’єкт керування», наприклад, технологічних комплексів, установок, високоавтоматизованих верстатів і оброблювальних центрів таких груп, як фрезерно-свердильно-розточувальні, токарно-карусельно-револьверні, лазерні, деревообробні і т.д.

Побудова функціональної схеми системи керування електропривода подачі. Розглянемо побудову системи векторного керування синхронним двигуном із постійними магнітами (СДПМ).

Область застосування таких систем: високоякісний електропривод подач металорізальних верстатів. Основні характеристики контуру регулювання швидкості: діапазон регулювання – не менше 10000, смуга пропускання – не менше 100 Гц [5].

Функціональна схема системи векторного керування СДПМ приведена на рисунку 1. На схемі прийняті наступні умовні позначення: φ_z – сигнал завдання положення; РП – регулятор положення. ПІ-регулятор, який відпрацьовує сигнал помилки за положенням; ω_z – сигнал завдання швидкості; РШ – регулятор швидкості. ПІ- або ПІД-регулятор, який відпрацьовує із сигналу помилки за швидкістю сигнал завдання моменту; PC_q – регулятор струму q -складової. ПІ- або ПІ-регулятор, який відпрацьовує із сигналу помилки за струмом сигнал завдання напруги по осі q ; PC_d – регулятор струму d -складової. ПІ- або ПІ-регулятор, який відпрацьовує із сигналу помилки за струмом сигнал завдання напруги по осі d ; БКПЗ – блок компенсації перехресних зв’язків; ПН – перетворювач координат, який здійснює

переведення вектора напруги статора із рухомої системи координат dq в нерухому систему координат; ВМ – векторний модулятор; ПК2 – перетворювач координат, який здійснює переведення струму статора із трифазної нерухомої системи координат в двохфазну, а потім в рухому систему dq [15].

При побудові математичної моделі синхронного двигуна з постійними магнітами приймемо наступні припущення:

- відсутнє насичення магнітного ланцюга, втрати в сталі, ефект витіснення струму;
- обмотки статора симетричні;
- індуктивність розсіювання не залежить від положення ротора в просторі.

Характеристики досліджуваного об’єкта керування приведені в таблиці 2.

Таблиця 2. Характеристики синхронного двигуна

Параметр	Значення
Тривалий момент при нульовому навантаженні, M_0 , Н · м	27,8
Максимальний момент, $M_{\max}$, Н · м	90,1
Номинальний момент, $M_{\text{ном}}$, Н · м	21,2
Номинальна частота обертання, $n_{\text{ном}}$, хв ⁻¹	1500
Максимальна частота обертання, $n_{\max}$, хв ⁻¹	4000
Струм при нульовій швидкості, I_0 , А	9
Номинальний струм, $I_{\text{ном}}$, А	7,3
Постійна електромагнітного моменту (при 75 °С), k_t , Н · м/А	2,93
Постійна двигуна, k_e , В · с/рад	1,95
Активний опір обмотки статора (міжфазний) при 75 °С, R_1 , Ом	1,85
Індуктивність обмотки статора (міжфазна), L_1 , Гн	$19,4 \cdot 10^{-3}$
Момент інерції ротора, J_o , кг · м ²	$17,94 \cdot 10^{-4}$
Кількість пар полюсів, p_0	5

