УДК 625.681.5 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.4.1.9

С. В. ГАЙДУКЕВИЧ
старший викладач кафедри електротехнологій
та експлуатації енергообладнання
Відокремлений підрозділ
Національного університету біоресурсів і природокористування України
«Бережанський агротехнічний інститут»
ORCID: 0000-0001-5910-5921

Н. П. СЕМЕНОВА
старший викладач кафедри електротехнологій
та експлуатації енергообладнання
Відокремлений підрозділ
Національного університету біоресурсів і природокористування України
«Бережанський агротехнічний інститут»
ORCID: 0000-0002-8478-9429

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА КОНТРОЛЮ, КЕРУВАННЯ ТА ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРОДВИГУНА ПРИВОДУ ЕКСТРУДЕРА

В статті представлено розробку інтелектуальної системи контролю, керування та захисту асинхронних електродвигунів, зокрема приводу головного робочого органу (шнека) екструдера, що працює у важких експлуатаційних умовах із суттєвими динамічними коливаннями навантаження протягом усього технологічного циклу. Запропонована система забезпечує адаптивне коригування режимів роботи електроприводу відповідно до періодичних змін технологічного навантаження, а також здатна безперервно вимірювати й моніторити контрольовані електричні параметри (струм, напруга, частота, температура обмоток і корпусу, крутний момент) для оцінювання технічного стану електродвигуна в процесі роботи та своєчасного виявлення передаварійних ситуацій, що можуть привести до виходу з ладу. Реалізація такого підходу підвищує надійність захисту електродвигунів, сприяє зниженню експлуатаційних втрат, підвищенню енергоефективності та продовженню ресурсу їх роботи.

Розроблена інтелектуальна система контролю, керування та захисту асинхронних електродвигунів, розглянута на прикладі приводу головного робочого органу екструдера для виробництва кормових сумішей і харчових продуктів, базується на впровадженні інноваційних рішень та реалізації концепцій інформаційних технологій, інтелектуального аналізу даних та методів технічної діагностики. Ця система, завдяки реалізації алгоритмів штучного інтелекту та математичних моделей, забезпечує аналіз тенденцій зміни параметрів та, окрім безперервного контролю і моніторингу реальних контрольованих параметрів, здатна оцінювати аварійні ситуації, своєчасно реагувати на них і передавати відповідну інформацію до функціональних блоків найвищого рівня керування.

Запропонована інтелектуальна система поєднує елементи традиційної автоматики з алгоритмами аналітичної обробки даних та сучасними методами діагностики технічного стану, що забезпечує комплексну оцінку надійної роботи електричних машин в процесі виконання заданих функцій.

Впровадження запропонованої інтелектуальної системи забезпечує не лише ефективну експлуатацію електроприводу, але й сприяє переходу автоматизації технологічного процесу екструдування на вищий рівень, що підтверджує практичну значущість та актуальність проведеного дослідження.

Ключові слова: *інтелектуальна система, надійність, превентивний захист, електродвигун, екструдер.*

S. V. HAIDUKEVYCH
Senior Lecturer at the Department of Electrical Technology
and Operation of Power Equipment
Separated Subdivision of National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine “Berezhany Agrotechnical Institute”
ORCID: 0000-0001-5910-5921

N. P. SEMENOVA
Senior Lecturer at the Department of Electrical Technology
and Operation of Power Equipment
Separated Subdivision of National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine “Berezhany Agrotechnical Institute”
ORCID: 0000-0002-8478-9429

© С. В. Гайдукевич, Н. П. Семенова, 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

INTELLIGENT SYSTEM FOR CONTROL, MANAGEMENT AND PROTECTION OF THE EXTRUDER DRIVE MOTOR

The article presents the development of an intelligent system for monitoring, controlling and protecting asynchronous electric motors, in particular the drive of the main working element (screw) of the extruder, which operates in difficult operating conditions with significant dynamic load fluctuations throughout the entire technological cycle. The proposed system provides adaptive adjustment of the operating modes of the electric drive in accordance with periodic changes in the technological load, and is also capable of continuously measuring and monitoring controlled electrical parameters (current, voltage, frequency, winding and housing temperature, torque) to assess the technical condition of the electric motor during operation and timely detection of pre-emergency situations that may lead to failure. Implementing this approach increases the reliability of electric motor protection, helps reduce operational losses, increase energy efficiency, and extend their service life.

The developed intelligent system for monitoring, control and protection of asynchronous electric motors, considered on the example of the drive of the main working body of an extruder for the production of feed mixtures and food products, is based on the implementation of innovative solutions and the implementation of information technology concepts, intelligent data analysis and technical diagnostic methods. This system, thanks to the implementation of artificial intelligence algorithms and mathematical models, provides analysis of trends in parameter changes and, in addition to continuous control and monitoring of real controlled parameters, is capable of assessing emergency situations, respond to them in a timely manner and transmit relevant information to the functional blocks of the highest level of management.

