

УДК 625.681.5
DOI [https://doi.org/10.15589/znp2026.1\(503\).1.24](https://doi.org/10.15589/znp2026.1(503).1.24)

OPTIMIZATION OF ELECTRIC MOTOR OPERATION BASED ON INTELLIGENT DIAGNOSTICS AND ADAPTIVE CONTROL

ОПТИМІЗАЦІЯ РОБОТИ ЕЛЕКТРОДВИГУНА НА ОСНОВІ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ ТА АДАПТИВНОГО КЕРУВАННЯ

Svitlana V. Haidukevych
SoleykoS@i.ua
ORCID: 0000-0001-5910-5921
Nadiia P. Semenova
0677524248@ukr.net
ORCID: 0000-0002-8478-9429

С. В. Гайдукевич,
старший викладач
Н. П. Семенова,
старший викладач

*Separated subdivision of the National university of bioresources and natural use of Ukraine
"Berezhansky agrotechnical institute", Berezhany*

*Відокремлений підрозділ Національного університету біоресурсів і природокористування України
«Бережанський агротехнічний інститут», м. Бережани*

Abstract. Traditional automation systems today do not fully satisfy modern operational requirements, since they are mainly not designed for dynamic modes and do not take into account sudden changes in the load on the shaft of electric motors during the operating cycle.

In this regard, the scientific and technical problem of optimizing the operation of asynchronous electric motors under variable and non-stationary operating conditions is relevant.

The aim of the work is to optimize the operating modes of an asynchronous electric motor based on intelligent diagnostics and adaptive control in order to increase its efficiency, reliability and service life under variable load conditions.

Method. An intelligent system has been developed that combines elements of a classical control system with algorithms for analytical processing of controlled parameters of an electric motor and modern methods for diagnosing its technical condition in real time. The system provides continuous collection and processing of controlled parameters, detection of initial signs of defects, assessment of technical condition and calculation of residual resource, as well as adaptive correction of operating modes of the electric drive depending on the current load.

Using the example of intelligent control of the electric motor of the extruder main body drive, a corresponding mathematical model has been developed and diagnostics and adaptive control algorithms have been implemented.

Results. The effectiveness of the application of innovative diagnostics algorithms, adaptive control, and high-tech automation tools has been demonstrated, which allows reducing energy consumption, minimizing emergency modes, and increasing the stability of the technological process. The results obtained confirm the feasibility of implementing intelligent automation systems operating under variable load conditions. Continuous control and monitoring of the technical condition of the electric motor allows for timely detection of deviations of parameters from nominal values and prevention of the development of emergency modes.

Scientific novelty. The article considers innovative approaches to the practical use of intelligent devices controlled and configured from a personal computer or smartphone to solve problems of reliability and energy efficiency.

Practical significance. The results of the research can be used in the modernization of existing automation systems, the introduction of intelligent electric drives into extrusion technological lines and other technological processes with variable operating modes, as well as in the educational process during the training of electromechanics and automation specialists to demonstrate modern approaches to monitoring, diagnosing, and controlling electric motors.

Key words: electric motor; intelligent system; adaptive control; extruder drive; diagnostics; monitoring; reliability.

Анотація. Традиційні системи автоматизації на сьогоднішній день не повною мірою задовольняють сучасні експлуатаційні вимоги, оскільки вони переважно не розраховані на динамічні режими і не враховують у процесі робочого циклу різкі зміни навантаження на валу електродвигунів.

У зв'язку з цим актуальною є науково-технічна проблема оптимізації роботи асинхронних електродвигунів в умовах змінних і нестационарних режимів експлуатації.

Метою роботи є оптимізація режимів роботи асинхронного електродвигуна на основі інтелектуального діагностування та адаптивного керування з метою підвищення його ефективності, надійності та ресурсу експлуатації за умов змінного навантаження.

Методика. Розроблено інтелектуальну систему, яка поєднує елементи класичної системи керування з алгоритмами аналітичної обробки контрольованих параметрів електродвигуна та сучасними методами діагностики його технічного стану в режимі реального часу. Система забезпечує безперервний збір та обробку контрольованих параметрів, виявлення початкових ознак дефектів, оцінювання технічного стану та розрахунків залишкового ресурсу, а також адаптивну корекцію режимів роботи електроприводу залежно від поточного навантаження. На прикладі інтелектуального керування електродвигуном приводу головного органу екструдера розроблено відповідну математичну модель та реалізовано алгоритми діагностування й адаптивного керування.

Результати. Продемонстровано ефективність застосування інноваційних алгоритмів діагностики, адаптивного керування та високотехнологічних засобів автоматики, що дозволяє знизити енерговитрати, мінімізувати аварійні режими та підвищити стабільність технологічного процесу. Отримані результати підтверджують доцільність впровадження інтелектуальних систем автоматизації, що працюють в умовах змінних навантажень. Безперервний контроль і моніторинг технічного стану електродвигуна дозволяє своєчасно виявляти відхилення параметрів від номінальних значень та запобігати розвитку аварійних режимів.

Наукова новизна. У статті розглянуто інноваційні підходи до практичного використання інтелектуальних пристроїв, керованих і налаштованих з персонального комп'ютера або смартфона для вирішення проблем надійності та енергоефективності.

Практична значимість. Результати досліджень можуть бути використані при модернізації існуючих систем автоматизації, впровадженні інтелектуальних електроприводів у технологічні лінії екструдювання та інші технологічні процеси зі змінними режимами роботи, а також у навчальному процесі під час підготовки фахівців з електромеханіки та автоматизації для демонстрації сучасних підходів до моніторингу, діагностики та керування електродвигунами.