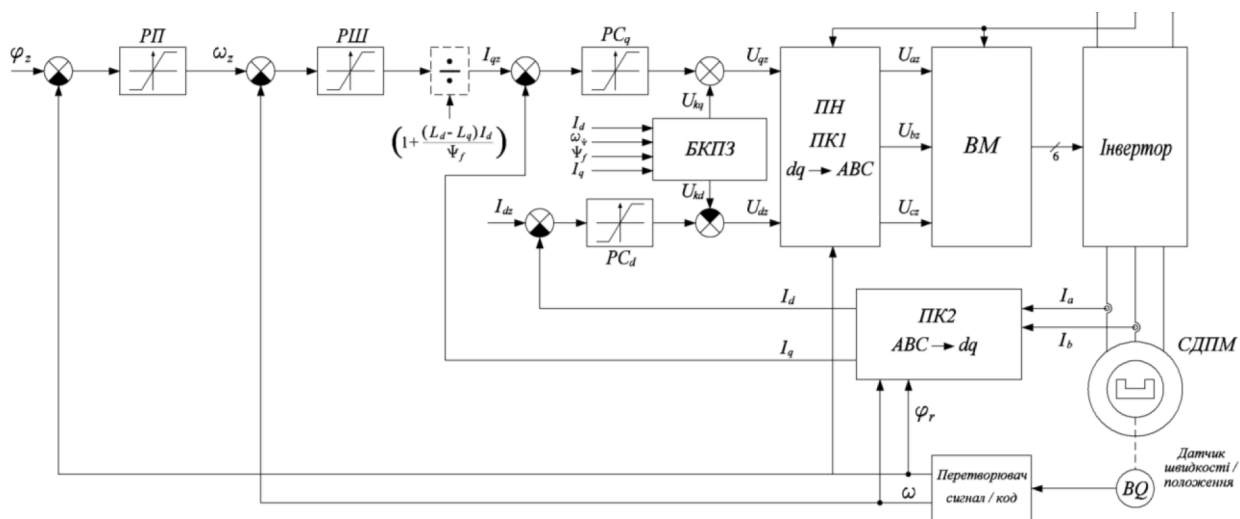


Рис. 1. Функціональна схема системи векторного керування електропривода подачі

Таблиця 3. Результати розрахунку системи

β	T_e	T_M	Ψ_{1d}	Ψ_f	J_Σ	k_{inv}	T_{inv}	T_e	$k_{ДС}$	$k_{ДШ}$	k_M	$k_{ДП}$	$k_{РП}$	$T_{РП}$
4,64	$10,49 \cdot 10^{-3}$	$0,39 \cdot 10^{-3}$	0,586	0,391	$7,3 \cdot 10^{-3}$	42	0,001	$10,49 \cdot 10^{-3}$	0,68	0,076	0,0015	11,01	575,23	$2,78 \cdot 10^{-5}$

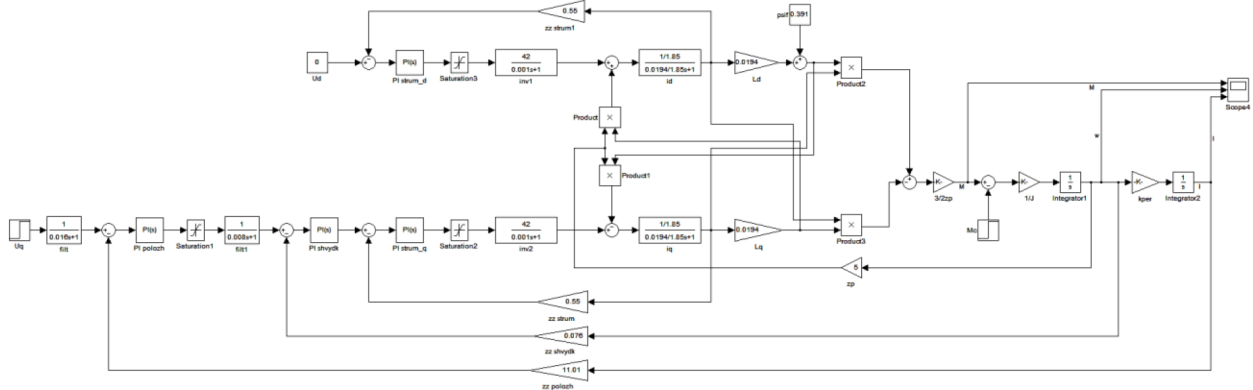


Рис. 2. Модель електропривода в середовищі MATLAB

У відповідності з вихідними даними, було розраховано параметри елементів силового ланцюга [16], а результати зведено у таблицю 3.

Побудова імітаційної моделі в MATLAB. На рисунку 2 зображено імітаційну модель, що побудована в середовищі MATLAB. Для оцінки якісних показників роботи САК в динамічних режимах аналізується її реакція на ступінчасту одиничну дію. При цьому перехідна характеристика повинна знаходитися в межах заданої області, параметри якої визначають вимоги технологічного агрегату.

За допомогою імітаційної моделі виконаємо моделювання перехідних процесів. Пуск двигуна

здійснюється на холостому ході при заданій напрузі 1 В до номінальної швидкості $\omega = 131,9$ рад/с, з цієї швидкістю виконується підведення інструмента до заготовки, різання заготовки починається, коли навантаження збільшується до номінального значення $M_H = 21,2$ Н · м [16, 17].

Графіки перехідних процесів за моментом, швидкістю та положенням представлено на рисунках 3, 4 та 5.

Оскільки очевидно, що отримані перехідні характеристики не задовольняють необхідним умовам роботи електропривода, то виконаємо параметричну оптимізацію регуляторів струму, швидкості та положення.