The proposed intelligent system combines elements of traditional automation with analytical data processing algorithms and modern methods of technical condition diagnostics, which provides a comprehensive assessment of the reliable operation of electrical machines in the process of performing specified functions.

The implementation of the proposed intelligent system ensures not only the effective operation of the electric drive, but also contributes to the transition of automation of the extrusion technological process to a higher level, which confirms the practical significance and relevance of the research conducted.

Key words: *intelligent system, reliability, preventive protection, electric motor, extruder.*

Постановка проблеми

На сучасному етапі розвитку новітніх технологій найбільшого розповсюдження у виробництві кормів та харчової продукції набули одношнекові екструдери [1, с. 66].

Одним із ключових елементів такого обладнання є електропривод, який забезпечує обертання робочих органів та визначає стабільність і продуктивність технологічних процесів. Електродвигуни, що працюють у складі ліній виробництва кормів та харчової продукції, постійно зазнають впливу змінного технологічного навантаження, підвищених температур, вібрацій і механічних перевантажень, що робить їх найбільш вразливими до передчасного зношування та аварійних відмов. Традиційні автоматичні системи керування приводами переважно розраховані на роботу установок з фіксованими параметрами та не враховують зміну навантажень на валу електродвигунів в процесі робочого технологічного циклу. Захисні пристрої, традиційних систем, мають обмежену чутливість та не забезпечують комплексного оцінювання параметрів електродвигунів в режимі реального часу. В той час, як у фактичних умовах установки технологічних ліній, в тому числі екструдери, працюють у нерівномірних, близьких до критичних режимах, де характер навантаження змінюється під впливом фізико-механічних властивостей сировини, ступеня її підготовки, швидкості і умов подачі та температурно-вологісних режимів процесу, що призводить до періодичних перевантажень електродвигунів, нераціонального використання електроенергії, прискореного зношування електричних і механічних елементів приводу. Існуючі методи діагностики асинхронних двигунів мають ряд недоліків внаслідок обмеженості використовуваних методів та алгоритмів, застарілості технологій [2, с. 6]. Це, в свою чергу, знижує надійність і довговічність обладнання. Тому для завчасного виявлення змін параметрів, що ведуть до передчасного виходу з ладу [3, с. 95], а також для підтримання оптимальних режимів роботи електроприводів виникає потреба у використанні більш гнучких та інтелектуальних підходів спрямованих оцінювати технічний стан і залишковий ресурс двигунів в процесі їх роботи.

Використання передових технологій [4, с. 34] і високотехнологічних засобів автоматизації надає можливість не тільки активізувати і вдосконалювати існуючі методи діагностування асинхронних двигунів та підвищувати ефективність технологічних процесів, а й створювати новий рівень надійності електроустаткування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

В науковій літературі простежується, що значна частина наукових досліджень зосереджені на аналізі та оптимізації конструктивних особливостей екструдерів. Оскільки дослідники прагнуть виявити найбільш ефективні способи вдосконалення конструкцій, що дадуть змогу підвищити продуктивність обладнання [5, с. 115]. Наприклад науковці, зокрема Осипенко В.І., Ситник О.О., Некоз О.І., Філімонова Н.В. та інші вважають, що підвищення якісних технологічних та експлуатаційних показників екструдера можна досягти шляхом вдосконалення конструкції робочої камери, в результаті чого можна скоротити її довжину. Такий підхід надає змогу значно спростити експлуатацію обладнання та забезпечити його максимальну продуктивність [6, с. 115].

Однак, конструктивні зміни не завжди гарантують комплексне підвищення ефективності, оскільки основні втрати енергії та коливання параметрів процесу часто пов'язані з режимами роботи електроприводу, зокрема з нестабільністю навантаження.

Інженер Широкова А.Г. та інші дослідники зазначають, що застосування частотно-регульованих приводів дозволяє суттєво зменшити енергоспоживання, забезпечити високу надійність роботи агрегатів і якість протікання технологічних процесів. Але головний недолік спеціалізованих частотних регульованих електроприводів полягає у тому, що вони не генерують сигнал аварії при аварійному [7, с. 115] режимі. А це не задовольняє сучасні вимоги експлуатації енергообладнання. Тому, незважаючи на існуючі методи підвищення надійності електродвигунів, постає потреба у створенні більш прогресивної систем керування і захисту електроприводів, зокрема, приводу головного робочого органу екструдера лінії виготовлення корму. Такі системи повинні бути здатні не лише стабілізувати технологічні параметри та оперативно реагувати на їх відхилення, а й передбачати виникнення дій збурюючих факторів та здійснювати превентивний захист. Це обумовлено тим, що основною передумовою зниження відмов в період експлуатації, є своєчасне діагностування і прогнозування поточного стану в ракурсі його впливу на період безвідмовної роботи [8, с. 55].