Ключові слова: електродвигун; інтелектуальна система; адаптивне керування; привід екструдера; діагностика; моніторинг; надійність.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Асинхронні електродвигуни переважно функціонують в умовах змінних і нерівномірних навантажень, впливу вібрації, температурних коливань, електричних перевантажень та ударних механічних дій, що є ключовими чинниками деградації їх технічного стану та порушення узгодженої роботи компонентів технологічних установок. Такі негативні аспекти на сьогоднішній день не задовольняють умови експлуатації, оскільки призводять до прискореного зношування ізоляції, підвищення енерговитрат, зростання аварійності та зниження ресурсу електродвигуна.

Враховуючи сучасний розвиток цифровізації та високотехнологічного обладнання, одним із ключових напрямів є організація безперервного діагностування технічного стану асинхронних двигунів в режимі реального часу. Інтеграція систем діагностування з системами управління відкриває можливості для реалізації адаптивних стратегій управління, які враховують технічний стан обладнання [1, с. 397], зміну параметрів електродвигуна, рівень його зношення та вплив зовнішніх збурень.

Таким чином, це зумовлює об'єктивну необхідність розробки інтелектуальних та адаптивних систем керування, що поєднують засоби цифрового вимірювання, аналітичної обробки даних, прогнозування технічного стану та автоматичного прийняття рішень. Оскільки своєчасне і точне виявлення несправностей сприяє підвищенню надійності електричних

двигунів, скорочує терміни ремонту і зменшує непередбачені витрати у разі аварійних відмов [2, с. 29].

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Ряд наукових досліджень у сфері електроприводів спрямовані на підвищення енергоефективності та надійності асинхронних електродвигунів. Значна увага приділяється використанню сучасних підходів до систем автоматизації та комплексу різних методів діагностування. Водночас більшість традиційних рішень орієнтовані на контролі окремих параметрів. А кожен з параметрів, що розглядається окремо, як вважають науковці Худий Є. Г., Пельтек І. І. та інші, не надає достатньої інформації для прийняття рішення про необхідність проведення ремонту електричної машини та визначення масштабу цього ремонту [3, с. 549]. Тому такі системи не забезпечують комплексного аналізу технічного стану електродвигуна в умовах динамічних режимів роботи, що суттєво обмежує можливості своєчасного виявлення дефектів та обґрунтованого прогнозування аварійного стану. Науковці Зубенко О. В., Телюта Р. В., Власенко Л. О. та інші зазначають, що в умовах швидкоплинності технологічних процесів, постійної змінюваності збурюючих дій та негативних факторів використання прогнозних методів дозволяє суттєво підвищити ефективність керувальних [4, с. 118] впливів. Своєчасне діагностування і прогнозування поточного стану електродвигуна в ракурсі його впливу на період

безвідмовної роботи [5, с. 55] розглядається як одна з ключових передумов зниження кількості відмов у процесі експлуатації.

У працях багатьох авторів описані алгоритми контролю стану ізоляції, підшипників, ротора, статорних обмоток та механічного навантаження. Незважаючи на наявність різноманітних методів підвищення надійності асинхронних електродвигунів, більшість із них не забезпечують належного рівня адаптації до умов роботи з істотно змінними навантаженнями та стохастичними збуреннями. Особливо це характерно для електроприводів головних робочих органів екструдерів ліній виготовлення кормів, де навантаження на валу електродвигуна змінюється в широких межах залежно від різноманітних чинників.

Такі науковці як Мазуренко Л. І., Гребеніков В. В., Джура О. В., Попович О. М., Бібік О. В., Головань І. В., Шуруб Ю. В. і Романенко В. І. вважають, що підвищити ефективність та надійність роботи асинхронного електродвигуна можливо шляхом збільшення перевантажувальної здатності електроприводу в динамічних режимах для подолання викидів випадкових збурень [6, с. 77]. Для реалізації такого підходу авторами запропоновано доповнення системи керування фільтром випадкової величини. В якості фільтра використати статистично оптимальний регулятор, який синтезується відповідно до критерію мінімізації середньоквадратичної похибки регульованого показника, зокрема коефіцієнта несиметрії.

Аналіз результатів наведених досліджень свідчить, що доцільніше перейти від локальних методів компенсації збурень до більш комплексних підходів керування електроприводами, які поєднують підвищену перевантажувальну здатність з адаптацією до стохастичного характеру зовнішніх впливів. За таких умов актуальним є створення більш прогресивних систем керування і захисту електроприводів, здатних не лише підтримувати стабільність технологічних параметрів та оперативно реагувати на їх відхилення, а й здійснювати комплексне оцінювання технічного стану електродвигуна, передбачати виникнення негативних процесів та здійснювати превентивні заходи захисту.

Метою статті є обґрунтування та розробка підходів до оптимізації режимів роботи асинхронного електродвигуна на основі інтелектуального діагностування його технічного стану та адаптивного керування з урахуванням динамічних змін навантаження, що забезпечує підвищення енергоефективності, надійності та довговічності електроприводу в умовах реальної експлуатації.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Асинхронні електродвигуни є ключовими елементами більшості сучасних технологічних установок, оскільки саме вони забезпечують перетворення електричної енергії в механічну, а їх технічний стан безпосередньо впливає на стабільність та

ефективність роботи обладнання. У процесі тривалої експлуатації електродвигуни піддаються впливу ряду негативних факторів, таких як перевантаження, перегрів, порушення фазності, зниження напруги та інші нештатні режими [7, с. 68] роботи, що в сукупності призводить до прискореного фізичного зношування їх конструктивних елементів. Відомо, що процеси старіння ведуть до погіршення технічних характеристик рухомих частин двигуна [8, с. 22], що, в свою чергу, спричиняє зниження його енергоефективності, надійності та загального ресурсу роботи. Подальша експлуатація електродвигунів, які мають відхилення контрольованих параметрів є потенційно небезпечною, оскільки може спонукати аварійні ситуації в складі технологічних установок. Це обумовлює необхідність постійного контролю та діагностування технічного стану електродвигунів з метою своєчасного виявлення деградаційних процесів та запобігання розвитку аварійних режимів.