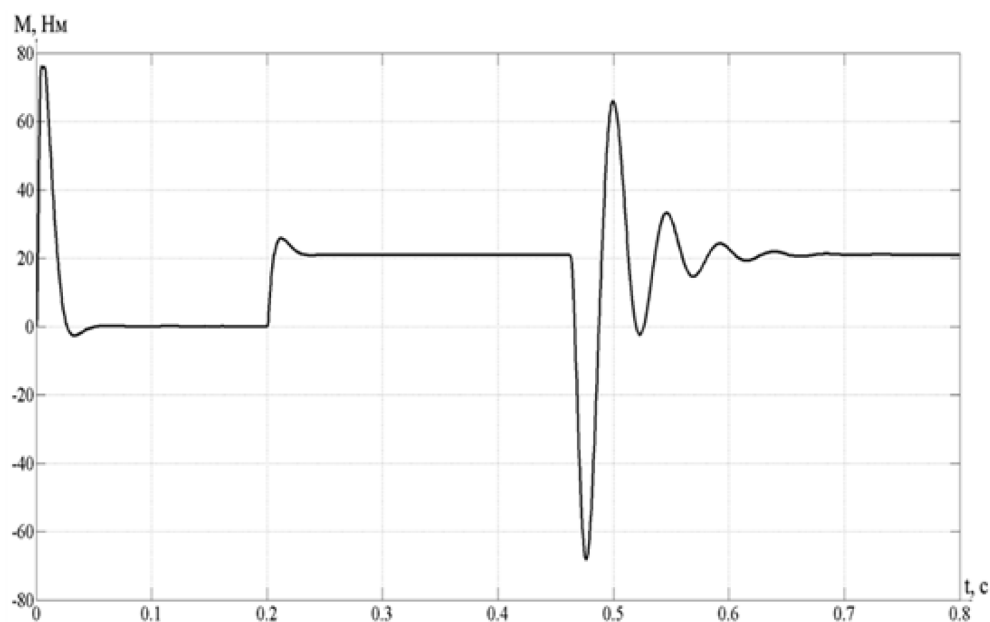


Рис. 3. Перехідна характеристики електропривода за моментом

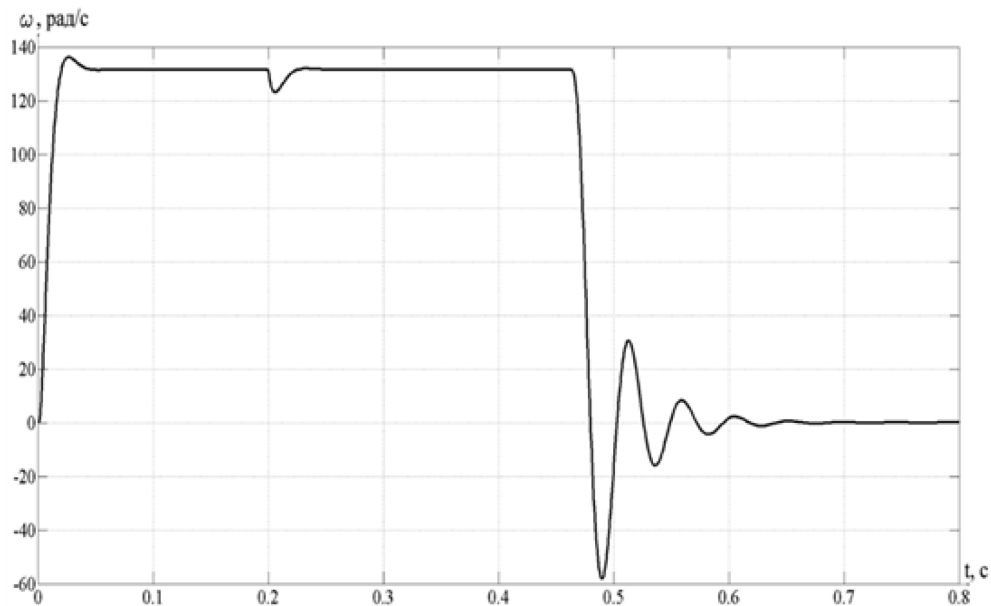


Рис. 4. Перехідна характеристики електропривода за швидкістю

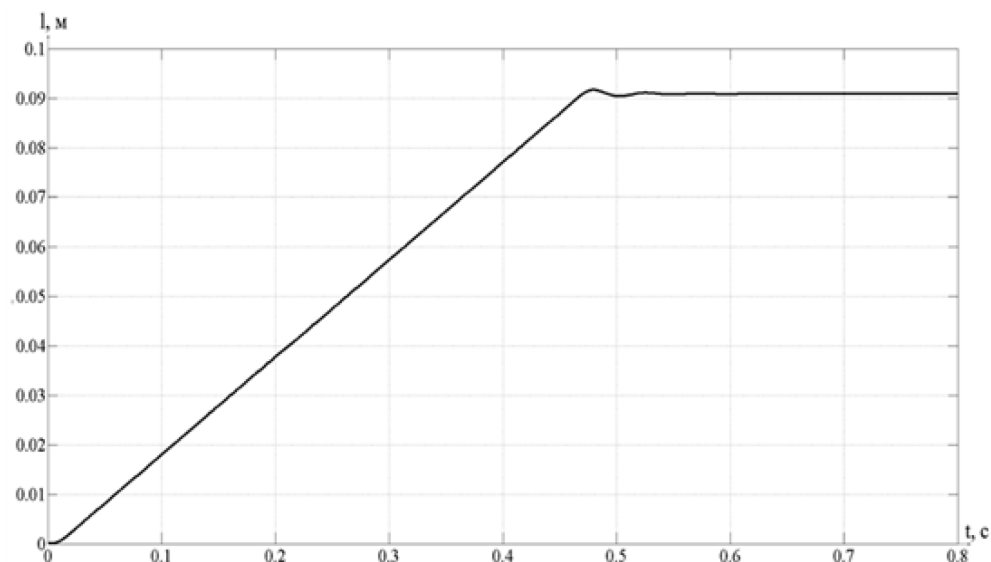


Рис. 5. Перехідна характеристики електропривода за положенням

Під час проведення параметричної оптимізації були прийняті наступні міри:

- коефіцієнт підсилення ПІ-регулятора струму збільшено в 4 рази ($k_{PC} = 0,42 \cdot 4 = 1,68$);
- коефіцієнт підсилення ПІ-регулятора швидкості збільшено в 1,5 рази ($k_{PII} = 4,5 \cdot 1,5 = 6,75$);
- коефіцієнт підсилення ПІ-регулятора положення зменшено в 4 рази ($k_{PII} = 575,23/4 = 143,8$).

Для більш наглядної оцінки роботи електропривода та аналізу перехідних характеристик, промодуємо роботу системи при заданій напрузі $U = 1$ В. Отримані характеристики показані на рисунках 6, 7 та 8.

Запас стійкості САК оцінюють по величині перерегулювання, σ

$$\sigma = \frac{y_{\max} - y_{\text{уст}}}{y_{\text{уст}}} \cdot 100 \, \%.$$

З графіків, які зображено на рисунках 6–8 були визначені наступні показники якості перехідного процесу (таблиця 4). Очевидно, що показники якості керування задовольняють умовам плавного пуску електропривода та забезпечують безаварійну роботу [18].

Можлива заміна підпорядкованого регулювання у наведеної схемі на оптимізацію електропривода

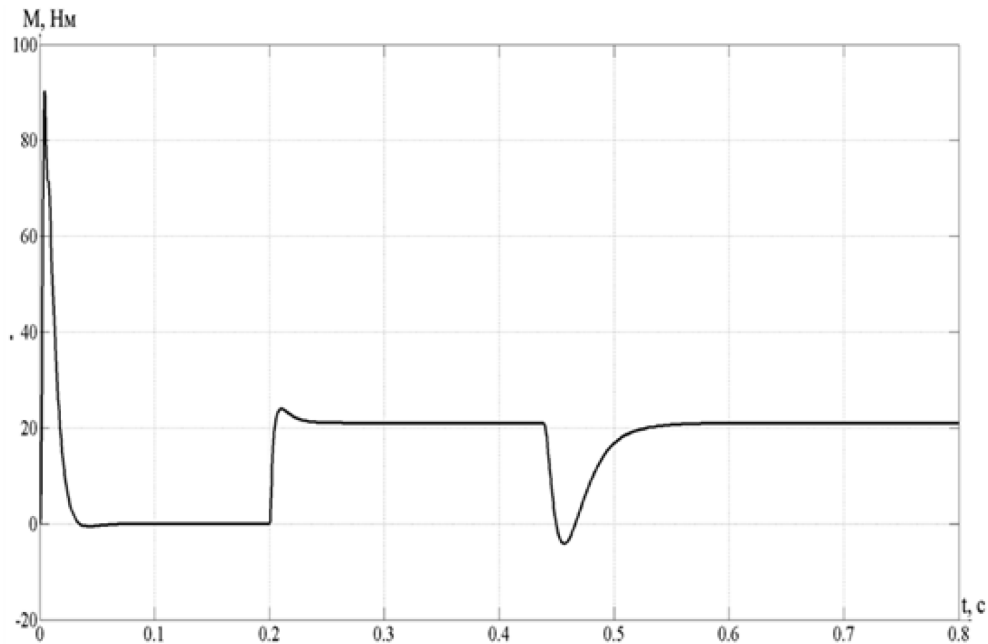


Рис. 6. Перехідна характеристика привода за моментом після параметричної оптимізації