Формулювання мети дослідження

Метою статті є розроблення інтелектуальної системи контролю, керування та захисту електродвигуна, на прикладі приводу головного робочого органу екструдера лінії виготовлення корму, яка забезпечить адаптивне регулювання режимів роботи приводу в умовах нестабільного навантаження та реалізацію функцій самодіагностики, прогнозування технічного стану і своєчасного реагування на аварійні ситуації в режимі реального часу.

Викладення основного матеріалу дослідження

Під час роботи екструдера лінії виготовлення кормів та харчової продукції відбуваються різноманітні фізичні процеси, внаслідок чого навантаження на валу двигуна основного робочого органу постійно знаходиться в динаміці. Реалізація різних типів навантаження призводить до завищення потужності приводних двигунів [9, с. 322] та підвищення ймовірності виникнення перевантажень, перегріву обмоток і механічних зношувань, в кінцевому підсумку, до негативних аварійних наслідків, що носять електричний або механічний характер.

Аварії електричного характеру спричинюють відхилення параметрів мережі живлення, порушення фазової симетрії, струмові пошкодження, що виникають унаслідок обривів статорних чи роторних обмоток, міжвиткових і міжфазних замикань, пробою ізоляції, спричиненого тепловим перевантаженням, руйнування контактних з'єднань. А також можуть виникнути аварії, пов'язані зі зниженням опору ізоляції внаслідок її старіння, механічного руйнування чи зволоження. Крім того, відомо, що основна частина відмов, через підвищену вібрацію [10].

Не прості експлуатаційні умови, притаманні лініям виготовлення кормів та харчової продукції, формують низку несприятливих чинників, які суттєво ускладнюють роботу асинхронних двигунів, зокрема приводу головного робочого органу екструдера. Внаслідок цього різко зростають вимоги до засобів діагностування та захисту електроприводів. Це зумовлює потребу у застосуванні більш адаптованої системи керування, контролю параметрів та одночасного діагностування в режимі реального часу, що забезпечить безперервний моніторинг технічного стану електродвигуна та автоматичний захист від аварійних режимів без тимчасового припинення роботи. Розв'язання цих проблемних задач дозволить підвищити технічний рівень екструдерів [1, с. 66], оптимізувати процеси керування електроприводами та підтримати експлуатаційні показники в межах установлених технічних норм. Зокрема, стабілізувати роботу електродвигуна в умовах змінного навантаження, скоротити кількість відмов та підвищити надійність і довговічність приводу шнека екструдера. Основними документами, що регламентують умови експлуатації електричних машин, є стандарти, що визначають загальні технічні вимоги до електричних машин [11], і є важливою нормативною основою для забезпечення їх надійності та безпечності. Однак саме інтеграція інтелектуальних засобів керування дає можливість забезпечити цілеспрямоване дотримання цих вимог в умовах реальної, змінної технологічної динаміки.

Враховуючи те, що зовнішні збурюючі чинники такі як підвищення вібрації, зміна тиску, нестабільність струму, часті перевантаження та коливання температур, безпосередньо впливають на електричні двигуни під час їх експлуатації, що істотно знижує стабільність роботи та призводить до передчасного старіння ізоляції і зносу деталей, запропоновано актуальну на сьогоднішній день розробку інтелектуальної системи керування, контролю та захисту. Ця система поєднує елементи класичної автоматики з алгоритмами аналітичної обробки даних та сучасними методами самодіагностики, прогнозування і попередження розвитку різного типу дефектів. Вона здатна проводити аналіз динаміки зміни параметрів, що забезпечує раннє виявлення відхилень, адаптивне регулювання режимів роботи та превентивне запобігання аварійним ситуаціям. Це суттєво підвищує надійність і ефективність роботи електроприводів та їх довговічність. Сучасні прогресивні підходи до вдосконалення системи автоматичного керування технологічним процесом екструдування кормових сумішей і харчових продуктів дедалі більше орієнтуються на впровадженні інноваційних рішень і реалізації концепцій інформаційних технологій, інтелектуального аналізу даних та методів технічної діагностики. Такі технічні рішення дозволяють уникнути затримок та оптимізувати робочі процеси за рахунок швидкого і точного виконання команд, істотно скоротити

час простою і прискорити виконання завдань [12, с. 54], оскільки застосування методів і засобів діагностування трифазних асинхронних двигунів є ефективним способом забезпечення високої їх надійності, що дозволяє скоротити терміни та трудомісткість технічного обслуговування і ремонту [13, с. 8]. Зокрема, щоб підготуватися до запланованого ремонту, бажано виявити всі дефекти, що впливають на ресурс, задовго до відмови [14, с. 67].

