

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2026-16-1-20>

УДК 625.681.5

С. В. Гайдукевич, ст. викладач

ORCID: 0000-0001-5910-5921

Н. П. Семенова, ст. викладач

ORCID: 0000-0002-8478-9429

*Відокремлений підрозділ Національного університету біоресурсів і природокористування України «Бережанський агротехнічний інститут»*

e-mail: SoleykoS@i.ua

## ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРОДВИГУНА НА ОСНОВІ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ДІАГНОСТИКИ ТА АДАПТИВНОГО КЕРУВАННЯ

*Анотація.* У статті розглянуто проблему підвищення ефективності та надійності асинхронного електродвигуна приводу головного робочого органу екструдера в умовах змінного технологічного навантаження. Проаналізовано аналіз методів контролю, діагностування та керування електроприводами. Запропоновано інтелектуальну систему діагностування та адаптивного керування електродвигуном приводу екструдера, яка забезпечує комплексний підхід до аналітичного оцінювання технічного стану, прогнозування розвитку дефектів, оптимізації режимів роботи та запобігання аварійним ситуаціям на основі багатоканального вимірювання, цифрової обробки сигналів і інтелектуальних методів аналізу. Ця система є комплексом апаратно-програмних модулів, що взаємодіють у реальному часі з електродвигуном, датчиками відповідних технологічних параметрів та операторським інтерфейсом.

На відміну від існуючих методів діагностування технічного стану та систем адаптивного керування, які здебільшого не забезпечують переходу від реактивного технічного обслуговування до проактивного, запропонована інтелектуальна система характеризується значно вищим рівнем функціональності, інформаційної насиченості, адаптивності та здатністю до самодіагностики. Використання такої системи не лише підвищує надійність, енергоефективність і довговічність електродвигуна, але й сприяє стабільності технологічного процесу, зниженню енергетичних витрат та зменшенню обсягу регламентного технічного обслуговування.

Дана інтелектуальна система діагностування і адаптивного керування електродвигуном дозволяє своєчасно визначати аномалії, аналізувати темп зростання температури ізоляції та прогнозувати момент досягнення критичних значень, що суттєво знижує ймовірність відмови електродвигуна та підвищує надійність технологічного процесу в цілому.

Використання запропонованої інтелектуальної системи дає можливість технологічні лінії екструдуювання кормових сумішей і харчових продуктів перевести від концепції роботи за встановленим режимом до принципів Smart-систем з виконавчими функціями автоматичного адаптування та самодіагностування. Для екструдерів цей перехід є особливо важливим, оскільки їх продуктивність, стабільність параметрів кінцевого продукту та енергоефективність значною мірою залежать від рівня автоматизації електроприводу.

*Ключові слова:* інтелектуальна система, адаптивне керування, діагностування, надійність, сучасні технології, привід екструдера.

*Постановка проблеми.* В умовах стрімкого розвитку цифровізації трифазні електродвигуни й надалі залишаються основним елементом автоматизованих технологічних процесів. Найбільшого поширення набули трифазні асинхронні електродвигуни як у промисловості, так і в сільському господарстві, оскільки вони відзначаються простотою конструктивного виконання та обслуговування, стійкістю до перевантажень, високим коефіцієнтом корисної дії та здатністю до тривалої безперервної роботи. Водночас ускладнення технологічних процесів, зростання вимог до енергоефективності, надійності та оптимізації виробництва зумовлюють необхід-



ність розширення функціональних можливостей електроприводів шляхом переходу від традиційних підходів Industry 3.0, що характеризувалися статичними автоматизованими системами, до гнучких інтелектуальних та адаптивних рішень [1, с. 9], здатних оперативно реагувати на змінні умови експлуатації та технологічні збурення. Інтеграція асинхронних електродвигунів із сучасними інформаційними, комунікаційними та керуваними технологіями переводять їх на новий технічний рівень – рівень інтелектуальної кіберфізичної системи виробництва. Отже, безвідмовна робота електродвигунів є критично важливою для стабільного функціонування технологічного процесу. Своєчасне виявлення можливих проблем дозволяє уникати аварій і забезпечувати стабільну роботу [2, с. 25]. Оскільки будь-які збої призводять до простоїв, зниження продуктивності та збільшення експлуатаційних витрат.

Приводи екструдерів працюють в умовах випадкових механічних та термічних впливів, зокрема: підвищеної вібрації, періодичних ударних навантажень, локального перегріву та значних змін крутного моменту, що призводить до прискореного старіння ізоляції, деградації підшипників і механічних елементів та зниження загального ресурсу приводу. Системи керування електродвигуном приводу екструдера вимагають точного налаштування цілого масиву параметрів, що в свою чергу, ускладнює введення їх в експлуатацію [3, с. 27]. Існуючі системи керування електроприводами, що базуються на застарілих принципах, часто не дозволяють повною мірою реалізувати потенціал сучасного електромеханічного обладнання [4], а саме не виявляють прихованих дефектів і не прогнозують залишковий ресурс, що не дає можливості формування повноцінної системи захисту та своєчасного попередження аварійних ситуацій. Тому актуальним є створення більш прогресивних систем керування, здатних до адаптації змінним умовам навантаження, глибокої аналітичної обробки даних в реальному часі та превентивного захисту електропривода.

*Аналіз останніх досліджень і публікацій.* Аналіз опрацьованих публікацій показав, що сучасні дослідження у сфері електроприводів спрямовані на підвищення ефективності, гнучкості керування та надійності електродвигунів. Значна кількість науковців зазначає, що розв'язання цієї складної науково-технічної проблеми можливе шляхом впровадження високо-ефективних адаптивних систем керування. На сьогодні, як вважають науковці Паранчук С. В., Ухачевич Я. П., Олейніков М. О., Демішонков Я. В., Бурмістенков О. П. та інші, найбільш інтенсивного розвитку такі системи набули саме в технічних галузях, зокрема в електроприводах складних технологічних установок.