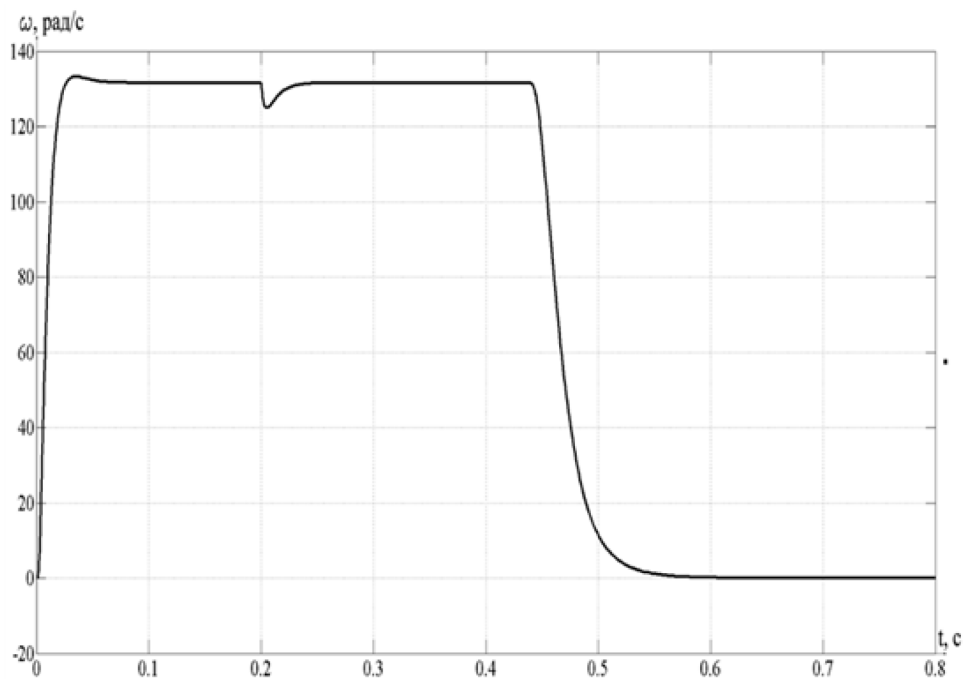


Рис. 7. Перехідна характеристика привода за швидкістю після параметричної оптимізації

нелінійним коректувальним пристроєм з динамічною зміною параметрів ланок [18]. Структурна схема електропривода наведена на рис. 9.

У роботі [18] доведена можливість такої оптимізації й розраховані графіки залежностей між сталими часу регулятора задля досягнення оптимізації рис. 10.

Червоною лінією показана залежність для τ_1 , а синію для τ_2 , де $\tau_1 = T_1/T$; $\tau_2 = T_2/T$; $T = T_3 + T_4$.

На думку автора, це найкращий спосіб налаштування електропривода. Проте у разі модернізації є випадки коли умови співвідношень сталих часу витримати не вдається. Це перш за все обумовлено навантаженням на яке було розраховане попереднє обладнання. Як що ж умови виконуються то удосконалення наведеного електропривода верстата краще проводити за методикою, що пропонує автор у [18].

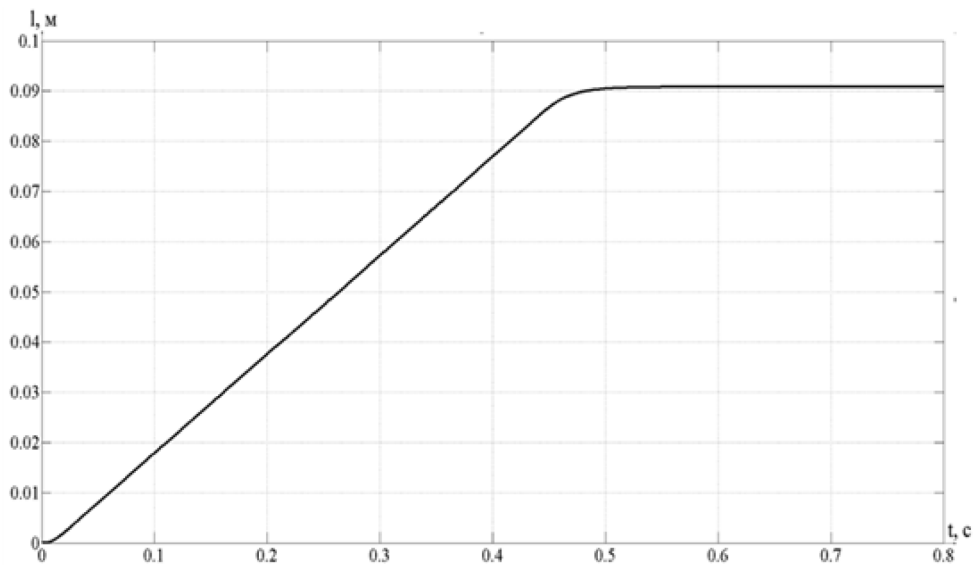


Рис. 8. Перехідна характеристика привода за положенням після параметричної оптимізації

Таблиця 4. Показники якості

Параметр	Відносне перерегулювання, %	Час встановлення t_p , с	Час наростання t_H , с	Усталена похибка $\varepsilon_{уст}$, %
Кутова швидкість	1,7	0,023	—	0
Переміщення	0	—	—	0,9

