

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2026-86-54>

УДК 681.1

ГАЛІБРОДА Владислав

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0009-0000-7205-0312>

МАЙДАН Павло

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0003-3319-8730>

maidanps@gmail.com

МАКАРИШКІН Денис

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0003-3447-811X>

makaryshkinde@khmnu.edu.ua

СОКОЛАН Катерина

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-3513-8312>

sokolank@khmnu.edu.ua

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ МЕХАНІЗМУ ПЕРЕМІЩЕННЯ ЗАГОТОВОК

Сучасні тенденції розвитку систем автоматизації технологічних процесів йдуть у напрямку створення автоматичних систем, які здатні виконувати задані функції або процедури без безпосередньої участі людини. Роль людини-оператора полягає в підготовці необхідних вихідних даних, виборі алгоритму роботи (або методу вирішення) і аналізі отриманих результатів. Причому ці тенденції простежуються не лише при автоматизації складних технологічних процесів у промисловості, але й в інших сферах життєдіяльності людини. Для приведення механізмів у рух будуть використані асинхронні електродвигуни з короткозамкненим ротором, керування якими буде виконуватись за допомогою частотних перетворювачів. Впровадження даної системи автоматизації дозволить оптимізувати керування встановленими механізмами та зменшити роль людини-оператора в процесі керування. В роботі виконано дослідження роботи автоматизованого електроприводу механізму переміщення заготовок. Описано проблематику керування автоматизованим електроприводом механізму переміщення заготовок, охарактеризовано вимоги до електроприводу механізму переміщення заготовок. Виконано підбір основного обладнання системи та основних елементів силового ланцюга автоматизованого електроприводу механізму переміщення заготовок. Розраховано статичні характеристики автоматизованого електроприводу, параметри схем включення асинхронного електродвигуна та перехідні процеси автоматизованого електроприводу механізму переміщення заготовок, також було визначено інтегральні показники перехідних процесів.

Ключові слова: механізм переміщення, моделювання, електропривід, частотний перетворювач, автоматизована система керування, асинхронний двигун.

HALIBRODA Vladyslav, MAIDAN Pavlo,
MAKARYSHKIN Denys, SOKOLAN Kateryna
Khmelnitskyi National University

RESEARCH ON THE OPERATION OF AN AUTOMATED ELECTRIC DRIVE FOR A WORKPIECE TRANSFER MECHANISM

Current trends in the development of technological process automation systems are moving towards the creation of automatic systems capable of performing specified functions or procedures without direct human involvement. The role of the human operator is to prepare the necessary input data, select the operating algorithm (or solution method), and analyze the results obtained. Moreover, these trends can be observed not only in the automation of complex technological processes in industry, but also in other areas of human activity. Asynchronous electric motors with short-circuited rotors will be used to set the mechanisms in motion, which will be controlled by frequency converters. The implementation of this automation system will optimize the control of the installed mechanisms and reduce the role of the human operator in the control process.

The paper presents research the operation of an automated electric drive for a workpiece transfer mechanism. The problems of controlling the automated electric drive of the workpiece transfer mechanism are described, and the requirements for the electric drive of the workpiece transfer mechanism are characterized. The main equipment of the system and the main elements of the power circuit of the automated electric drive of the workpiece transfer mechanism have been selected. The static characteristics of the automated electric drive, the parameters of the asynchronous electric motor connection circuits, and the transient processes of the automated electric drive of the workpiece transfer mechanism are calculated, and the integral indicators of the transient processes are determined.

Keywords: movement mechanism, modeling, electric drive, frequency converter, automated control system, asynchronous motor.