Завдяки впровадженню нових технічних рішень [5, с. 3] і розвитку обчислювальних засобів розроблено велику кількість методів адаптивного управління, які відрізняються між собою припущеннями щодо моделей об'єктів і характеристик зовнішніх збурень, критеріїв якості функціонування синтезованих систем, а також алгоритмів адаптації [6, с. 49].

Виходячи з проведеного аналізу [7, с. 58] сучасних систем управління виявлено, що більшість адаптивних підходів орієнтовані переважно на стабілізацію окремих параметрів і не забезпечують комплексного врахування технічного стану електродвигуна в умовах нестаціонарних та швидкозмінних навантажень, що є характерним для процесів екструдуювання.

*Метою дослідження* є підвищення ефективності і надійності роботи асинхронного електродвигуна приводу екструдера та зниження питомих енерговитрат шляхом розроблення інтелектуальної системи діагностики і адаптивного керування, яка забезпечує безперервний моніторинг технічного стану, своєчасне виявлення відхилень і передаварійних режимів та динамічну корекцію параметрів керування відповідно до змін навантаження та умов експлуатації.

*Вклад основного матеріалу.* Однією з ключових причин, що визначають ефективність та надійність асинхронного електродвигуна приводу головного робочого органу екструдера, є підвищений тепловий знос ізоляції. Формування теплових перевантажень зумовлене низ-



кою чинників, що призводять до прискореної деградації ізоляційних матеріалів, втрати електричної міцності та виникнення міжвиткових замикань у статорних обмотках. Додатково слід зазначити, що значна частина відмов виникає через підвищену вібрацію [8] та зношування механічних елементів приводу. Унаслідок дії цих факторів суттєво підвищується ймовірність аварійних відмов, скорочується напрацювання на відмову та зростає потреба у регламентному технічному обслуговуванні. Основною передумовою зниження відмов в період експлуатації є своєчасне діагностування і прогнозування поточного стану електродвигуна в ракурсі його впливу на період безвідмовної роботи [9, с. 55]. Саме тому питання контролю технічного стану приводу набуває особливої актуальності при роботі в умовах змінного та важкопрогнозованого навантаження.

Водночас експлуатаційні фактори створюють додаткові проблеми при виборі засобів діагностування та захисту електродвигунів від аварійних режимів. За останні роки було запропоновано велику кількість [3, с. 25] методів діагностування асинхронних електродвигунів. Поглиблений огляд та порівняння цих підходів свідчить, що не всі вони однаково ефективні в умовах реальної експлуатації. Аналіз сучасних практик технічного сервісу електродвигунів дає змогу виокремити найбільш ефективні методи, серед яких можна виділити наступні: вібраційний метод оцінки технічного стану електродвигуна, спектрострумний аналіз та спосіб моделювання [10, с. 52], який передбачає створення комп'ютерної моделі двигуна і її інтеграцію з устаткуванням за допомогою системи датчиків.

Слід зазначити, що в процесі експлуатації електроприводів змінюються їх динамічні і статичні характеристики через модифікації параметрів (опорів резисторів, індуктивностей, коефіцієнтів підсилення і передачі), а також впливів [11, с. 151] зовнішніх та внутрішніх збурюючих факторів.

Існуючі адаптивні алгоритми керування поділяються на три основні групи: безпошукові адаптивні системи з еталонною моделлю, що описується динамічною ланкою з бажаною передавальною функцією; безпошукові системи зі спостережним пристроєм, який виконує функцію ідентифікації об'єкта керування його частин і представляє собою відповідну математичну модель [12, с. 293]; пошукові адаптивні системи, у яких показник якості досягається шляхом введення в систему спеціальних пошукових сигналів. У безпошукових (аналітичних) системах критерій якості розраховується аналітично за допомогою спеціального обчислювального пристрою [11, с. 153]. Проте кожен із зазначених підходів, застосований окремо, не забезпечує перехід від реактивного технічного обслуговування до проактивного, що базується на безперервному зборі діагностичної інформації, ранньому виявленні небезпечних тенденцій та автоматичній адаптації керування за змінних умов роботи.

З огляду на недетермінований характер зміни технологічних параметрів [13, с. 42], а також наведені вище обмеження сучасних традиційних підходів, критично важливим є розроблення інтелектуальної системи, здатної у реальному часі контролювати температурний режим, вібраційні процеси, струмові навантаження та параметри якості живлення. Запропонована інтелектуальна система діагностування і адаптивного керування електродвигуном потужністю 30 кВт зі швидкістю обертання 1470 об/хв, який працює у складі електропривода головного робочого органу – шнеку екструдера, дозволяє своєчасно ідентифікувати аномалії, аналізувати темп зростання температури ізоляції та прогнозувати момент досягнення критичних значень, що суттєво знижує ймовірність відмови електродвигуна та підвищує надійність загального стану екструдера. Запропонована інтелектуальна система поєднує сучасні адаптивні алгоритми з методами оперативного діагностування і прогнозування технічного стану електродвигуна в режимі реального часу. Вона забезпечує оцінювання ступеня зношування його основних вузлів, своєчасне виявлення передаварійних станів, а також автоматичний захист від перевантажень і аварійних режимів роботи (табл. 1).