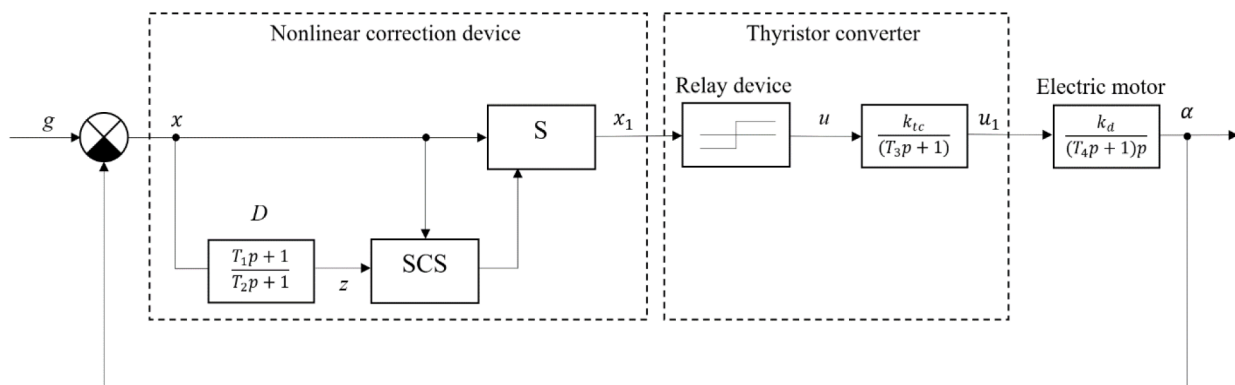


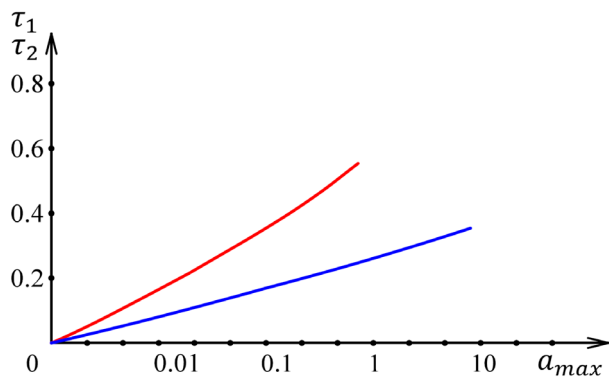
Рис. 9. Електропривод з нелінійним регулятором

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

В роботі розглянуто компонування, технічні характеристики та електрообладнання верстата 16A20Ф3. Проведено аналіз систем керування електроприводів подач верстатів. Побудовано функціональну схему електропривода подачі на основі системи векторного керування синхронним двигуном із постійними магнітами. Основною областю застосування таких систем є високоякісний електропривод подач металорізальних верстатів. Векторне керування дозволяє працювати з повним моментом двигуна в області нульових частот, підтримувати швидкість при змінному навантаженні без датчиків зворотного зв'язку, точно контролювати момент на валу двигуна.

Побудовано структурну схему на базі функціональної схеми з використанням моделі синхронного двигуна з постійними магнітами. Виконано розрахунок параметрів регуляторів системи керування електропривода за умови налаштування контуру швидкості на симетричний оптимум, контурів струму та положення – на технічний оптимум.. Проведено моделювання системи керування електропривода подачі в MATLAB. Досліджено вплив параметрів регуляторів електропривода на якість керування.

За допомогою імітаційної моделі виконано моделювання перехідних режимів, котрі відповідають роботі електропривода поздовжньої подачі. Виконано аналіз результатів та доведено, що на показники якості керування задовольняють умовам плавного пуску

Рис. 10. Графіки залежностей τ_1 і τ_2 від $a_{\max}$

електропривода та забезпечують безаварійну роботу та точність позиціонування.

ВИСНОВКИ

У роботі представлені результати, які узагальнюють теоретичні дослідження системи керування серводвигуном привода подачі верстата.

Розглянуто комплектування, технічні характеристики та електрообладнання верстата 16A20Ф3. Виявлено, що електрообладнання верстата включає комплектний електропривод змінного струму «Розмір-2М-5-21/1» та систему ПЧК «Електроніка НЦ-31», які мають обмежені можливості, порівняно низьку надійність і на сьогодні морально застарілі.

Здійснено порівняльний аналіз основних типів сучасних електроприводів для механізмів подачі верстатів з ЧПК. Встановлено, що електроприводи з синхронним (вентильним) двигуном мають

найкращі технічні характеристики: широкий діапазон регулювання; стабільність характеристик; високу швидкодію при розгоні і гальмуванні, різкій зміні навантаження.

Побудовано функціональну схему електропривода подачі на основі системи векторного керування синхронним двигуном із постійними магнітами. На заміну встановленому у верстаті приводу змінного струму «Розмір-2М-5-21/1» обрано сервопривод КЕВ COMBIVERT. Цей комплектний електропривод застосовується для швидкодіючих механізмів подачі металообробних верстатів, які вимагають точних переміщень і регулювання швидкості обертання в широкому діапазоні.

Складено математичний опис системи векторного керування електропривода на основі моделі синхронного двигуна з постійними магнітами для рухомої системи координат, яку орієнтовано за магнітною віссю ротора. Виконано синтез системи керування електропривода із синхронним двигуном та здійснено синтез регуляторів привода на основі принципу підпорядкованого регулювання з використанням методу компенсації нелінійних перехресних зв'язків. Встановлено вплив високомоментного синхронного серводвигуна на такі показники якості, як: точність регулювання; часу перехідного процесу; перерегулювання; стійкість; енергоефективність. Це характерно для цілого ряду верстатів, які однотипні з аналізованим. Також дана модернізація не приносить проблем зі стійкістю системи керування.