Сьогодення диктує нові умови, темпи і вимоги до керування технологічними процесами [4, с. 118]. Останні тенденції в розвитку технологій призводять до впровадження нових, інноваційних технологій в усі сфери життя [9, с. 21] та виробництва, що супроводжується ускладненням технологічних процесів і зростанням вимог до надійності електроприводів. За таких умов традиційні системи керування, які функціонують за фіксованими алгоритмами та не враховують змінний характер навантажень і поточний технічний стан обладнання, не забезпечують належного рівня адаптації до нестаціонарних режимів роботи. Це зумовлює необхідність переходу від класичних систем керування до інтелектуальних рішень, що базуються на цифрових вимірюваннях, комплексному аналізі великого обсягу інформації, а також використанні сучасних методів діагностування та прогнозування технічного стану електродвигуна в режимі реального часу. Такий підхід створив передумови для розробки інтелектуальної системи контролю, діагностування та адаптивного керування електродвигунами, зокрема приводом головного робочого органу (шнеку) екструдера (рис. 1). Актуальність застосування такої системи обумовлена тим, що в процесі екструдування кормових сумішей і харчових продуктів навантаження на електродвигун істотно змінюється залежно від вологості, складу, фізико-механічних властивостей сировини, зміни температурного режиму, гранулометричних характеристик і швидкості подачі сировини, що призводить до нестаціонарних режимів його роботи. У таких умовах асинхронний електродвигун приводу шнека функціонує у нестандартних умовах, що супроводжується значними коливаннями струмів, електромагнітного моменту та теплових навантажень.

У розробленій інтелектуальній системі керування електродвигуном потужністю 30 кВт, швидкістю

обертання 1470 об/хв приводу екструдера E-250 продуктивністю 250 кг/год. ключову роль відіграє наявність зворотного зв'язку, який забезпечує можливість гнучкої зміни алгоритмів роботи електродвигуна відповідно до поточного технологічного стану. Це дозволяє інтегрувати систему з іншими комплексами для моніторингу та діагностики, що знижує витрати та гарантує безперервність процесів [10, с. 207]. Використання таких передових методів ідентифікації відкриває нові можливості для оптимізації [11, с. 8] режимів роботи електродвигуна шляхом інтелектуального діагностування та адаптивного керування, які базуються на аналізі поточних і прогнозованих змін контрольованих величин. В результаті система здатна своєчасно коригувати керуючі впливи, мінімізувати перевантаження, знижувати пускові та перехідні струми, а також підвищувати енергоефективність і довговічність електроприводу в умовах змінного технологічного навантаження. Оскільки сучасні методи адаптивного керування ґрунтуються на широкому спектрі підходів, що поєднують класичні алгоритми автоматичного регулювання з інтелектуальними методами обробки інформації, такими як оцінювання змінних параметрів в реальному часі, прогнозування стану та аналіз контрольованих величин, автоматичне налаштування з урахуванням динамічних змін навантаження, реалізація нечіткої логіки та гібридних алгоритмів, стає можливим формування адаптивних керуючих впливів, здатних забезпечувати узгодження режимів роботи електродвигуна з реальними умовами експлуатації.

Розроблена інтелектуальна система (рис. 1) формується за модульним принципом і складається з функціональних блоків, які виконують відповідні функції.

За допомогою датчиків в блок збору інформації безперервно поступає відомість про стан контрольованих параметрів електродвигуна, зокрема електромагнітного моменту, напруги живлення, фазних струмів, частоти вібрації, температури обмоток і корпусу та швидкості обертання. Одержана інформація поступає в блок первинної обробки, де проводиться її фільтрація, нормалізація, перехід у dq-координати, тобто перетворення в сигнали зручні для подальшого використання. В блоці інтелектуальної діагностики оцінюється технічний стан електродвигуна на основі аналізу змінних параметрів у реальному часі і еталонних величин, визначаються відхилення та характерні ознаки дефектів (стан підшипників, перекид фаз, перевантаження, заклинювання). На основі результатів аналізу блок прогнозування визначає тенденції розвитку деградаційних процесів, оцінює ризики, проводить обчислення залишкового ресурсу електродвигуна, що дозволяє реалізувати превентивні стратегії керування та захисту. Блок адаптивного керування автоматично корегує режими роботи

з урахуванням результатів діагностики та прогнозування, тобто виконує: обмеження пускового моменту, зменшення струму, оптимізацію навантаження, формування керуючих дій. Наявність зворотного зв'язку надає змогу узгоджено змінювати параметри регуляторів, обмежувати пускові та перехідні струми, зменшувати пікові значення електромагнітного моменту та оптимізувати енергоспоживання. Блок апаратного захисту реагує на аварійні режими і забезпечує захист електродвигуна від перевантажень, короткого замикання, асиметрії фаз, перевищення температури та критичних відхилень параметрів. Блок інтерфейсу та моніторингу виконує безперервну візуалізацію параметрів та надає оператору доступ до інформації. Блок комунікації та архівації забезпечує збереження інформації в базі даних та передачу даних (Ethernet / Modbus). Кожний блок має як апаратну (сенсори, ПЧ, контролери), так і програмну складову (алгоритми обробки, діагностики, прогнозування, SCADA), а разом вони формують самонавчальний замкнутий цикл керування і захисту двигуна (рис. 1).

Для розгляду динамічних електромагнітних і механічних процесів, що відбуваються в асинхронному електродвигуні приводу екструдера, доцільно використати математичну модель, яка описується у плоскій ортогональній системі координат dq , що обертається з синхронною або довільно заданою кутовою швидкістю ω . Такий підхід забезпечує перехід від змінних у фазних координатах до узагальнених, що суттєво спрощує аналіз нестационарних режимів роботи електроприводу екструдера.