Таблиця 1

## Типові несправності, які виявляє система

Тип несправності	Ознака	Методи виявлення
Міжвиткове коротке замикання у статорних обмотках	Збільшення струму, нагрів	Аналіз гармонік струму
Порушення симетрії або дисбаланс фаз живлення	Різниця струмів між фазами	Аналіз фазних струмів
Знос та руйнування підшипникових вузлів	Вібрації, шум	Спектральний аналіз вібрацій
Розбаланс ротора або механічна ексцентриситетність	Зміна частоти обертів, вібрації	Аналіз струмів та вібрацій
Перевантаження електродвигуна та перегрів обмоток	Температура обмотки	Термоконтроль

Окрім електромеханічних дефектів, система дозволяє ідентифікувати несправності, пов'язані із технологічним процесом екструзії. До них належать: заклинювання або часткове блокування гвинта шнека, що проявляється різким зростанням крутного моменту та споживаного струму, падінням частоти обертання і можливим спрацюванням теплового захисту; забивання робочої камери та накопичення матеріалу, при якому фіксуються нерівномірні зміни навантаження, характерні пульсації струму, періодичні піки вібрації, а також зміни тиску або моменту на виході, що свідчить про погіршення умов транспортування матеріалу.

Запропонована інтелектуальна система є комплексом апаратно-програмованих модулів, що взаємодіють у режимі реального часу з електродвигуном приводу екструдера, перетворювачем частоти, датчиками реєстрації технологічних параметрів та операторським інтерфейсом. Її архітектуру умовно поділено на декілька взаємопов'язаних функціональних блоків:

– блок збору інформації забезпечує реєстрацію контрольованих параметрів електродвигуна:  $x(t) = \{i(t), u(t), \omega(t), T(t), M(t), s(t)\}$ ,

де  $i(t)$  – струм фаз,  $u(t)$  – напруга,  $\omega(t)$  – кутова швидкість,  $T(t)$  – температура,  $M(t)$  – електромагнітний момент,  $s(t)$  – ковзання (розрахункове значення);

– блок первинної обробки інформації виконує фільтрацію шумів, нормалізацію та перетворення сигналів у формат, придатний для подальшого аналізу:  $X_f(t) = F(X(t))$ ,

де  $F$  – цифровий фільтр або оператор попередньої обробки;

– блок інтелектуальної діагностики проводить по реальних параметрах  $\hat{R}_s, \hat{R}_r, \hat{X}_s, \hat{X}_r$  оцінювання поточного технічного стану електродвигуна на основі ідентифікації параметрів обмоток і магнітного кола:

$$\theta(t) = \theta(t-1) + \gamma e(t)x(t),$$

де  $\theta = \{\hat{R}_s, \hat{R}_r, \hat{X}_s, \hat{X}_r\}$  – параметри,  $e(t)$  – похибка між виміряною реальною та модельною величиною;

блок прогнозування та виявлення відхилень визначає ступінь розбіжності реальних параметрів із нормованими значеннями, виявляє аномальні режими та прогнозує ймовірність виникнення відмов

$$\hat{M}_s(t - \Delta t) = aM_c(t) + bM_c(t-1),$$

або з використанням моделей машинного навчання:  $\hat{M}_s = f(i, \omega, s, T)$ ;

– блок моніторингу та інтерфейсу оператора забезпечує візуалізацію параметрів у режимі реального часу та надає оператору доступ до діагностичної та прогнозної інформації:

$$x(t) = \{i(t), u(t), \omega(t), T(t), M(t), s(t)\};$$



– блок адаптивного керування формує керуючі команди та регулює параметри частотно-регульованого електроприводу:

$$f(t) = f_0 + K_1 e_\omega + K_2 \int e_\omega dt,$$

де  $e_\omega = \omega_{зад} - \omega(t)$ , керування напругою  $U(t) = U_0(1 + k_s s(t))$ ;

– блок апаратного захисту оперативно реагує на критичні режимні відхилення параметрів та забезпечує захист електродвигуна.

Захист активується, якщо  $i(t) > K_I I_{ном}$ ,  $T(t) > T_{max}$ ,  $s(t) > s_{кр}$ , аварійний алгоритм  $u(t) = 0 \Rightarrow M(t) = 0$ ;

– блок комунікації та архівації забезпечує обмін даними з системами верхнього рівня та запис у базу даних.

Узагальнений цикл функціонування описується системою:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Моніторинг: } x(t) \\ \text{Діагностика: } \hat{\theta}(t) = g(x(t)) \\ \text{Прогноз: } \hat{M}_s(t + \Delta t) = h(x(t)) \\ \text{Адаптивне керування: } u(t) = F(x, \hat{\theta}, \hat{M}_s) \\ \text{Захист: } u(t) = 0, \text{ якщо } x(t) - \text{зона небезпеки} \end{array} \right.$$

Таким чином, кожний блок включає як апаратну складову (сенсори, перетворювач частоти, контролери, модулі захисту), так і програмну складову (алгоритми обробки (фільтрації), діагностики, прогнозування, SCADA-візуалізація). Разом вони формують самонавчальний замкнений цикл моніторингу, оцінювання стану, оптимізації керування та багаторівневого захисту асинхронного електродвигуна (рис. 1).

Кожний з цих блоків виконує визначений набір функцій, а їх взаємодія забезпечує адаптивне керування електродвигуном. Така системна архітектура дає змогу мінімізувати кількість аварійних зупинок, підвищити енергоефективність обладнання та забезпечити прогнозовану, безвідмовну експлуатацію асинхронного електродвигуна.

Розроблена інтелектуальна система отримує інформацію від комплексу датчиків, які реєструють фактичні робочі параметри асинхронного електродвигуна приводу шнека екструдера у процесі виконання технологічної операції. Датчики фіксують наступні контрольовані параметри процесу:

- струм електродвигуна – для оцінки навантаження та виявлення перевантаження;
- температури обмоток та корпусу – для виявлення теплових перевантажень та ризику деградації ізоляції;
- вібраційні параметри та зміни струму – як індикатори розвитку механічних дефектів (знос підшипників, дисбаланс ротора, перекося);
- крутний момент або тиск на виході шнека – для оцінки рівня технологічного навантаження;
- швидкості обертання – як відображення фактичного режиму та енергетичного стану приводу.