Запропонована розробка інтелектуальної системи керування, контролю та захисту електродвигуна приводу головного робочого органу (шнека) екструдера забезпечує комплексну оцінку технічного стану під час роботи завдяки багатофункціональним вимірюванням контрольованих параметрів, їх аналітичній обробці та застосуванню високотехнологічних методів діагностування. Ненормальні режими приводу екструдера найбільш проявляються таким чином: струмові перевантаження викликають інтенсивний нагрів обмоток статора, пульсації моменту прискорюють зношування підшипників та валу, ударні динамічні навантаження проявляються при різкій зміні параметрів сировини, погіршення тепловідведення виникає в результаті накопичення пилу, бруду та підвищення температури оточуючого середовища.

Архітектура системи складається з основних взаємопов'язаних модульно-функціональних блоків, які виконують чітко визначені функції, а саме (рис. 1):

– Блок збору інформації, який реалізує сенсорні модулі для безперервного вимірювання і реєстрації фазних струмів статора, напруги живлення, крутного моменту, температури обмоток і корпусу, швидкості обертання і навантаження на валу двигуна та вібраційних і акустичних коливань. Зібрана інформація є основою формування оцінки технічного стану та аналізу ознак аварійності.

– Блок первинної обробки інформації виконує оцифрування сигналів, фільтрацію, нормалізацію та усунення перешкод, структурування та коректування даних для подальшої коректної обробки, що підвищує точність діагностичного аналізу.

– Блок інтелектуальної діагностики (аналітичний модуль), який реалізує алгоритми штучного інтелекту та математичних моделей для аналізу і оцінки параметрів, що характеризують технічний стан електродвигуна: амплітудних і спектральних складових струму, коефіцієнтів гармонік, теплових моделей, відхилень напруги, показників вібрації та ковзання. На основі аналізу цих показників формується база для прогнозування розвитку несправностей.

– Блок прогнозування та виявлення відхилень дозволяє по заданих і поточних даних оцінити залишковий ресурс електродвигуна та спрогнозувати наближення аварійних режимів. Тобто цей блок формує відповідні команди залежно від визначеного технічного стану, а саме: рекомендації щодо корекції режимів роботи, обмеження навантаження, зміна швидкості, вимкнення двигуна, активація захисних пристроїв, перехід у безпечний режим та подача оператору сигналу попередження аварійного режиму. Зокрема, блок забезпечує виявлення міжвиткових замикань, перевантажень, зниження опору ізоляції, порушення теплового режиму, механічних дефектів приводу та інших чинників.

– Блок адаптивного керування виконавчими механізмами автоматично корегує режим роботи електродвигуна відповідно поточного коливання навантаження і прогнозованих змін технологічного процесу. Цей блок реалізує сформовані команди від аналітичного блоку через інтерфейси Modbus RTU для регулювання параметрів частотно-регульованого приводу. Це дозволяє автоматично регулювати частоту та напругу живлення електродвигуна, забезпечуючи стабілізацію швидкості обертання незалежно від динаміки навантаження, підтримання оптимального моменту, обмеження струму в аварійних режимах, компенсацію пікових навантажень та корегування режимів пуску та зупинки. Це дозволяє адаптувати роботу приводу відповідно до струму навантаження.

– Блок апаратного захисту працює незалежно від інтелектуальних алгоритмів, що забезпечує багаторівневий захист електродвигуна від перевантажень, перенапруг, асиметрії фаз, перевищення температури, виявлення короткого замикання, механічних блокувань та критичних відхилень параметрів, що підвищує надійність електроприводу. У випадку небезпечного режиму блок формує сигнал на автоматичне аварійне відключення або переведення системи в безпечний режим у разі виникнення критичних відхилень.

– Блок комунікації (архівації) та передачі даних забезпечує накопичення статистичної інформації в локальних або хмарних сховищах, а також обмін інформацією між усіма функціональними блоками та зовнішніми базами даних і контролерами за допомогою стандартних протоколів інтеграції системи.

– Блок інтерфейсу та моніторингу надає оператору доступ до інформації, тобто, забезпечує візуалізацію параметрів (струм, напруга, швидкість, температура, навантаження) в реальному часі, індикацію аварійних відхилень, взаємодію з оператором. Оператор отримує оперативні повідомлення про відхилення, прогнози відмов та рекомендації з технічного обслуговування.

В момент дослідження розглядався електродвигун приводу шнека екструдера типу АИР180М4У3 потужністю 30 кВт, швидкістю обертання 1470 об/хв, моментом інерції $J = 0{,}19$ кг·м², номінальний струм 56,9 А.