Стаття надійшла до редакції / Received 02.03.2026
Прийнята до друку / Accepted 02.04.2026
Опубліковано / Published 31.05.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© ГАЛІБРОДА Владислав, МАЙДАН Павло, МАКАРИШКІН Денис,
СОКОЛАН Катерина

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОКІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Сучасні тенденції розвитку систем автоматизації технологічних процесів (САТП) йдуть у напрямку створення автоматичних систем, які здатні виконувати задані функції або процедури без безпосередньої участі людини. Роль людини-оператора полягає в підготовці необхідних вихідних даних, виборі алгоритму роботи (або методу вирішення) і аналізі отриманих результатів. Причому ці тенденції простежуються не лише при автоматизації складних ТП у промисловості, але й в інших сферах життєдіяльності людини.

Для створення людино-машинного інтерфейсу (НМІ) і вирішення завдань оперативного керування ТП буде використаний пульт керування, на якому оператор зможе вибирати необхідний режим роботи, здійснювати запуск механізму, визначати причину виникнення аварії тощо.

Для приведення механізмів у рух будуть використані асинхронні електродвигуни (АЕД) з короткозамкненим ротором, керування якими буде виконуватись за допомогою частотних перетворювачів (ЧП). Впровадження даної системи автоматизації дозволить оптимізувати керування встановленими механізмами та зменшити роль людини-оператора в процесі керування.

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

У сучасних наукових дослідженнях механізми переміщення заготовок розглядаються як важлива складова автоматизованих, гнучких та роботизованих виробничих систем. Значна кількість публікацій присвячена підвищенню ефективності транспортних операцій, скороченню допоміжного часу та інтеграції механізмів переміщення заготовок із технологічним обладнанням [1-3].

У працях вітчизняних і зарубіжних авторів наведено різні підходи до класифікації механізмів переміщення заготовок залежно від принципу дії, типу приводу та характеру руху. Найбільш поширеними є конвеєрні системи (стрічкові, роликові, ланцюгові), підйомно-транспортні пристрої та автоматизовані маніпулятори. У роботах [4] детально розглядаються конструктивні особливості таких механізмів та умови їх ефективного застосування в машинобудівному виробництві.

Значний пласт досліджень присвячений використанню електромеханічних приводів у транспортних механізмах. У працях [5-7] аналізуються характеристики АЕД, сервоприводів і частотно-керованих приводів, які забезпечують необхідну точність, плавність руху та можливість регулювання швидкості транспортування заготовок. Автори відзначають, що застосування сервоприводів дозволяє підвищити точність позиціонування та спростити інтеграцію транспортних механізмів у автоматизовані системи керування.

Окрему увагу в наукових публікаціях приділено робототехнічним системам переміщення заготовок. У роботах [8-10] механізми переміщення розглядаються як частина маніпуляційних комплексів, що виконують функції подачі, орієнтації та позиціонування деталей. Підкреслюється важливість синхронізації роботи механізмів транспортування з верстатами з ЧПК, роботами-маніпуляторами та складськими системами.

Сучасні дослідження також спрямовані на застосування методів комп'ютерного моделювання та цифрового проектування механізмів переміщення заготовок. У працях [11-13] описано використання САД/САЕ-систем для аналізу кінематики, динаміки та міцності елементів механізмів транспортування заготовок, а також для імітаційного моделювання їх роботи у складі виробничих ліній. Це дозволяє зменшити кількість експериментальних випробувань та підвищити обґрунтованість конструкторських рішень.

Таким чином, аналіз досліджень і публікацій показує, що механізми транспортування заготовок є об'єктом активного розвитку. Основні тенденції пов'язані з автоматизацією транспортних процесів, використанням інтелектуальних приводів, робототехнічних засобів та комп'ютерного моделювання. Водночас актуальними залишаються питання підвищення універсальності транспортних механізмів, зниження енерговитрат і забезпечення їх адаптації до змінних умов виробництва.

Тому механізм переміщення заготовок повинен бути призначений для транспортування заготовок між автоматизованими лініями (транспортерами) подачі готових виробів. Робоча машина повинна містити привід висунення руки 2, АЕД 1 і механізм-захвату 3.