Порівнюючи зібрані параметри з паспортними та нормованими значеннями, система на основі математичної моделі визначає перевантаження за моментом і струмом. За величиною відхилення та темпом його зміни виконується прогноз можливого перегріву, механічної відмови або аварійної ситуації. Інтелектуальна система виконує безперервний моніторинг технічного стану електродвигуна та відображає ключові параметри в режимі реального часу (рис. 2), зокрема:

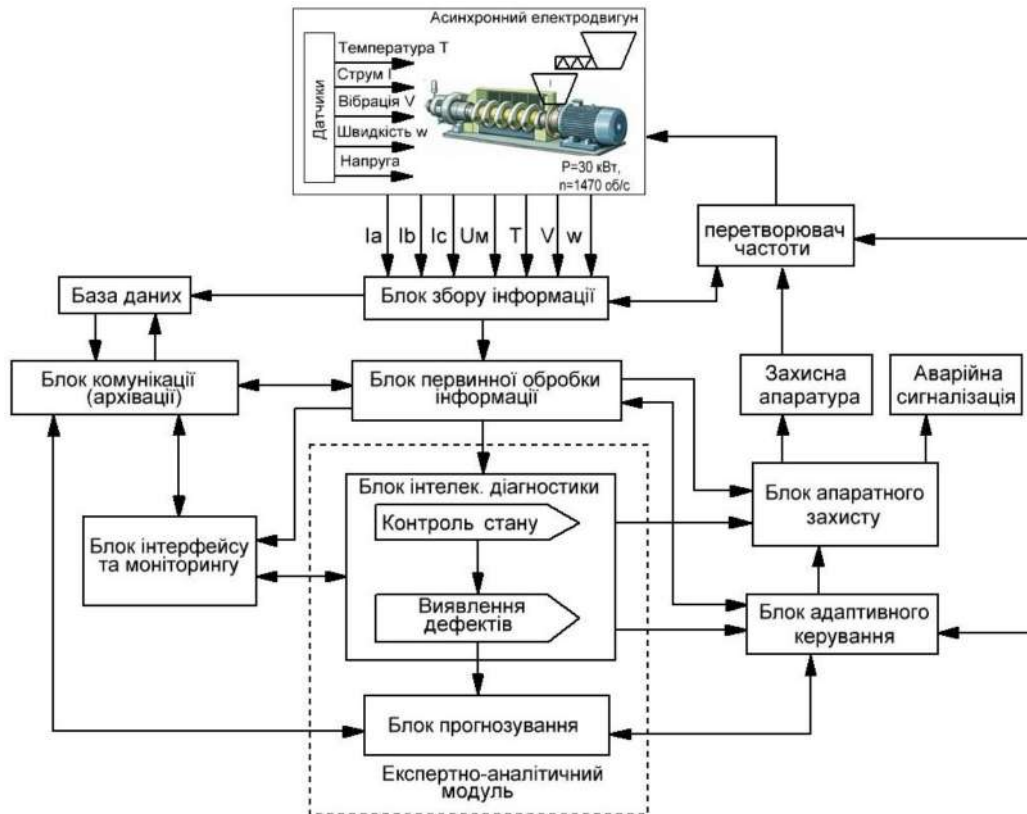


Рис. 1. Структурна схема інтелектуальної системи моніторингу, контролю, діагностики, прогнозування, адаптивного керування і захисту двигуна 30 кВт

– динаміка навантаження шнека екструдера (рис. 2, а) відображає коливання крутного моменту під час робочого циклу та ідентифікує ділянки підвищеного і зниженого опору матеріального потоку;

– зміна фазного струму електродвигуна (рис. 2, б) демонструє залежність споживаного струму від прикладеного навантаження. Короткочасні пікові значення струму свідчать про підсмоктування матеріалу, нерівномірну подачу, або пульсації тиску у робочій камері екструдера;

– тепловий режим обмоток та корпусу двигуна (рис. 2, в) характеризує зміну температури в залежності від навантаження. У фазах зменшення крутного моменту відбувається відповідне зниження тепловиділення та охолодження машини.

У разі виходу контрольованих параметрів за допустимі межі реалізується адаптивне втручання – автоматична корекція частоти обертання, зміни швидкості подачі сировини або навантаження на механізм (рис. 3). Одночасно система забезпечує захист електродвигуна від перевантаження, перегріву та аварійної зупинки. Всі виміряні параметри та події зберігаються в архіві, що дає можливість формувати історію експлуатації, проводити глибинний аналіз та підвищувати точність прогнозування на основі накопичених даних.

У ході досліджень спостерігалися характерні коливання струму, обумовлені нерівномірністю подачі сировини та змінами моменту опору на валу. Порівняльний аналіз (рис. 4) показав, що використання інтелектуальної системи керування дозволяє зменшити середній струм статора на 6–10 % та пікові значення на 15–20 %, а температура обмоток знижується на 8–12 % у всьому діапазоні навантажень, що свідчить про зниження теплових втрат і підвищення енергоефективності та надійності електропривода.