Розроблена інтелектуальна система, яка застосовувалася цим двигуном працює наступним чином: датчики вимірюють контрольовані величини, саме: пусковий струм, який по розрахунковим даним становить ≈ 398А, швидкість розгону, температуру обмоток, напругу мережі, вібрацію від стартового навантаження. Зібрана

інформація передається в блок первинної обробки. Там інформація оцифровується і фільтрується від шумових сигналів, очищається, тобто, всі дані стандартизуються. Момент екструдера безпосередньо залежить від щільності та вологості сировини. В момент старту пусковий струм затримувався на високому рівні 1,2-1,4 с замість попередньо розрахованого 0,8с.

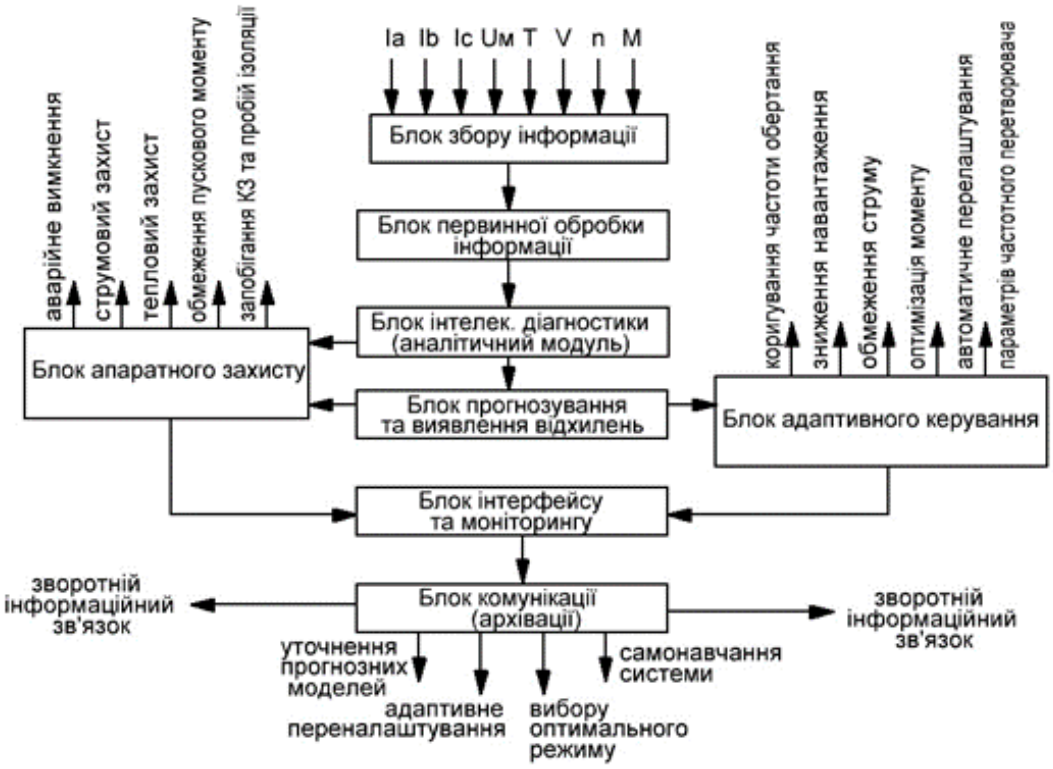

Рис. 1. Структурна схема інтелектуальної системи керування, контролю та захисту електродвигуна приводу головного робочого органу екструдера

Аналітичний модуль використовуючи історичні та поточні дані аналізує стан двигуна, тобто, проводить аналіз трендів пускового струму порівнюючи з еталонними характеристиками двигуна визначивши ступень навантаження шнека.

Момент навантаження становить, якщо $n_н$=1470об/хв=24,5об/с:

$$M_н = \frac{P_н}{\omega_н} = \frac{30000}{2\pi \cdot 24,5} \approx 195 H \cdot м$$

де $P_н$ -номінальна потужність, Вт; ω – номінальне значення кутової швидкості, $с^{-1}$.

Під час роботи момент перевищив 270 Н·м, хоча номінальний момент становить 195-200 Н·м. Аналітичний модуль проаналізувавши показники виявив, що шнек завантажений надмірно в результаті можливого ущільнення або підвищеної вологості.

Блок прогнозування аналізує наступні поточні дані: запізнення розгону, підвищений момент, зростаючий споживаний струм під час роботи. Цей блок визначає режим роботи шнека, формує керуючі команди і видає сигнал попередження про зростання крутного моменті в результаті ймовірного ущільнення сировини у шнеку і сигнал попередження, що через 5-7 хвилин ймовірне виникнення перевантаження в результаті чого може статися перегрів статора.

Частотний перетворювач коректує і змінює режим роботи двигуна. Подається команда на 10-15% зменшення подачі сировини, для того, щоб стабілізувати тиск в зоні дозування. Зокрема, автоматично змінюється режим роботи, а саме: зменшується частота обертання, знижується сила струму відповідно спадає струм навантаження. У разі виникнення аварійної ситуації передбачається зупинення лінії екструдування.