Як відомо, електрична частина асинхронного електродвигуна в системі координат dq описується системою диференціальних рівнянь четвертого порядку, які характеризують динаміку струмів та потокозчеплень у статорному та роторному контурах. Механічна частина двигуна, що визначає зміну електромагнітного моменту та кутової швидкості ротора, подається системою диференціальних рівнянь другого порядку. При цьому всі електричні змінні та параметри приведені до сторони статора, що є загальноприйнятим у теорії електропривода.

Перехід від фазних струмів у систему dq (Фур'є) можна представити у вигляді:

Фазні струми:

$$i_a(t), i_b(t), i_c(t).$$

Модель Кларк→Park:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

де $\theta = \int \omega_e dt$ – електричний кут; $\omega_e = p \cdot \omega_m$

Систему диференціальних рівнянь, що описують динаміку та перехідні процеси асинхронного електродвигуна приводу екструдера при зміні контрольованих параметрів можна представити в наступному вигляді [12, с. 111]:

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\psi_{sd}}{dt} - \omega_s \psi_{sq} \\ u_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\psi_{sq}}{dt} + \omega_s \psi_{sd} \\ u_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\psi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \psi_{rq} \\ u_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\psi_{rq}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \psi_{rd} \end{cases} \quad (2)$$

де u_{sd}, u_{sq} – проекції напруги статора по осях d та q ; i_{sd}, i_{sq} – проекції струмів статора по осях d та q ; i_{rd}, i_{rq} – струми ротора приведені до статора; R_s, R_r – активні опори відповідно статора і ротора; ψ_{sd}, ψ_{sq} – потокозчеплення статора; ψ_{rd}, ψ_{rq} – потокозчеплення ротора; $\omega_s - \omega_r$ – ковзна кутова швидкість; ω_s – довільна або синхронна швидкість.

Оскільки в асинхронному двигуні ротор короткозамкнений то його напруги дорівнюють нулю:

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\psi_{sd}}{dt} - \omega_s \psi_{sq} \\ u_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\psi_{sq}}{dt} + \omega_s \psi_{sd} \\ 0 = R_r i_{rd} + \frac{d\psi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \psi_{rq} \\ 0 = R_r i_{rq} + \frac{d\psi_{rq}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \psi_{rd} \end{cases} \quad (3)$$

Проекції векторів потокозчеплення статора та ротора двигуна описуються рівняннями [13, с. 50]:

$$\begin{cases} \psi_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \\ \psi_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \\ \psi_{rd} = L_r i_{rd} + L_m i_{sd} \\ \psi_{rq} = L_r i_{rq} + L_m i_{sq} \end{cases} \quad (4)$$

де L_s, L_r – індуктивні опори статора і ротора; L_m – взаємна магнітна індукція статора і ротора (зв'язку).

Диференційні рівняння струмів можна записати наступним чином:

$$\begin{cases} \frac{d\psi_{sd}}{dt} = u_{sd} - R_s i_{sd} + \omega_s \psi_{sq} \\ \frac{d\psi_{sq}}{dt} = u_{sq} - R_s i_{sq} - \omega_s \psi_{sd} \\ \frac{d\psi_{rd}}{dt} = -R_r i_{rd} + (\omega_s - \omega_r) \psi_{rq} \\ \frac{d\psi_{rq}}{dt} = -R_r i_{rq} - (\omega_s - \omega_r) \psi_{rd} \end{cases} \quad (5)$$

Електромагнітний момент асинхронного двигуна екструдера буде виражатися за формулою:

$$M_e = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r} (\psi_{rd} i_{sq} - \psi_{rq} i_{sd}), \quad (6)$$

де p – кількість пар полюсів.

Механічне рівняння руху, яке описує динаміку обертання електроприводу визначається за формулою:

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = M_e - M_{нв} - \beta \omega_r, \quad (7)$$

де J – приведений момент інерції ротора і навантаження (шнека екструдера); $M_{нв}$ – момент навантаження, що змінюється в процесі екструдуювання; β – коефіцієнт в'язкого тертя.

Загальний вигляд:

$$\begin{cases} \dot{\psi}_{sd} = u_{sd} - R_s i_{sd} + \omega_s \psi_{sq} \\ \dot{\psi}_{sq} = u_{sq} - R_s i_{sq} - \omega_s \psi_{sd} \\ \dot{i}_{rd} = \frac{-R_r i_{rd} + (\omega_s - \omega_r) \psi_{rq} - \dot{\psi}_{rd}}{L_r} \\ \dot{i}_{rq} = \frac{-R_r i_{rq} - (\omega_s - \omega_r) \psi_{rd} - \dot{\psi}_{rq}}{L_r} \\ M_e = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r} (\psi_{rd} i_{sq} - \psi_{rq} i_{sd}) \\ J \dot{\omega}_r = M_e - M_{нв} - \beta \omega_r \end{cases} \quad (8)$$

У в системі координат dq асинхронного електродвигуна електромагнітний момент визначається q -складовою, а d -складова відповідає за формування