При прямому пуску асинхронного електродвигуна напруга мережі подається безпосередньо на обмотки статора. Як відомо, у початковий момент ковзання ротора дорівнює одиниці  $s = 1$ ,

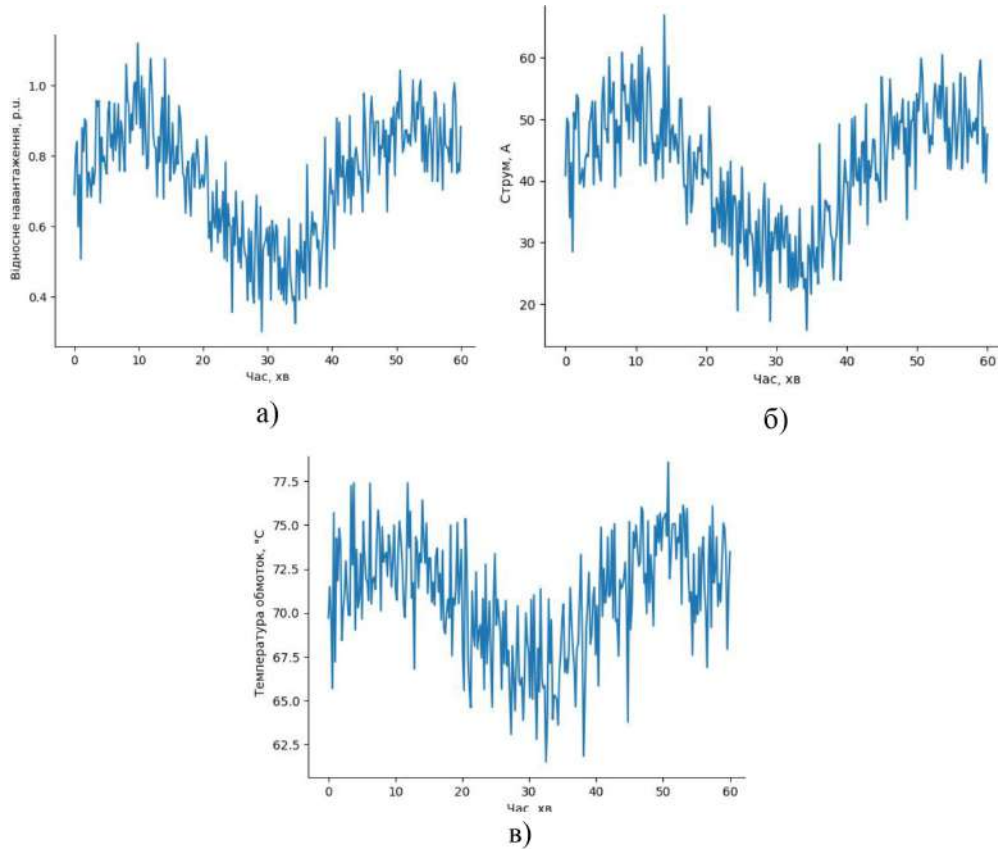


Рис. 2. Вихідні часові характеристики

а) – динаміка навантаження на шнек; б) – зміна фазного струму двигуна; в) – тепловий режим двигуна

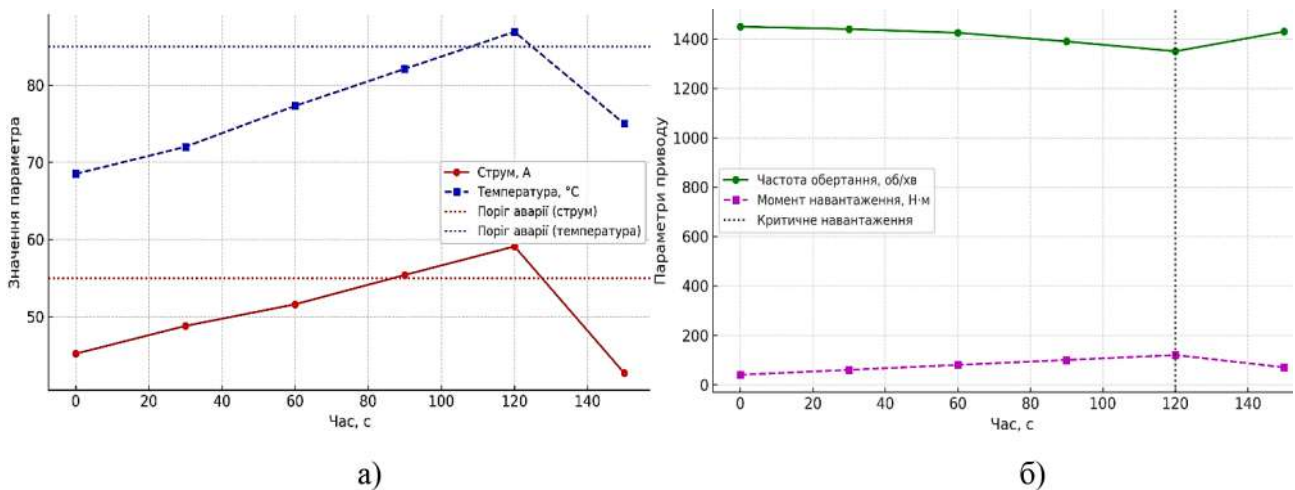


Рис. 3. Експериментальні результати електродвигуна приводу екструдера при зміні навантаження

а) – динаміка струму та температури; б) – динаміка частоти обертання та моменту навантаження

а швидкість обертання становить нуль. Це призводить до різкого зростання пускового струму, що сягає  $\approx 7 \cdot I_n$ , та створює значні теплові й електромагнітні перевантаження. Одночасно формується електромагнітний пусковий момент, який становить  $\approx 2,2 \div 2,5 \cdot M_n$ , який спричиняє ударні механічні навантаження. Сукупність цих факторів негативно впливає на надійність, енергоефективність, довговічність та безвідмовність електроприводу.