Блок апаратного захисту відслідковує поточні показники. Наприклад, якщо навантаження продовжує зростати, спрацьовує тепловий захист. Ретельно відстежується температура обмоток (наприклад, 120°С поріг). В момент досягнення температури обмоток 125°С система виконує плавне відключення двигуна.

Блок інтерфейсу та моніторингу на екрані висвітлює інформацію в реальному часі: струм змінюється в межах 59-61А, момент навантаження становить 210 Н·м, температура обмоток 98°С, вібрація в нормі, статус системи:

«зниження навантаження успішне». В той же момент автоматично генерується попередження про підвищену густину сировини. Рекомендовано зменшити подачу.

Блок архівації безперервно записує і зберігає дані для подальшої аналітики й оптимізації.

Розроблена інтелектуальна система являється комплексом апаратно-програмованих функціональних блоків (модулів), які взаємодіють в реальному часі з двигуном, перетворювачем частоти, датчиками технологічних параметрів та операторським інтерфейсом для виявлення типових несправностей (таблиця 1). На відміну традиційних методів керування інтелектуальна система дозволяє не лише стабілізувати роботу технологічного обладнання в умовах змінних навантажень, а й суттєво підвищувати експлуатаційні показники приводу екструдера (таблиця 2), що забезпечує збільшення ресурсу двигуна та мінімізацію аварійних ситуацій.

Таблиця 1

Здатність системи виявлення типових несправностей

Тип несправності	Ознака	Методи виявлення
Коротке замикання у витках обмотки	Збільшення струму, нагрів	Аналіз гармонік струму
Дисбаланс фаз	Різниця струмів між фазами	Аналіз фазних струмів
Знос підшипників	Вібрації, шум	Спектральний аналіз вібрацій
Розбаланс ротора	Зміна частоти обертів, вібрації	Аналіз струмів та вібрацій
Перевантаження або перегрів	Температура обмотки	Термоконтроль

Таблиця 2

Порівняльна характеристика експлуатаційних показників приводу екструдера

Параметр	Традиційна система	Інтелектуальна система
Час реакції на перевантаження	1,2–1,7 с	0,12–0,25 с
Виявлення ранніх дефектів	ні	так
Плавність регулювання моменту	низька	висока
Споживання електроенергії	100 %	85–90 %
Кількість аварійних зупинок	висока	знижена на 40–60 %

Розроблена інтелектуальна система найбільш є особливо ефективною, оскільки забезпечує довготривале збереження та обробку великих масивів даних у локальному або хмарному середовищі, що містять інформацію про динаміку зміни технічного стану електродвигуна, зокрема розвиток пошкоджень та параметри їх прогресування. Накопичення та аналіз таких даних дає можливість своєчасно оцінювати ступінь зношення ізоляції і інших критичних елементів двигуна та запобігати аварійним відмовам обладнання. Оскільки система поєднує класичні принципи електромашинобудування з сучасними методами обробки реальних експлуатаційних даних, створюючи основу для енергоефективного, безпечного та технологічно «розумного» виробництва.

Створена систему також може бути ефективно використана в освітньому процесі для поглиблення вивчення теоретичних і практичних аспектів роботи електричних машин. Здобувачі вищої освіти матимуть змогу сформувати компетентності з дисципліни «Електричні машини», зокрема під час опанування тем «Дослідження фізичних процесів у трифазному асинхронному двигуні» та «Методи вимірювання параметрів і аналіз характеристик асинхронних двигунів». Крім того, система може бути інтегрована у вивчення дисципліни «Основи технічної експлуатації енергообладнання і засобів автоматизації», де сприятиме засвоєнню питань з технічного обслуговування, моніторингу, надійністі, профілактики та методів впровадження автоматизованих систем контролю стану електротехнічного обладнання.

Висновки та перспективи подальших розвідок

Запропонована розробка інтелектуальної системи керування, контролю та захисту електродвигуна приводу головного робочого органу екструдера забезпечує набагато вищий рівень надійності та енергоефективності на відміну традиційним методам захисту завдяки реалізації підходів до комплексного контролю і діагностики електричної машини спрямованих на виявлення аномальних режимів, прогнозування ймовірних несправностей, попередження відмов на ранніх стадіях їх зародження та можливостей адаптувати роботу приводу в залежності зміни навантаження. Такі системи можна використовувати не лише в лініях екструдування кормової суміші і харчової продукції, а й інших технологічних процесах з нестабільним навантаженням. Упровадження системи дає можливість перевести сучасні технологічні лінії від концепції «роботи за власним режимом» до принципів Smart-систем, що сприяє підвищенню продуктивності установок, зменшенню експлуатаційних витрат, зниженню витрат електроенергії до 10-18%, продовженню ресурсу роботи електродвигунів на 25-40%.