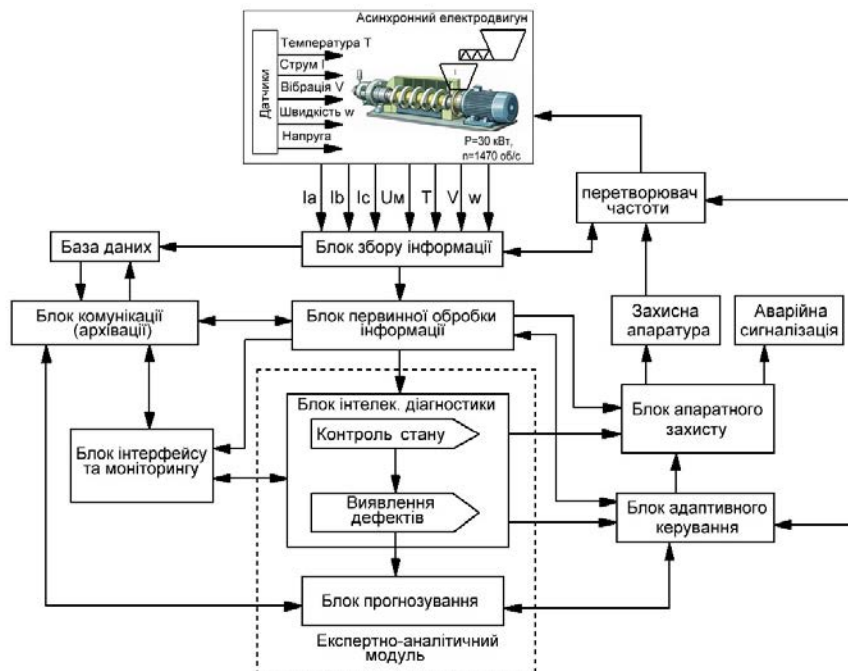


Рис. 1. Структурна схема інтелектуальної системи керування, контролю та захисту електродвигуна приводу головного робочого органу екструдера

потокочеплення, що забезпечує повне розділення каналів керування моментом і потоком.

Після перетворення трифазної системи в координати dq синусоїдальні величини переходять у сталий (постійний) вигляд. Це дає змогу розділити процеси керування потоком і моментом: складова струму i_{sd} відповідає за формування магнітного потоку, тоді як i_{sq} визначає електромагнітний момент. Такий підхід формує базу для реалізації адаптивного керування, прогнозних алгоритмів та векторного регулювання приводу.

Електромагнітний момент асинхронного електродвигуна визначається в реальному часі на основі вимірюваних фазних струмів шляхом їх перетворення у dq-систему координат. У вазі орієнтації системи керування по потокочепленню ротора момент є пропорційним q-складовій струму, що забезпечує ефективну реалізацію адаптивного керування та функцій захисту.

Наведені системи рівнянь можна використати в середовищі MATLAB/Simulink для аналізу пускових і перехідних режимів, а також для розробки адаптивних та інтелектуальних алгоритмів керування електроприводом головного робочого органу екструдера.

Інтелектуальна система використовує наступні елементи:

- частотний перетворювач для плавного регулювання швидкості та електромагнітного моменту обертання;
- програмований логічний контролер для реалізації алгоритмів адаптивного керування;
- систему датчиків для збору інформації про електричні, механічні та теплові контрольовані параметри в режимі реального часу, а також IoT-пристрої для віддаленого моніторингу стану електродвигуна приводу екструдера;
- апаратні та програмні засоби захисту від аварійних і ненормальних режимів роботи;
- підсистему предиктивної діагностики на основі методів штучного інтелекту для прогнозування технічного стану та запобігання відмовам і простою обладнання.

Комплексне поєднання перелічених вище компонентів забезпечує безперервний контроль, аналіз і прогнозування стану електродвигуна в умовах динамічного технологічного навантаження. Така система дозволяє інтегрувати звичайний електродвигун у середовище «розумного виробництва», реалізувати принципи цифрового аналізу електроприводу головного робочого органу екструдера та перейти від реактивного до превентивного керування. Адаптивна система має здатність автоматичного налаштування параметрів керування в залежності від умов експлуатації, це в свою чергу дозволяє підвищити надійність та ефективність роботи [14, с. 29] екструдера.

Особливо важливою перевагою інтелектуальної системи, яка реалізує алгоритми діагностування, є можливість раннього виявлення дефектів і передаварійних станів, пов'язаних з перевантаженням, зростанням температури обмоток та аномаліями робочих режимів. Це забезпечує прогнозування технічного стану електродвигуна, підвищує рівень його захисту та дає змогу суттєво знизити експлуатаційні витрати.

Таким чином впровадження інтелектуальної системи контролю та адаптивного керування, на відміну від традиційних підходів (табл. 1), забезпечує комплексне зростання енергоефективності, надійності та ресурсу роботи асинхронного електродвигуна приводу екструдера, а також підвищує ефективність функціонування всієї електромеханічної системи. Це дозволяє не лише стабілізувати роботу екструдера, а й забезпечити оптимальні умови роботи електродвигуна протягом усього технологічного циклу (табл. 2).

Номінальний момент електродвигуна становить:

$$M_n = 9550 \cdot \frac{P_n}{n_n} = 9550 \cdot \frac{30}{1470} \approx 195 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (8)$$

де P_n – номінальна потужність, Вт; n_n – номінальна швидкість обертання, об/хв.

Застосування інтелектуального адаптивного керування дозволяє знизити пусковий момент електродвигуна приблизно на 25-30% порівняно з традиційним методом прямого пуску, що забезпечує зменшення механічних навантажень на вал шнека екструдера та зниження динамічних напружень у механічній частині приводу.

Для електродвигуна приводу екструдера механічна характеристика $M=f(n)$ істотно залежить від методу керування (рис. 2). У випадку традиційного керування (прямий пуск) характеристика має різко виражену нелінійність у зоні малих швидкостей, відсутня можливість корекції моменту залежно від зміни технологічного навантаження, що призводить до прискореного зносу підшипників та муфт, підвищення вібрації і зменшення ресурсу роботи електродвигуна.

Використання інтелектуальної системи керування на основі адаптивних алгоритмів забезпечує узгодження електромагнітного моменту двигуна з моментом опору шнека, що робить механічну характеристику більш плавною та керованою. При цьому зменшуються пікові значення струму та моменту, стабілізується режим роботи електропривода та забезпечується його оптимальна взаємодія з технологічним навантаженням.