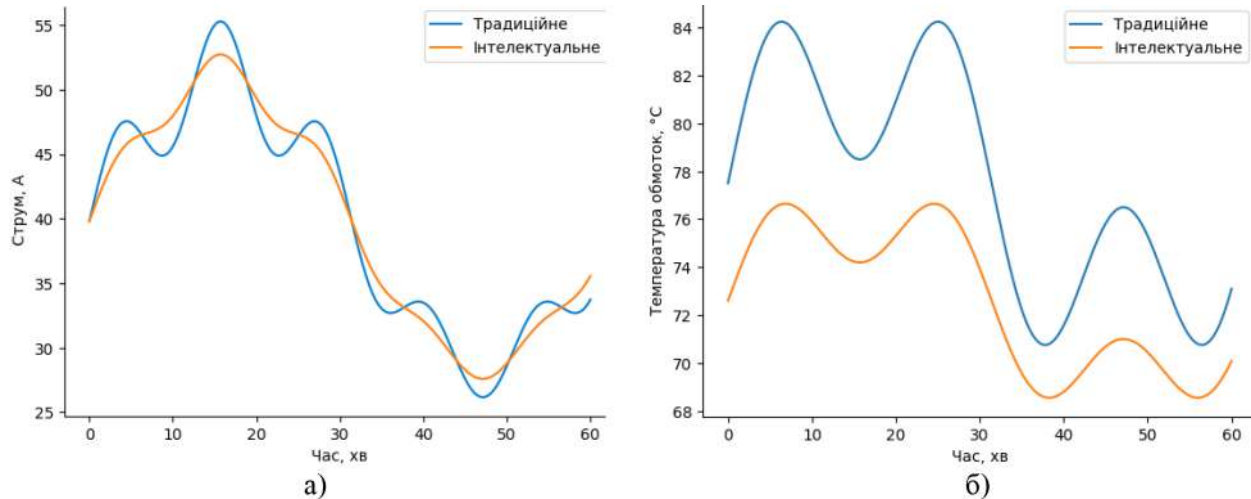


Рис. 4. Порівняльні результати досліджень із використанням традиційної системи керування та інтелектуальної системи

а) – динаміка струму; б) – динаміка температури обмоток

Застосування інтелектуального адаптивного керування приводом шнека екструдера дозволило істотно знизити струм під час пуску. Пусковий струм обмежується до рівня  $2,2 \div 2,5 \cdot I_n$  (рис. 5, а), та пусковий електромагнітний момент – до  $1,5 \cdot M_n$  (рис. 5, б), що безпосередньо зменшує електромеханічні напруження у валу та інших елементах механічної передачі.

Таким чином, у розробленій інтелектуальній системі реалізовано алгоритм плавного пуску на основі частотного перетворювача з контролером струмових параметрів у реальному часі.

За результатами експериментальних випробувань встановлено, що температура обмоток статора різко зростає при тривалих пікових навантаженнях, спричинених нерівномірністю подачі сировини. Використання алгоритмів інтелектуального діагностування та адаптивного регулювання дозволило знизити пікові значення струму приблизно на 65–70 %, а максимальний електромагнітний момент – на 40–45 %, що забезпечило стабілізацію теплового режиму та підвищення надійності електроприводу.

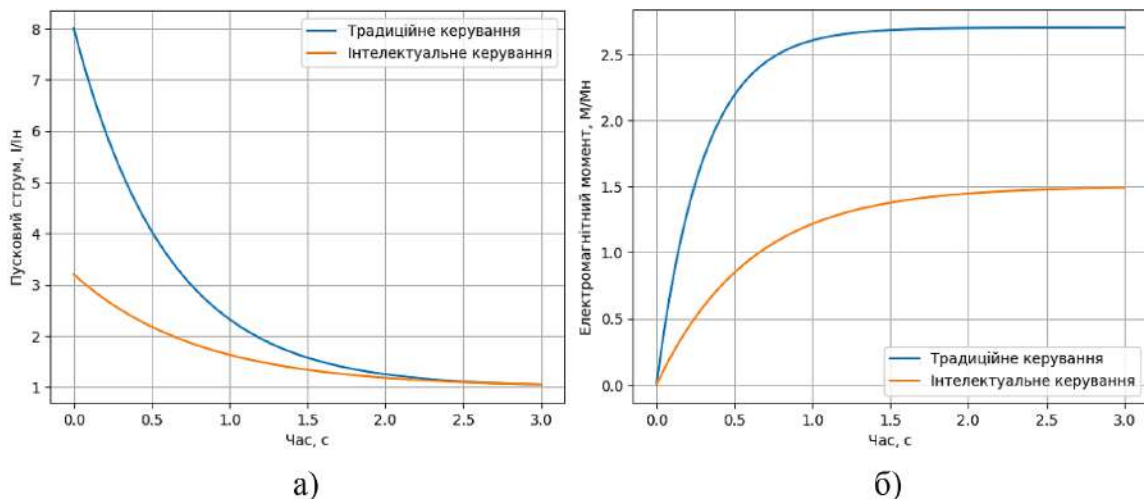


Рис. 5. Порівняльні характеристики пускових струмів та моментів асинхронного електродвигуна потужністю 30 кВт

а) – характеристики пускових струмів; б) – характеристики пускових моментів

При традиційному прямому пуску максимальні дотичні напруження у валу сягають близько 150 МПа, тоді як при адаптивному пуску вони знижуються до 100–105 МПа. Отже, зменшення механічних напружень становить приблизно 30 %, що сприяє продовженню ресурсу вала шнека, зменшенню зношування та підвищенню загальної надійності і довговічності електроприводу.

У перехідному режимі момент змінюється за експоненціальним законом:

$$M(t) = M_n + (M_{\text{пуск}} - M_n)e^{-t/\tau},$$

де  $\tau$  – електромеханічна стала.