REFERENCES

- [1] Ehrlich, M., Wisniewski, L., & Jasperneite, J. (2015). Usage of retrofitting for migration of industrial production lines to industry 4.0. *Jahreskolloquium Kommunikation in der Automation (KommA)*.
- [2] Strauß, P., Schmitz, M., Wöstmann, R., & Deuse, J. (2018, December). Enabling of predictive maintenance in the brownfield through low-cost sensors, an IIoT-architecture and machine learning. In *2018 IEEE International conference on big data (big data)* (pp. 1474–1483). IEEE.
- [3] Stock, T., & Seliger, G. (2016). Opportunities of sustainable manufacturing in industry 4.0. *procedia CIRP*, 40, 536–541.
- [4] Kim, D. Y., Park, J. W., Baek, S., Park, K. B., Kim, H. R., Park, J. I.,... & Baek, W. (2020). A modular factory testbed for the rapid reconfiguration of manufacturing systems. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 31(3), 661–680.
- [5] Arjoni, D. H., Madani, F. S., Ikeda, G., Carvalho, G. D. M., Cobiainchi, L. B., Ferreira, L. F., & Villani, E. (2017, July). Manufacture equipment retrofit to allow usage in the industry 4.0. In *2017 2nd international conference on Cybernetics, Robotics and Control (CRC)* (pp. 155–161). IEEE.
- [6] Nsiah, K. A., Schappacher, M., Rathfelder, C., Sikora, A., & Groza, V. (2018, May). An open-source toolkit for retrofit industry 4.0 sensing and monitoring applications. In *2018 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)* (pp. 1–6). IEEE.
- [7] Khan, M. A., Mittal, S., West, S., & Wuest, T. (2018). Review on upgradability—A product lifetime extension strategy in the context of product service systems. *Journal of cleaner production*, 204, 1154–1168.
- [8] Li, X., Wang, Z., Chen, C. H., & Zheng, P. (2021). A data-driven reversible framework for achieving Sustainable Smart product-service systems. *Journal of Cleaner Production*, 279, 123618.
- [9] García, J. I., Cano, R. E., & Contreras, J. D. (2020). Digital retrofit: A first step toward the adoption of Industry 4.0 to the manufacturing systems of small and medium-sized enterprises. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 234(8), 1156–1169.
- [10] B. V. Guerreiro et al., Definition of smart retrofitting: first steps for a company to deploy aspects of industry 4.0, in *Advances in Manufacturing* (Springer International Publishing, 2018), pp. 161–170