Принцип роботи машини буде наступним: при натисканні людиною-оператором кнопки «Чергова заготовка» на пульті керування платформа з механізмом переміщення рухається у вертикальній площині і зупиняється навпроти одного з транспортерів. Потім привід, який відповідає за переміщення руки рухається вперед і чекає спрацювання механізму-захвату. Після цього рухається назад і зупиняється, чекаючи чергову команду від людини-оператора.

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Метою роботи є: дослідження роботи автоматизованого електроприводу механізму переміщення заготовок.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Роботизований комплекс (РК) (рис. 1) призначений для переміщення заготовок з автоматизованих ліній (транспортерів) 5 і 6 на транспортер 7.

Безпосередньо РК (рис. 1) містить механізм підйому 1, керований від АЕД 2, привід висунення руки 3 з АЕД 4, захват 12, керований пневмоклапаном. Вертикальні переміщення маніпулятора контролюються трьома індуктивними давачами 9, 10, 11 (давачі К1, К2, К3), встановленими прямо навпроти відповідних автоматизованих ліній для транспортування заготовки. По горизонталі привід руки контролюється двома давачами 13 і 14 (давачі К4, К5) крайніх лівого/правого положень. Наявність заготовок визначається спрацюванням давачів 15, 16 і 17 (давачі К6, К7, К8). Переміщення заготовок виконується за допомогою використання нереверсивних транспортерів 5, 6 і 7, при цьому дві автоматизовані лінії 5 і 6 включаються для подачі заготовок вліво, а автоматизована лінія 7 – вправо.

Цикл роботи автоматизованої системи наступний. При натисканні кнопки «Наступна заготовка» (у нижній частині екрану) з'являється заготовка на подаючій автоматизованій лінії 5 або 6 і переміщується без участі маніпулятора до спрацювання давача К6 або К7. Система повинна включити відповідний транспортер (команди Тр1 або Тр2) до відключення того ж давача. Після цього відбувається переміщення маніпулятора по вертикалі і горизонталі до даної заготовки (вихідне положення захвату передбачається розкрите) до спрацювання давачів К1/К2 і К5, закриття захвату (команда Захват) і відхід маніпулятора назад до кінцевого положення К4. Якщо на третій автоматизованій лінії 7 відсутня заготовка, маніпулятор переміщається вниз (Вн) і вправо (Впр) до спрацювання давачів К3 і К5, в іншому випадку система чекає звільнення цієї автоматизованої лінії (відсутності сигналу давача К8). Після установки руки маніпулятора біля третьої автоматизованої лінії 7 захват розтискається (розкрите положення), і при наявності сигналу давача К8 вмикається транспортер Тр3 і працює до зникнення сигналу давача К8. Далі цикл повторюється.

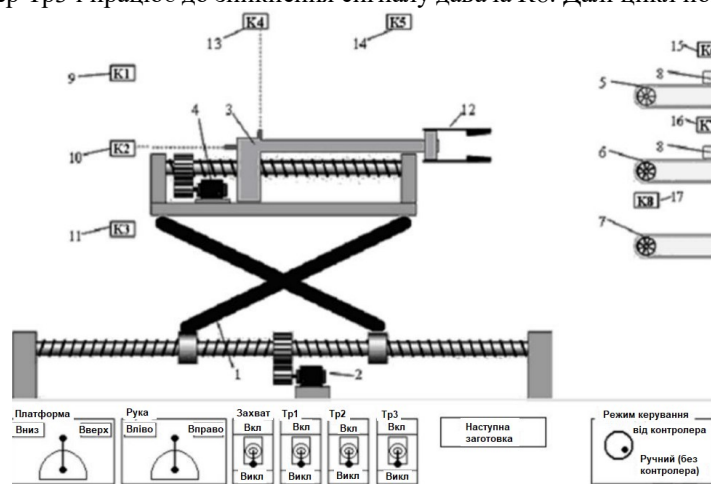


Рис. 1. Загальний вигляд РК переміщення заготовок

В якості АЕД із короткозамкненим ротором для конструкції РК переміщення заготовок вибираємо електродвигун краново-металургійної серії - 4МТКФ(Н)112L6 [14] із редуктором NMRV 025/030. Було виконано приведення статичних моментів і моментів інерції до валу АЕД, попередню перевірку АЕД та визначено час перехідного процесу на різних ділянках роботи АЕД перевірку за нагріванням.