Таким чином інтелектуальне адаптивне керування є особливо ефективним у режимах змінного навантаження, оскільки дозволяє підвищити довговічність механічних вузлів, зменшити енергетичні втрати та збільшити ресурс асинхронного електродвигуна приводу екструдера.

Таблиця 1. Порівняльна характеристика традиційної та інтелектуальної систем керування електродвигуном приводу екструдера

Критерій	Традиційна система керування	Інтелектуальна система контролю та адаптивного керування
Принцип керування	Фіксовані параметри швидкості та напруги	Адаптивне керування на основі поточного навантаження
Реакція на зміну навантаження	Запізнена, після перевищення порогів	Оперативна, у режимі реального часу
Час реакції на перевантаження	1,2–1,7 с	0,12–0,25 с
Урахування динамічних режимів	Не враховуються або враховуються частково	Повністю враховуються
Контроль електричних параметрів	Струм і напруга з пороговим захистом	Струм, напруга, частота, cosφ, спектральні складові
Контроль теплового стану	Обмежений (теплове реле)	Безперервний моніторинг температури обмоток і корпусу
Діагностика технічного стану	Відсутня може бути періодична	Безперервна інтелектуальна діагностика
Виявлення дефектів	Після появи аварійних ознак	На ранніх стадіях розвитку дефектів
Прогнозування ресурсу	Не реалізується	Реалізується оцінка залишкового ресурсу
Захист електродвигуна	Аварійний (перевантаження, КЗ)	Превентивний і аварійний
Енергоспоживання	Підвищене при змінному навантаженні	Оптимізоване (зниження на 10–18%)
Теплове навантаження	Підвищене, нерівномірне	Зменшене та стабілізоване
Ресурс електродвигуна	Знижений через перевантаження	Підвищений на 25–40%
Надійність приводу	Середня	Висока
Кількість аварійних зупинок	Висока	Знижена на 40–60%
Вплив на технологічний процес	Можливі зупинки та нестабільність	Стабільна робота екструдера
Можливість архівації даних	Відсутня	Реалізована (SCADA, база даних)
Інтеграція з АСУ ТП	Обмежена	Повна інтеграція

Таблиця 2. Параметри стану асинхронного електродвигуна приводу екструдера в різних режимах

Режим роботи	Температура обмотки, °C	Вібрації RMS, мм/с	Струм фази, А, А	Дисбаланс фаз, %	Статус системи
Номінальний	68	2,1	18,3	1,8	Норма
Перевантаження	85	2,8	22,9	3,6	Поперед-ження
Імітація дефекту	93	4,7	23,2	9,8	Аварія

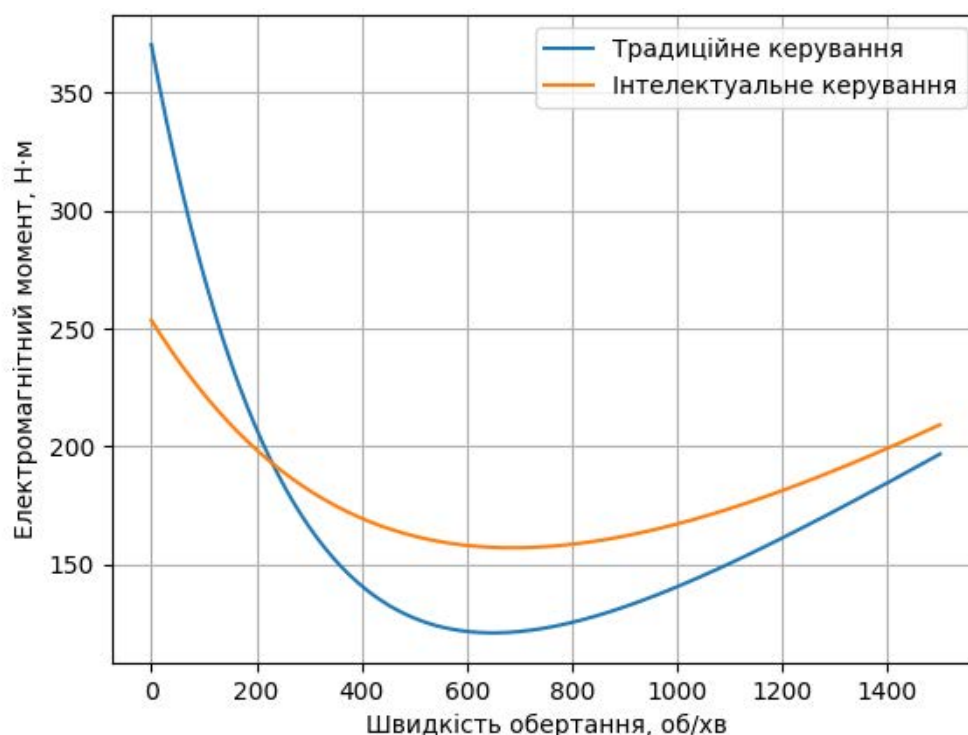


Рис. 2. Механічна характеристика асинхронного електродвигуна приводу шнека екструдера при традиційному та інтелектуальному керуванні

ВИСНОВКИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК

Розроблена інтелектуальна система є ефективним інструментом для оптимізації роботи електроприводів та підвищення їх надійності, оскільки забезпечує комплексний підхід до моніторингу, діагностики, захисту та адаптивного керування електроприводом екструдера. Застосування цієї системи як у процесі модернізації існуючих ліній екструдування, так і в інших промислових технологічних комплексах зі змінними режимами навантаження.

Запропоновані методи інтелектуального керування створюють передумови для підвищення енергоефективності, надійності та ресурсу роботи електродвигунів завдяки адаптивному регулюванню та своєчасному виявленню передаварійних станів. Це сприяє зменшенню простоїв обладнання, зниженню експлуатаційних витрат та забезпечує стабільність технологічного процесу.