Аномальні режими функціонування асинхронних електродвигунів є ключовою передумовою виникнення аварійних ситуацій. У рамках дослідження було проведено імітацію основних типів порушень, зокрема перевантаження, заклинювання та блокування шнека, дефектів підшипникових вузлів, дисбалансу ротора, пропадання однієї фази та імпульсних провалів напруги живлення. Це дало змогу всебічно проаналізувати поведінку електроприводу у режимах, що потенційно призводять до відмови. У таблиці 2 наведено параметри стану асинхронного електродвигуна потужністю 30 кВт приводу екструдера для різних режимів його роботи.

Таблиця 2

Параметри стану електродвигуна потужністю 30 кВт для різних режимів роботи

Параметр	Холостий хід	Номінальне навантаження	Перевантаження +20 %	Аварійне гальмування (зростання моменту)
Швидкість, об/хв	1490	1470	1430–1450	1380 → 0
Ковзання $s$ , %	0.7–1	2	4–6	8–12
Струм, $A$	18–22	56–60	68–75	80+ (захист)
Активна потужність $P$ , кВт	3–4	30	35–40	40+
Реактивна потужність $Q$ , кВАр	6–8	20	23–28	30+
$\cos\phi$	0.25–0.35	0.85–0.87	0.78–0.82	0.7–0.75
Крутний момент $M$ , Н · м	10–20	~195	230–260	280–300
Температура обмоток, °С	40–45	65–75	80–95	100+ (захист)
Вібрація, мм/с	1–2	2–3	3–5	>5 (підшипники/удари)
Нагрів підшипників	Мінімальний	Нормальний	Прискорений	Небезпечний
Режим охолодження	Недовантаження	Оптимальний	Напружений	Екстремальний
Стан	Стабільний	Нормальний	Критичний контроль	Аварійний/Вимкнення

Використання запропонованої інтелектуальної системи забезпечує перехід технологічних ліній екструдеру кормових сумішей і харчових продуктів від роботи за фіксованими режимами до концепції Smart-виробництва, що передбачає автоматичну адаптацію параметрів та функції самодіагностування. Для екструдерного обладнання такий перехід є критично важливим, оскільки продуктивність, стабільність параметрів готової продукції та енергоефективність безпосередньо визначаються рівнем автоматизації та інтелектуалізації електроприводу.

*Висновки.* Використання алгоритмів інтелектуального діагностування та адаптивного керування дало змогу виявляти передаварійні стани, пов'язані з перевантаженням і зростанням температури обмоток, на ранніх етапах та автоматично коригувати режими роботи електроприводу. Це забезпечило зниження питомих енерговитрат екструдера в середньому на 8–12 % та підвищення стабільності технологічного процесу екструдерування в умовах змінного навантаження. Запропонована інтелектуальна система дозволяє забезпечити більш високий рівень захисту та діагностування електродвигуна приводу екструдера порівняно з існуючими системами адаптивного керування. Вона дає можливість здійснювати безперервний моніторинг, глибоку аналітичну обробку параметрів, прогнозування технічного стану та адаптивну корекцію режимів роботи. Використання такої системи сприяє підвищенню енергоефективності,

надійності електродвигуна та продуктивності екструдера, зменшенню експлуатаційних витрат та продовженню ресурсу роботи електроприводу.

Результати досліджень підтверджують доцільність та ефективність запропонованої архітектури, можливість подальшого впровадження у промислові електроприводи де динамічні коливання навантаження є причиною підвищеної аварійності та зменшеного ресурсу роботи електродвигунів. Такі рішення на сьогоднішній день актуальні у контексті розвитку концепцій цифровізації виробництва, автоматизації й промислової аналітики. Такі інтелектуальні системи у сільському господарстві – це високоперспективне майбутнє.