Список використаної літератури

1. Осипенко В.І., Ситник О.О., Некоз О.І., Філімонова Н.В. Обґрунтування шляхів технічного і технологічного вдосконалення екструдерів. *Вісник Хмельницького національного університету*, 2011. № 1. С. 66-73.

2. Купін А. І., Кузнєцов Д. І. Інформаційна технологія для групової діагностики асинхронних електродвигунів на основі спектральних характеристик та інтелектуальної класифікації. Монографія. Кривий Ріг: Видавець ФОП Чернявський Д. О., 2016. 200 с.

3. Чорна О.А., Чорний О.П., Курляк П.О., Калінін Д.П., Костанда О.І. Система діагностики асинхронних двигунів на основі клієнт-серверної технології та розподіленої СКБД MySQL Cluster. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*, 2023. Вип. 2 (139). С. 94-101.

4. Поліщук А.О. Розробка конструкції шнекового екструдера 3D-принтера, що використовує гранули або подрібнені частки полімеру в якості вихідної сировини. *Технології та інжиніринг*, 2023. № 5(16). С. 33-48.

5. Самойчук К.О., Самохвал В.А. Дослідження роботи шнекового прес-екструдера в парі з багатосекційним пристроєм формування паливних брикетів. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету,* 2025. Вип. 15. Т. 1. С. 114-120.

6. Самойчук К.О., Самохвал В.А. Дослідження роботи шнекового прес-екструдера в парі з багатосекційним пристроєм формування паливних брикетів. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*, 2025. Вип. 15. Т. 1. С. 114-120.

7. Лакосіна А.О., Широкова А.Г. Сучасне застосування частотно-регульованого асинхронного електроприводу. *Сучасний стан та перспективи розвитку електротехнічних систем*: матеріали IV Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції пам'яті В.В. Овчарова (Мелітополь, 04 – 18 листопада 2021 р.). Мелітополь: ТДАТУ, 2021. С. 81-82.

8. 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.

9. Куценко Ю.М. Дослідження нагріву приводних електродвигунів вальцьового станка лінії виробництва борошна. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*, 2014. Вип. 27. С. 321-328.

10. Павленко Т.П., Шавкун В.М., Петренко В.М. Шляхи підвищення експлуатаційної надійності електродвигунів рухомого складу електричного транспорту. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. Харків, 2015. Вип. 6/10 (78).

11. ДСТУ EN 60204-1:2015 Безпечність машин електрообладнання машин, частина 1. Загальні вимоги (EN60204-1:2006; A1:2009; AC:2010, IDT).

12. Смірнов В.І. Аналіз необхідності автоматизації й автоматичного управління двигуном. «Комп'ютерно-інтегровані технології автоматизації технологічних процесів на транспорті та у виробництві»: матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених (20.11.2024, Харків, КІТ-2024). Харків: ХНАДУ, 2024. С. 54-58.

13. Шавкун В.М., Ліньков В.В. Аналіз сучасних методів діагностики технічного стану асинхронних двигунів. *Комунальне господарство міст: наук.-техн. зб. ХНАМГ.: електрична інженерія*, 2019. Вип. 151. Т. 5. С. 2-12.

14. Демішонкова С.А., Демішонков Я.В., Кулік Т.І. Функціональна діагностика параметрів трифазного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну*, 2019. № 4 (136). С. 66-76.

References

1. Osypenko V.I., Sytnyk O.O., Nekoz O.I., Filimonova N.V. (2011). *Obgruntuvannia shliakhiv tekhnichnoho i tekhnolohichnoho vdoskonalennia ekstruderiv [Substantiation of ways of technical and technological improvement of extruders]*. Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. no. 1. pp. 66-73. [in Ukrainian].

2. Kupin A. I., Kuznietsov D. I. (2016). *Informatsiina tekhnolohiia dlia hrupovoi diahnostyky asynkhronnykh elektrodvyhuniv na osnovi spektralnykh kharakterystyk ta intelektualnoi klasyfikatsii [Information technology for group diagnostics of asynchronous electric motors based on spectral characteristics and intelligent classification]*. Monohrafiia. Kryvyi Rih: Vydavets FOP Cherniavskyi D.O. 200 p. [in Ukrainian].

3. Chorna O.A., Chornyi O.P., Kurliak P.O., Kalinin D.P., Kostanda O.I. (2023). *Systema diahnostyky asynkhronnykh dvyhuniv na osnovi kliient-servernoi tekhnolohii ta rozpodilenoi SKBD MySQL Cluster [Client-server mobile system for diagnosis of asynchronous motors]. Visnyk Kremenchutskoho natsionalnoho universytetu imeni Mykhaila Ostrohradskoho*. vol. 2 (139). pp. 94-101. [in Ukrainian].