Отримані результати можуть бути використані в навчальному процесі підготовки фахівців з електромеханіки та автоматизації як практична ілюстрація сучасних підходів до моніторингу, технічної діагностики та інтелектуального керування електроприводами.

REFERENCES

- [1] Chornyi, V. S. (2025). *Analiz metodiv ta system optimalnogo keruvannia transportnymy zasobamy [Analysis of methods and means of vehicle control systems in the problem of optimal control]*. Visnyk Khmelnytskoho natsionalnogo universytetu. Seria: Tekhnichni nauky. no. 3.2. T. 353. pp. 393-399. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-353-55> [in Ukrainian].
- [2] Hubarevych, O. V., Hulak, S. O., Poliakov, A. P. (2020). *Diahnostuvannia obmotok statora asynkhronnoho dyvhuna z vykorystanniam modeliuvannia na osnovi hodohrafa vektora Parka [Diagnostics of stator windings of an induction motor using simulation based on the hodograph of the Park vector]*. Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu. no. 3. pp. 29-36. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2020-150-3-29-36> [in Ukrainian].
- [3] Khudyi, Ye. H., Peltek, I. I. (2010). *Suchasni metody diahnostryky stanu izoliatsii elektrychnykh mashyn [Modern methods for diagnosing the insulation condition of electrical machines]*. Visnyk Natsionalnogo tekhnichnoho universytetu «KhPI». Seria: Problemy avtomatyzovanoho elektropryvodu. Teoriia i praktyka. no. 28. pp. 549-550. https://elprivod.nmu.org.ua/ua/articles/2010_khudoy_peltek.pdf [in Ukrainian].
- [4] Vlasenko, L. O. (2017). *Intelektualne keruvannia tekhnolohichnym obiektoz z vykorystanniam prohnozovanykh modelei [Intelligent control of a technological object using predictive models]*. Suchasni metody, informatsiine, prohramne ta tekhnichne zabezpechennia system keruvannia orhanizatsiino-tekhnichnymy ta tekhnolohichnymy kompleksamy: materialy IV Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi Internet-konferentsii (m. Kyiv 22 lystopada 2017). [Elektronnyi resurs]. Kyiv: NUKhT. pp. 118. Retrieved from: <http://nuft.edu.ua/page/view/konferentsii>. [in Ukrainian].
- [5] Hubarevych, O. V., Holubieva, S. M. (2019). *Analiz metodiv diahnostryky tekhnichnoho stanu izoliatsii asynkhronnykh dyvhuniv [Analysis of methods for diagnosing the technical condition of asynchronous motor insulation]*. Vseukrainskyi naukovyi zbirnyk «Naukovi pratsi Donetskoho natsionalnogo tekhnichnoho universytetu». Seria «Elektrotekhnika i enerhetyka. pp. 55-63. <https://doi.org/10.31474/2074-2630-2019-1-55-63> [in Ukrainian].
- [6] Mazurenko, L. I., Hrebenikov, V. V., Dzhura, O. V., Popovych, O. M., Bibik, O. V., Holovan, I. V., Shurub, Yu. V., Romanenko, V. I. (2014). *Rozvytok teorii, vdoskonalennia matematychnykh modelei, doslidzhennia elektrychnykh mashyn i elektromekhanichnykh system [Theory development, improvement of mathematical models, investigation of electric machines and electromechanical systems]*. Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy. vol. 38. pp. 73-80. Retrieved from: http://nbuv.gov.ua/UJRN/PIED_2014_38_10. [in Ukrainian].
- [7] Zubenko, O. V., Teliuta, R. V. (2025). *Systema zakhystu ta monitorynhu asynkhronnoho dyvhuna z funktsiieiu avariinoho vidkliuchennia [Protection and monitoring system for an induction motor with emergency shutdown function]*. Visnyk Khersonskoho natsionalnogo tekhnichnoho universytetu. no. 2(93), Ch. 1. pp. 67-72. DOI: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.9> [in Ukrainian].
- [8] Honcharuk, Yu. M., Horiashchenko, S. L. (2024). *Rozrobka skhemy prystroiu dlia kontroliu parametriv elektropryvodu [Development of a circuit diagram for a device for controlling electric drive parameters]*. Elektromekhanichni, informatsiini systemy ta nanotekhnolohii: materialy III Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi Internet-konferentsii molodykh uchenykh ta studentiv (m. Kyiv, 18 kvitnia 2024 r.). Kyiv: KNUtD. pp. 22-24. [in Ukrainian].
- [9] Arshanskyi, D. I., Stepanets, O. V. (2024). *Ohliad platform dlia symulatsii povedinky obektiv vsередyni tsyfrovyykh dviinykiv [Overview of platforms for simulating the behavior of objects inside digital twins]*. Suchasni problemy naukovooho zabezpechennia enerhetyky. U 2-kh t.: materialy XXI Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii molodykh vchenykh i studentiv (m. Kyiv, 23–26 kvitnia 2024 r.). Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho, Vyd-vo «Politehnika». T. 2. pp. 21-22. [in Ukrainian].
- [10] Riasna, O. V., Savoiskyi, O. Yu., Kravchenko v.O., Kozin V.M., Yurchenko O.Yu. (2025). *Skaliarnyi metod keruvannia asynkhronnykh elektropryvodiv v systemi vodopostachannia [Scalar control method of asynchronous electric drives in water supply system]*. Visnyk Khersonskoho natsionalnogo tekhnichnoho universytetu. no. 1(92). T.1. pp. 204-211. DOI: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.26> [in Ukrainian].
- [11] Zdolnyk, M. O., Stepanets, O. V. (2024). *Zastosuvannia shtuchnoho intelektu v systemakh avtomatyzatsii [Application of artificial intelligence in automation systems]*. Suchasni problemy naukovooho zabezpechennia enerhetyky. U 2-kh t.: materialy KhKhI Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii molodykh vchenykh i studentiv (m. Kyiv, 23–26 kvitnia 2024 r.). Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho, Vyd-vo «Politehnika». T. 2. pp. 7-9. [in Ukrainian].
- [12] Goroshko, Andrii, Kashtalian, Antonina (2025). *Influence of supply voltage unbalance on induction motor characteristics*. Visnyk Khmelnytskoho natsionalnogo universytetu. Seria: Tekhnichni nauky. T. 353 no. 3.2. pp. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-353-13> [in Ukrainian].