#### Список використаних джерел

1. Боднар Б. Є., Очкасов О. Б. Інтелектуальні технології Industry 4.0: трансформація управління локомотивним господарством. *Прогресивні технології засобів транспорту*: матеріали 2-ої міжнародної науково-технічної конференції (Харків, 05–06 грудня 2024 р.). Харків: УкрДУЗТ, 2024. С. 9–10. URL: <http://lib.kart.edu.ua/bitstream/123456789/28786/1/%d0%91%d0%be%d0%b4%d0%bd%d0%b0%d1%80.pdf>
2. Сумцов А. Л., Білоус Д. К. Перспективи розвитку систем діагностування ходових частин тягового рухомого складу. *Прогресивні технології засобів транспорту*: матеріали 2-ої міжнародної науково-технічної конференції (Харків, 05–06 грудня 2024 р.). Харків: УкрДУЗТ, 2024. С. 25–26. URL: <http://lib.kart.edu.ua/bitstream/123456789/28794/1/%D0%A1%D1%83%D0%BC%D1%86%D0%BE%D0%B2.pdf>
3. Олейніков М. О. Система автоматичного керування електроприводом мостового крану з урахуванням пружних зв'язків. *Електротехніка та електроенергетика*. Розділ «Електротехніка». 2024. № 3. С. 25–35. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2024-3-3>.
4. Оріховський М. І., Грабко В. В. Модернізація системи керування електропривода механізму переміщення мостового крану. *Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2025)*: матеріали Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції (Вінниця, 15–16 червня 2025 р.). Вінниця: ВНТУ, 2025. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2025/paper/view/25572>
5. Ситнік Б. Т., Бриксін В. О., Давидов І. В. Моделі і методи створення систем реалізації графіків руху високошвидкісних поїздів з адаптивною корекцією швидкості за фактичними параметрами проїзду. Частина 2. Аналіз способів управління швидкістю поїзда з тяговими двигунами постійного та змінного струму. *Інформаційно – керуючі системи на залізничному транспорті*, 2022. № 1. С. 3–18. DOI: 10.18664/iksz. v27i1.254087. URL: <http://lib.kart.edu.ua/bitstream/123456789/8667/3/Sytnik.pdf>
6. Паранчук С. В., Ухачевич Я. П. Побудова адаптивної системи управління конкурентоспроможністю продукції регіону. *Регіональна економіка*, 2011. № 4. С. 48–56. URL: [https://re.gov.ua/re201104/re201104\\_048\\_ParanchukSV,UkhachevychYaP.pdf](https://re.gov.ua/re201104/re201104_048_ParanchukSV,UkhachevychYaP.pdf)
7. Моргунов М. М. Розробка методу передачі інформації всередині статичного зображення для мобільних роботів. Автоматизація та приладобудування («Automation and Development of Electronic Devices» ADED-2023) [Електронний ресурс]: збірник студентських наукових статей / Харківський національний університет радіоелектроніки; [редкол.: І. Ш. Невлюдов та ін.]. Харків : ХНУРЕ, 2023. Вип. 2. С. 56–60. URL: <https://openarchive.nure.ua/handle/document/24975>
8. Павленко Т. П., Шавкун В. М., Петренко В. М. Шляхи підвищення експлуатаційної надійності тягових електродвигунів рухомого складу електричного транспорту. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. Харків, 2015. Вип. 6/10 (78). URL: <https://www.neliti.com/publications/307385/ways-to-improve-operation-reliability-of-traction-electric-motors-of-the-rolling>
9. Губаревич О. В., Голубєва С. М. Аналіз методів діагностики технічного стану ізоляції асинхронних двигунів. *Всеукраїнський науковий збірник «Наукові праці Донецького національного технічного університету»*. Серія «Електротехніка і енергетика», 2019. С. 55–63. DOI: <https://doi.org/10.31474/2074-2630-2019-1-55-63>
10. Черезов А., Окушко О.В. Спектроскопічний метод діагностування електричних двигунів. *Енергозабезпечення, електротехнології, електротехніка та інтелектуальні управляючі системи в АПК*: матеріали 75-ої науково-практичної онлайн-конференції студентів (Київ, 12-13 травня 2022 р.). Київ : НУБіП України, 2022. С. 52–53. URI: [https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u37/zbirnik\\_tez\\_75\\_studentska\\_konferenciya.pdf](https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u37/zbirnik_tez_75_studentska_konferenciya.pdf)
11. Демішонков Я. В., Максимків О. Є., Бурмістенков О. П. Безпошукові та пошукові системи адаптивного керування електроприводу. Сучасні електромеханічні та інформаційні системи: монографія / за заг. ред.



І. В. Панасюка. Київ: КНУТД, 2021. С. 151–159. URL: [https://er.knutd.edu.ua/bitstream/123456789/19944/1/SEIS\\_mono\\_2021\\_P151-159.pdf](https://er.knutd.edu.ua/bitstream/123456789/19944/1/SEIS_mono_2021_P151-159.pdf)

12. Баховець Б. О. Автоматизований електропривод. Навч. посібник. Рівне : НУВГП, 2010. 238 с.

13. Рутило М. І. Адаптивна система керування регульованим електроприводом дозаторів компонентів горіння несертифікованого біопалива. *Диверсифікація джерел енергії на базі використання альтернативних видів палива*: матеріали міжнародної науково-технічної онлайн конференції (м. Тернопіль, 8 червня 2021 року). Тернопіль : ТНПУ ім. В. Гнатюка, 2021. С. 42–46. URL: <http://dSPACE.tnpu.edu.ua/bitstream/123456789/21559/1/Rutulo.pdf>

*Дата першого надходження статті до видання: 03.03.2026*

*Дата прийняття статті до друку після рецензування: 30.03.2026*

*Дата публікації (оприлюднення) статті: 18.05.2026*

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



**S. Haidukevych, N. Semenova**

**Separated Subdivision of the National University of Bioresources and Nature Management  
of Ukraine “Berezhansky Agrotechnical Institute”**

## **INCREASING THE EFFICIENCY AND RELIABILITY OF THE ELECTRIC MOTOR BASED ON AN INTELLIGENT DIAGNOSTIC SYSTEM AND ADAPTIVE CONTROL**

### *Summary*

The article considers the problem of increasing the efficiency and reliability of the asynchronous electric motor driving the main working body of the extruder under conditions of variable technological load. The analysis of methods of control, diagnostics and management of electric drives is analyzed. An intelligent system for diagnosing and adaptive control of the extruder drive motor has been proposed, which provides a comprehensive approach to analytical assessment of the technical condition, prediction of the development of defects, optimization of operating modes and prevention of emergency situations based on multi-channel measurement, digital signal processing and intelligent analysis methods. This system is a complex of hardware and software modules that interact in real time with the electric motor, sensors of the corresponding technological parameters, and the operator interface.

Unlike existing methods of diagnosing technical condition and adaptive control systems, which mostly do not provide a transition from reactive to proactive maintenance, The proposed intelligent system is characterized by a significantly higher level of functionality, information richness, adaptability, and the ability to self-diagnose. Using such a system not only increases the reliability, energy efficiency, and durability of the electric motor, but also contributes to the stability of the technological process, reduced energy costs, and reduced routine maintenance.

This intelligent system of diagnostics and adaptive control of the electric motor allows you to timely identify anomalies, analyze the rate of increase in insulation temperature and predict the moment when critical values are reached, which significantly reduces the probability of electric motor failure and increases the reliability of the technological process as a whole.

The use of the proposed intelligent system makes it possible to transfer technological lines for the extrusion of feed mixtures and food products from the concept of operating according to a set mode to the principles of Smart systems with executive functions of automatic adaptation and self-diagnosis. For extruders, this transition is especially important, since their productivity, stability of final product parameters, and energy efficiency depend largely on the level of automation of the electric drive.

**Keywords:** intelligent system, adaptive control, diagnostics, reliability, modern technologies, extruder drive.