Для керування АЕД використаємо частотний перетворювач (ЧП) фірми «АВВ» - модель ACS880-01-07A2-3 (рис. 2).

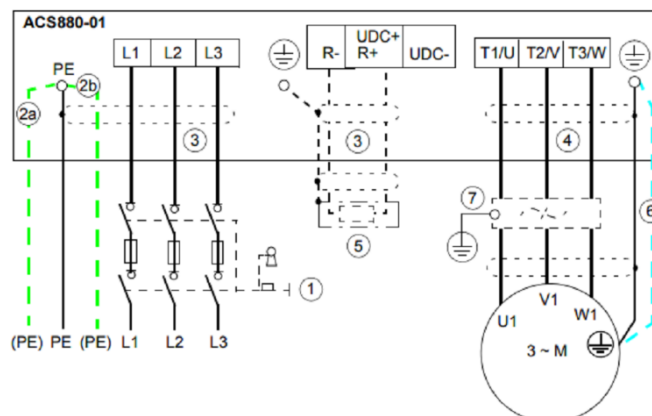


Рис. 2. Схема підключення ЧП ACS880 [15]

У вибраній системі електроприводу ЧП-АЕД потрібно визначити частоту f_1 і рівень напруги на статорі U_1 , при яких механічні характеристики будуть проходити через точки ustalених режимів. Рівень напруги на статорі визначається законом $U_1/f_1 = const$ [16, 17].

Визначимо синхронну швидкість руху, частоту і рівень напруги на статорі АЕД, згідно загальновідомих формул [18, 19] а тоді побудуємо необхідні графічні залежності за допомогою використання пакету MATLAB [20, 21].

При живленні АЕД від індивідуального ЧП з'являється можливість плавного регулювання рівнів напруги, тому перехідні процеси запуску/гальмування забезпечуються формуванням рівня напруги керування ЧП. У розімкнутій системі ЧП - АЕД найчастіше застосовують лінійне наростання рівнів напруги керування, що визначає лінійне наростання рівнів напруги живлення АЕД [18, 19].

Для формування лінійного закону зміни рівнів напруги керування на вхід ЧП підключають інтегральний задавач інтенсивності (ЗІ), вихідний рівень напруги якого при подачі на його вхід стрибка задаючого рівня напруги $U_{зад}$ змінюється за лінійним законом.