- [13] Kulahin, D. O. (2014). *Matematychna model tiahovoho asynkhronnoho dyvuhuna z urakhuvanniam nasychennia* [Mathematical model of a traction induction motor taking into account saturation]. *Tekhnichna elektrodynamika*. no. 6. pp. 49-55. Retrieved from: <https://techned.org.ua/index.php/techned/article/view/1126/1001>. [in Ukrainian].
- [14] Oleinikov, M. O. (2024). Systema avtomatychnoho keruvannia elektropryvodom mostovoho kranu z urakhuvanniam pruzhnykh zviazkyv [Automatic control system for the electric drive of a bridge crane taking into account elastic ties]. *Elektrotekhnik ta elektroenerhetyka*. no.3. pp. 25-35. DOI <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2024-3-3> [in Ukrainian].

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Чорний, В. С. (2025) Аналіз методів та систем оптимального керування транспортними засобами. *Вісник Хмельницького національного університету*. Серія: Технічні науки. № 3.2. Т. 353. С. 393-399. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-353-55>
- [2] Губаревич, О. В., Гулак, С. О., Поляков, А. П. (2020). Діагностування обмоток статора асинхронного двигуна з використанням моделювання на основі годографа вектора Парка. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. № 3. С. 29-36. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2020-150-3-29-36>
- [3] Худий, Є. Г., Пелтєк, І. І. (2010). Сучасні методи діагностики стану ізоляції електричних машин. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика. № 28, С. 549-550. https://elprivod.nmu.org.ua/ua/articles/2010_khudoy_peltek.pdf
- [4] Власенко, Л. О. (2017). Інтелектуальне керування технологічним об'єктом з використанням прогнозованих моделей. *Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційно-технічними та технологічними комплексами*.: матеріали IV Міжнародної науково-технічної Internet-конференції, 22 листопада 2017 р. [Електронний ресурс]. Київ: НУХТ. С. 118. URL: <http://nuft.edu.ua/page/view/konferentsii>.
- [5] Губаревич, О. В., Голубєва, С. М. (2019). Аналіз методів діагностики технічного стану ізоляції асинхронних двигунів. *Всеукраїнський науковий збірник «Наукові праці Донецького національного технічного університету»*. Серія «Електротехніка і енергетика». С. 55-63. <https://doi.org/10.31474/2074-2630-2019-1-55-63>
- [6] Мазуренко, Л. І., Гребеніков, В. В., Джура, О. В., Попович, О. М., Бібік, О. В., Головань, І. В., Шуруб, Ю. В., Романенко, В. І. (2014). Розвиток теорії, вдосконалення математичних моделей, дослідження електричних машин і електромеханічних систем. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. Вип. 38. С. 73-80. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/PIED_2014_38_10.
- [7] Зубенко, О. В., Телюта, Р. В. (2025). Система захисту та моніторингу асинхронного двигуна з функцією аварійного відключення. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. № 2(93), Ч. 1. С. 67-72. DOI: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.9>
- [8] Гончарук, Ю. М., Горященко, С. Л. (2024). Розробка схеми пристрою для контролю параметрів електроприводу. *Електромеханічні, інформаційні системи та нанотехнології*: матеріали III Міжнародної науково-практичної Інтернет-конференції молодих учених та студентів, м. Київ, 18 квітня 2024 року. Київ: КНУТД. С. 22-24.
- [9] Аршанський, Д. І., Степанець, О. В. (2024). Огляд платформ для симуляції поведінки об'єктів всередині цифрових двійників. *Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики*. У 2-х т.: матеріали XXI Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених і студентів (м. Київ, 23–26 квіт. 2024 р.). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка». Т. 2. С.21-22.
- [10] Рясна, О. В., Савойський, О. Ю., Кравченко, В. О., Козін, В. М., Юрченко, О. Ю. (2025). Скалярний метод керування асинхронних електроприводів в системі водопостачання. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. № 1(92). Т.1. С. 204-211. DOI <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.26>
- [11] Здольник, М. О., Степанець, О. В. (2024). Застосування штучного інтелекта в системах автоматизації. *Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики*. У 2-х т.: матеріали XXI Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених і студентів (м. Київ, 23–26 квіт. 2024 р.). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка». Т. 2. С. 7-9.
- [12] Goroshko, A., Kashtalian, A. (2025). Influence of supply voltage unbalance on induction motor characteristics. *Вісник Хмельницького національного університету*. Серія: Технічні науки. Т. 353 № 3.2. С. 110-113. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-353-13>
- [13] Кулагін, Д. О. (2014). Математична модель тягового асинхронного двигуна з урахуванням насичення. *Технічна електродинаміка*. № 6. С. 49-55. URL: <https://techned.org.ua/index.php/techned/article/view/1126/1001>.
- [14] Олєйніков, М. О. (2024). Система автоматичного керування електроприводом мостового крану з урахуванням пружних зв'язків. *Електротехніка та електроенергетика*. №3. С. 25-35. DOI <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2024-3-3>

© Гайдукевич С. В., Семенова Н. П.

Дата першого надходження статті до видання: 23.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 22.05.2026



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)