- [11] Alias, C., Salewski, U., Ortiz Ruiz, V. E., Alarcón Olalla, F. E., Neirão Reymão, J. D. E., & Noche, B. (2017, June). Adapting warehouse management systems to the requirements of the evolving era of industry 4.0. In *International manufacturing science and engineering conference* (Vol. 50749, p. V003T04A051). American Society of Mechanical Engineers.
- [12] Mittal, S., Khan, M. A., Romero, D., & Wuest, T. (2018). A critical review of smart manufacturing & Industry 4.0 maturity models: Implications for small and medium-sized enterprises (SMEs). *Journal of manufacturing systems*, 49, 194–214.
- [13] Jaspert, D., Ebel, M., Eckhardt, A., & Poepplbuss, J. (2021). Smart retrofitting in manufacturing: a systematic review. *Journal of Cleaner Production*, 312, 127555.
- [14] Stanok tokarnyy patronno-tsentrovyy z chyslovyim prohramnym keruvannym modeli 16A20F3 [Chuck-center turning lathe with numeric software for model 16A20F3]. Posibnyk z ekspluatatsiyi – Service manual for operation. 16A20F3(1990) RE. M. : VNIITEMR. 56 s.
- [15] Terekhov V. M. (2006) Sistemy upravleniya elektropriwodov[Electric drive control systems]: uchebnik dlya stud. vyshe. ucheb. Zavedenny – textbook for students of higher educational institutions/ V. M. Terekhov, Ye. I. Osipov. 304 s.
- [16] Bilyuk, I. S., Savchenko, O. V., Oruzhak, I. V., Gudyma, I. P., & Korzun, B. M. (2023, March). Metod modernizatsii tokarno-revol'vernogo poluavtomata[Method of modernization of a semi-automatic turret lathe]. In The 10th International scientific and practical conference “Modern methods of applying scientific theories”(March 14–17, 2023) Lisbon, Portugal. International Science Group. 2023. 481 p. (p. 453).
- [17] Bilyuk, I. S., Gurov, A. P., Savchenko, O. V., Mayboroda, O. V., & Marchenko, A. V. (2022). Spособ modernizatsii privoda podach tokarnogo stanka[Method for upgrading the feed drive of a lathe]. Trends in science and practice of today, 29, 306.
- [18] Biluk, I., Shareyko, D., Savchenko, O., Koshkin, D., Maiboroda, O., & Rudenko, A. (September 18–21, 2024). Stability of Electric Drives Optimized by Nonlinearity Proceedings of the 2024 IEEE 6th International Conference on Modern Electrical and Energy System, MEES 2024.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Ehrlich, M., Wisniewski, L., & Jasperneite, J. (2015). Usage of retrofitting for migration of industrial production lines to industry 4.0. *Jahreskolloquium Kommunikation in der Automation (KommA)*.
- [2] Strauß, P., Schmitz, M., Wöstmann, R., & Deuse, J. (2018, December). Enabling of predictive maintenance in the brownfield through low-cost sensors, an IIoT-architecture and machine learning. In *2018 IEEE International conference on big data (big data)* (pp. 1474–1483). IEEE.
- [3] Stock, T., & Seliger, G. (2016). Opportunities of sustainable manufacturing in industry 4.0. *procedia CIRP*, 40, 536–541.
- [4] Kim, D. Y., Park, J. W., Baek, S., Park, K. B., Kim, H. R., Park, J. I.,... & Baek, W. (2020). A modular factory testbed for the rapid reconfiguration of manufacturing systems. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 31(3), 661–680.
- [5] Arjoni, D. H., Madani, F. S., Ikeda, G., Carvalho, G. D. M., Cobianchi, L. B., Ferreira, L. F., & Villani, E. (2017, July). Manufacture equipment retrofit to allow usage in the industry 4.0. In *2017 2nd international conference on Cybernetics, Robotics and Control (CRC)* (pp. 155–161). IEEE.
- [6] Nsiah, K. A., Schappacher, M., Rathfelder, C., Sikora, A., & Groza, V. (2018, May). An open-source toolkit for retrofit industry 4.0 sensing and monitoring applications. In *2018 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)* (pp. 1–6). IEEE.
- [7] Khan, M. A., Mittal, S., West, S., & Wuest, T. (2018). Review on upgradability – A product lifetime extension strategy in the context of product service systems. *Journal of cleaner production*, 204, 1154–1168.
- [8] Li, X., Wang, Z., Chen, C. H., & Zheng, P. (2021). A data-driven reversible framework for achieving Sustainable Smart product-service systems. *Journal of Cleaner Production*, 279, 123618.
- [9] García, J. I., Cano, R. E., & Contreras, J. D. (2020). Digital retrofit: A first step toward the adoption of Industry 4.0 to the manufacturing systems of small and medium-sized enterprises. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 234(8), 1156–1169.
- [10] B. V. Guerreiro et al., Definition of smart retrofitting: first steps for a company to deploy aspects of industry 4.0, in *Advances in Manufacturing* (Springer International Publishing, 2018), pp. 161–170.
- [11] Alias, C., Salewski, U., Ortiz Ruiz, V. E., Alarcón Olalla, F. E., Neirão Reymão, J. D. E., & Noche, B. (2017, June). Adapting warehouse management systems to the requirements of the evolving era of industry 4.0. In *International manufacturing science and engineering conference* (Vol. 50749, p. V003T04A051). American Society of Mechanical Engineers.
- [12] Mittal, S., Khan, M. A., Romero, D., & Wuest, T. (2018). A critical review of smart manufacturing & Industry 4.0 maturity models: Implications for small and medium-sized enterprises (SMEs). *Journal of manufacturing systems*, 49, 194–214.
- [13] Jaspert, D., Ebel, M., Eckhardt, A., & Poepplbuss, J. (2021). Smart retrofitting in manufacturing: a systematic review. *Journal of Cleaner Production*, 312, 127555.
- [14] Верстат токарний патронно-центровий з числовим програмним керуванням моделі 16A20Ф3. Посібник з експлуатації. 16A20Ф3 РЕ. М. : ВНІТЕМР. 1990. 56 с.
- [15] Терехов В.М.(2006) Системы управления электроприводов: учебник для студ. высш. учеб. заведений / В. М. Терехов, О. И. Осипов. 304 с.

- [16] Білюк, І. С., Савченко, О. В., Оружак, І. В., Гудима, І. П., & Корзун, Б. М. (2023, March). Спосіб модернізації токарно-револьверного напівавтомата. In The 10th International scientific and practical conference “Modern methods of applying scientific theories”(March 14–17, 2023) Lisbon, Portugal. *International Science Group*. 2023. 481 p. (p. 453).
- [17] Білюк, І. С., Гуров, А. П., Савченко, О. В., Майборода, О. В., & Марченко, А. В. (2022). Спосіб модернізації привода подач токарного верстата. *Trends in science and practice of today*, 29, 306.
- [18] Biluk, I., Shareyko, D., Savchenko, O., Koshkin, D., Maiboroda, O., & Rudenko, A. (September 18-21, 2024). Stability of Electric Drives Optimized by Nonlinearity Proceedings of the 2024 IEEE 6th International Conference on Modern Electrical and Energy System, MEES 2024.

© Савченко О. В.

Дата надходження статті до редакції: 15.08.2025

Дата затвердження статті до друку: 02.09.2025

Опубліковано: 24.11.2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0