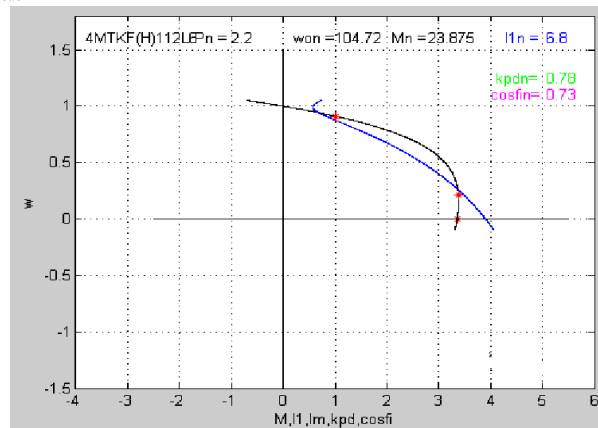


Рис. 3. Графічна залежність природної характеристики АЕД

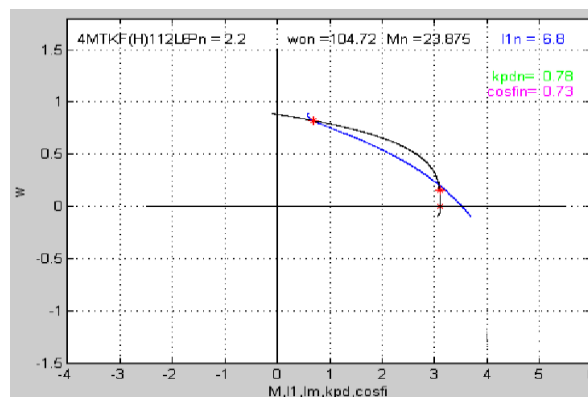


Рис. 4. Графічна залежність штучної характеристики при русі заготовки вперед

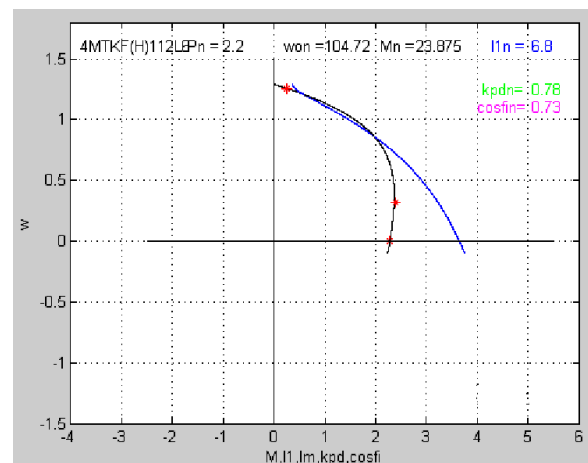


Рис. 5. Графічна залежність штучної характеристика при русі заготовки назад

При досягненні величини $U_{зад}$ наростання рівнів напруги на виході ЗІ припиняється. Вихідний рівень напруги ЗІ, таким чином, є керуючим рівнем напруги ЧП, а величина $U_{зад}$ визначається величиною базової сталої часу ЗІ $T_{зі}$, що чисельно рівна часу досягнення вихідного рівня напруги ЧП від 0 до базового значення $U_{ном}$ [16, 17].

Проведемо розрахунок перехідних процесів автоматизованого електроприводу механізму переміщення заготовок. Розрахунок і побудова характеристик перехідних процесів АЕД виконана за допомогою використання програми zipchad.m в програмному середовищі MATLAB (рис. 6-9) [20, 21].

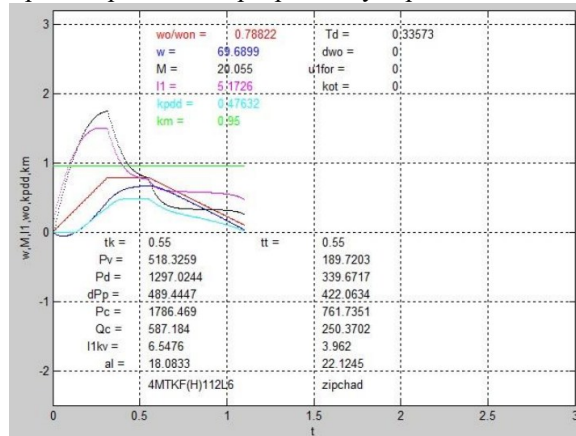


Рис. 6. Графічні залежності перехідних процесів запуску/гальмування руху вперед

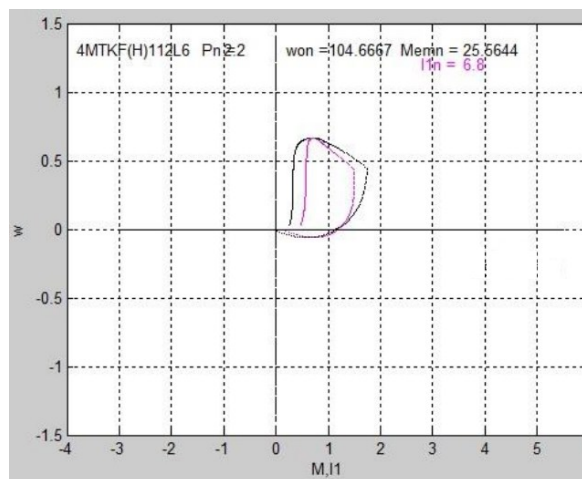


Рис. 7. Графічна залежність $\omega_{ном}$ від M, I_1 руху вперед ($0 - v_{роб}, v_{роб} - 0$)