4. Polishchuk A.O. (2023). *Rozrobka konstruktsii shnekovoho ekstrudera 3D-pryntera, shcho vykorystovuie hranuly abo podribneni chastky polimeru v yakosti vykhidnoi syrovyny [Development of a 3D printer screw extruder design that*

uses granules or crushed polymer particles as the starting material]. Tekhnolohii ta inzhynirynh. no. 5(16). pp. 33-48. [in Ukrainian].

5. Samoichuk K.O., Samokhval V.A. (2025). *Doslidzhennia roboty shnekovoho pres-ekstrudera v pari z bahatosektsiinym prystroiem formuvannia palyvnykh bryketiv [Studying the operation of a screw press extruder in combination with a multi-sectional fuel briquette forming device].* Naukovyi visnyk Tavriiskoho derzhavnoho ahrotekhnolohichnoho universytetu. vol. 15. T. 1. pp. 114-120. [in Ukrainian].

6. Samoichuk K.O., Samokhval B.A. (2025). *Doslidzhennia roboty shnekovoho pres-ekstrudera v pari z bahatosektsiinym prystroiem formuvannia palyvnykh bryketiv [Studying the operation of a screw press extruder in combination with a multi-sectional fuel briquette forming device].* Naukovyi visnyk Tavriiskoho derzhavnoho ahrotekhnolohichnoho universytetu. vol. 15. T. 1. pp. 114-120. [in Ukrainian].

7. Lakosina A.O., Shyrokova A.H. (2021). *Suchasne zastosuvannia chastotno-rehulovanoho asynkhronnoho elektropryvodu [Modern application of frequency-controlled asynchronous electric drive].* Suchasnyi stan ta perspektyvy rozvytku elektrotekhnichnykh system: materialy IV Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi internet-konferentsii pamiati V.V. Ovcharova (Melitopol, 04 – 18 lystopada 2021 r.). Melitopol: *TDATU*. pp. 81-82. [in Ukrainian].

8. Gubarevych O.B., Golubieva S.M. (2019). *Analysis of methods for diagnosing the technical condition of asynchronous motor insulation [Analysis of methods for diagnosing the technical state of insulation of induction motors].* All-Ukrainian scientific collection "Scientific works of Donetsk National Technical University". Series "Electrical Engineering and Power Engineering. pp. 55-63. [in Ukrainian].

9. Kutsenko Yu.M. (2014). *Research on the heating of drive electric motors of the roller mill of the flour production line [Research of electric drive motors heating of valtsovoho stanka production of flour line rolling machine of the flour production line].* Equipment in agricultural production, industrial mechanical engineering, automation. vol. 27. pp. 321-328. [in Ukrainian].

10. Pavlenko T.P., Shavkun V.M., Petrenko V.M. (2015). *Shliakhy pidvyshchennia ekspluatatsiinoi nadiinosti elektrodvyhuniv rukhomoho skladu elektrychnoho transportu [Shliakhy pidvyshchennia ekspluatatsiinoi nadiinosti elektrodvyhuniv rukhomoho skladu elektrychnoho transportu].* Skhidno-Yevropeiskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii. Kharkiv. vol. 6/10 (78). [in Ukrainian].

11. DSTU EN 60204-1:2015 "Safety of machinery electrical machinery machines, part 1. General requirements" (EN60204-1:2006; A1:2009; AS:2010, IDT).

12. Smirnov V.I. (2024). *Analiz neobkhidnosti avtomatyzatsii y avtomatychnoho upravlinnia dvyhunom [Analysis of the need for automation and automatic engine control].* «Kompiuterno-intehrovani tekhnolohii avtomatyzatsii tekhnolohichnykh protsesiv na transporti ta u vyrobnytstvi»: materialy Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii zdobuvachiv vyshchoi osvity i molodykh uchenykh (20.11.2024, Kharkiv, KIT-2024). Kharkiv, KhNADU. pp. 54-58. [in Ukrainian].

13. Shavkun V.M., Linkov V. V. (2019). *Analiz suchasnykh metodiv diahnostyky tekhnichnoho stanu asynkhronnykh dvyhuniv [Studying the operation of a screw press extruder in combination with a multi-sectional fuel briquette forming device].* Komunalne hospodarstvo mist: nauk.-tekhn. zb. KhNAMH.: elektrychna inzheneriia. vol. 151. T. 5. pp. 2-12. [in Ukrainian].

14. Demishonkova S.A., Demishonkov Ya.V., Kulik T.I. (2019). *Funktsionalna diahnostyka parametriv tryfaznoho asynkhronnoho dvyhuna z korotkozamknenym rotorom [Functional diagnosis of the parameters of the three-phase asynchronous engine with a short-circuited rotor].* Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dyzainu. no. 4 (136). pp. 66-76. [in Ukrainian].

Дата першого надходження рукопису до видання: 18.11.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 16.12.2025
Дата публікації: 31.12.2025