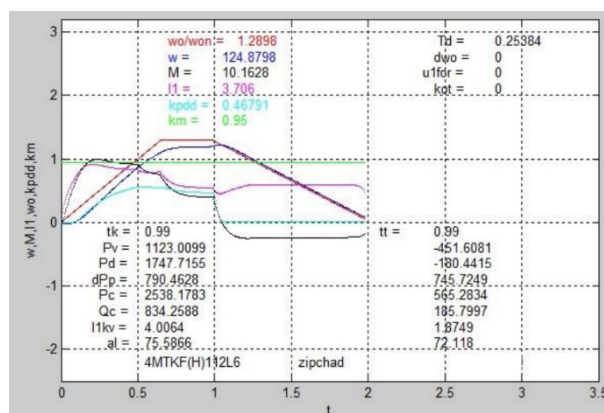


Рис. 8. Графічні залежності перехідних процесів запуску/гальмування руху назад

Далі визначимо інтегральних показників перехідних процесів. Виконаємо перевірку на перевантажувальну здатність - обрані АЕД і ЧП рівнів напруги виконують вимоги перевантажувальної здатності, оскільки навантажувальні діаграми показують, що максимальні значення сили струму і моменту

АЕД не перевищують допустимі значення.

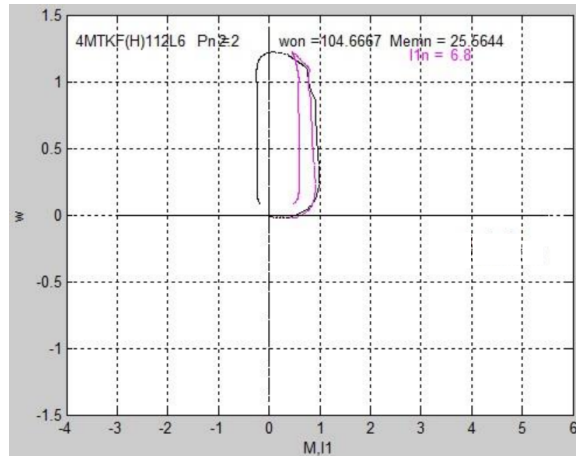


Рис. 9. Графічна залежність $\omega_{ном}$ від M, I_1 руху назад ($0 - v_{роб}, v_{роб} - 0$)

Необхідно також виконати перевірку нагрівання АЕД і ЧП, для цього визначимо величину еквівалентної сили струму згідно загальновідомих формул [18, 19].

На рисунках 6 та 8 наведено значення середньоквадратичної сили струму I_{kv} за час пуску t_k , за час гальмування t_l для однієї ділянки руху.

Коефіцієнт погіршення тепловіддачі зупиненого АЕД β_0 залежить від конструктивного виконання конструювання та умов вентиляції. Погіршення умов охолодження АЕД в перехідних режимах враховується коефіцієнтом погіршення тепловіддачі β_l , якому, залежно від швидкості обертання, можна присвоїти значення з таблиць.

Виконаємо розрахунок енергетичних показників електроприводу. Для оцінки циклового ККД слід брати до обрахунку відрізки часу, початку і кінцю яких відповідає однакова величина енергії, запасена в елементах приводу. Для механізмів, що розглядаються таким відрізком є цикл роботи, коли механізм повертається у вихідне положення.

Для розрахунку енергетичних показників використовуємо раніше отримані за допомогою ЕОМ дані, а саме рисунки 6 і 8. З яких отримуємо наступні вирази для різних видів енергії.

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

Проведено моделювання роботи автоматизованого електроприводу механізму переміщення заготовок. Виконано підбір основних елементів силового ланцюга автоматизованого електроприводу механізму переміщення заготовок. Розраховано статичні характеристики автоматизованого електроприводу, параметри схем включення асинхронного електродвигуна та перехідні процеси автоматизованого електроприводу механізму переміщення заготовок, також було визначено інтегральні показники перехідних процесів.

References

1. Havrylenko V.F. Avtomatyzatsiia vyrobnychkh protsesiv. K.: Vyshcha shkola, 2010.
2. Groover M.P. Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing. Pearson, 2016.
3. Kalpakjian S., Schmid S. Manufacturing Engineering and Technology. Pearson, 2014.
4. Zahirniak M.V., Nevzlin B.I. Elektromekhanichni systemy avtomatyzatsii. K.: Znannia, 2009.
5. Bose B.K. Modern Power Electronics and AC Drives. Prentice Hall, 2002.
6. Bolotov V.A. Elektropyvod i avtomatyzatsiia promyslovykh ustanovok. Kharkiv, 2012.
7. Leonhard W. Control of Electrical Drives. Springer, 2001.
8. Craig J.J. Introduction to Robotics: Mechanics and Control. Pearson, 2018.
9. Spong M., Hutchinson S., Vidyasagar M. Robot Modeling and Control. Wiley, 2006.
10. Sciacivco L., Siciliano B. Modelling and Control of Robot Manipulators. Springer, 2012.
11. Norton R.L. Design of Machinery. McGraw-Hill, 2020.
12. Budynas R., Nisbett J. Shigley's Mechanical Engineering Design. McGraw-Hill, 2015.
13. Groover M.P. Fundamentals of Modern Manufacturing. Wiley, 2013.
14. Kranovi elektrodvyhuny MTH, MTF, MTKN, MTKF. URL: <https://slemz.com.ua/elektrodviguni/kranovi> (data zvernennia: 15.09.2025).
15. ACS880-01-07A2-3 Chastotnyi peretvoriuvach ACS880 3.0kVt 3-f/380. URL: <https://chastotnik.ua/abb-r-acs880-01-07a2-3?srsId=AfmBOoryWtwBzQnp22LEamDdlXRP0wXPY9eOkq28F0gYAMye3KgrBTsu> (data zvernennia: 10.10.2025).
16. Kazachkovskiy M.M. Avtonomni peretvoriuvachi ta peretvoriuvachi chastoty: navchalnyi posibnyk. Dnipropetrovsk : NHA Ukrainy, 2000. 197 s.
17. Senko V.I., Trubitsyn K.V., Chybelis V.I. InVENTORY i peretvoriuvachi chastoty: navch. posib. Kyiv : Vydavnytstvo Lira-K, 2020.

300 s. ISBN 978-617-7844-11-1.

18. Vasyleha P.O. Elektropryvod robochykh mashyn: pidruchnyk. Sumy, 2022. 290 s. ISBN 978-966-657-900-6.

19. Pavlenko T.P., Donets O.V., Petrenko O.M. Avtomatyzovanyi elektropryvod zahalnopromyslovykh mekhanizmiv: konspekt leksii (dlia studentiv usikh form navchannia za spetsialnistiu 141 – Elektroenerhetyka, elektrotekhnika, elektromekhanika). Kharkiv : KhNUMH im. O. M. Beketova, 2018. 132 s.

20. Lazariev Yu.F. Modeliuvannia dynamichnykh system u Matlab: elektronnyi navchalnyi posibnyk. Kyiv : NTUU «KPI», 2011. 421 s.

21. Hoblyk N.M., Hoblyk V.V. MATLAB v inzhenernykh rozrakhunkakh. Kompiuternyi praktykum: navchalnyi posibnyk. 3-tie vyd., dopovn. Lviv : Vydavnytstvo Lvivskoi politekhniki, 2020. 190 s.: il., tabl., skhemy, hrafiky.