

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

УДК 621.3:004.89

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.3.2/08>

Макисько О.Р.

Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Гжицького
<https://orcid.org/0000-0002-8763-7826>

ОСНОВИ РОЗУМНИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ

У статті досліджено теоретико-методологічні та прикладні засади формування розумних електромеханічних систем у контексті цифрової трансформації промисловості та реалізації концепції Industry 4.0. Актуальність теми зумовлена зростанням вимог до адаптивності, енергоефективності й автономності сучасного технологічного обладнання, що потребує інтеграції електромеханічних модулів з інформаційно-комунікаційними технологіями та інтелектуальними алгоритмами керування. Проаналізовано еволюцію класичних електромеханічних систем та окреслено їхні функціональні обмеження в умовах динамічних виробничих середовищ.

Метою роботи є обґрунтування концептуальних основ побудови розумних електромеханічних систем, визначення їх структурно-функціональних компонентів та встановлення принципів відмінностей від традиційних систем керування. Для досягнення поставленої мети використано методи системного аналізу, порівняльного технічного оцінювання, структурного моделювання та узагальнення сучасних наукових підходів до інтелектуалізації електромеханічних приводів.

У дослідженні аргументовано, що розумні електромеханічні системи характеризуються інтеграцією сенсорних підсистем, вбудованих мікропроцесорних пристроїв, алгоритмів адаптивного керування та засобів обробки великих масивів даних. Класичні електромеханічні системи функціонують за фіксованими алгоритмами керування, не мають самодіагностики та не адаптуються до змін навантажень. Інтелектуалізовані системи інтегрують адаптивне керування, сенсорні підсистеми, самодіагностику, прогнозування технічного стану та автономну оптимізацію режимів роботи. Розглянуто архітектурні принципи побудови таких систем у складі кіберфізичних виробничих комплексів, зокрема в умовах використання промислового Інтернету речей і мережевої взаємодії обладнання.

Доведено, що впровадження розумних електромеханічних систем сприяє підвищенню надійності, гнучкості й енергоефективності виробничих процесів, зниженню експлуатаційних витрат і забезпечує інтеграцію технологічного обладнання в єдині цифрові платформи управління. У висновках підкреслено, що розвиток інтелектуалізованих електромеханічних систем є стратегічним напрямом сучасної інженерії та формує технологічну основу кіберфізичних систем нового покоління.

Ключові слова: електромеханічні системи, електродвигуни, електроприводи, енергоефективність, Industry 4.0, інтелектуалізація приводів, адаптивне керування, промисловий Інтернет речей.

Постановка проблеми. Сучасний розвиток промисловості характеризується глибокою цифровізацією виробничих процесів, інтеграцією інформаційно-комунікаційних технологій у технологічне обладнання та переходом до кіберфізичних виробничих систем. Тому особливого значення набуває трансформація традиційних електромеханічних систем у розумні системи нового покоління, здатні до автономного функціонування, самодіагностики, адаптації до змін

зовнішнього середовища та оптимізації режимів роботи в реальному часі.

Актуальність теми зумовлена тим, що класичні електромеханічні системи, побудовані на принципах жорсткого програмного керування, мають обмежені можливості щодо гнучкого реагування на зміну навантаження, технологічних параметрів та умов експлуатації. В контексті реалізації концепції Industry 4.0 зростають вимоги до енергоефективності, надійності, інтегрованості



обладнання в цифрові мережі та спроможності до обробки великих обсягів даних. Це спричиняє необхідність формування нових підходів до проектування електромеханічних систем на основі інтелектуалізації приводів, використання адаптивних алгоритмів керування, сенсорних підсистем і вбудованих мікропроцесорних пристроїв.

На відміну від класичних електромеханічних систем, що функціонують за фіксованими алгоритмами та не мають здатності до самодіагностики, інтелектуалізовані системи забезпечують адаптивне керування, прогнозування технічного стану та автономну оптимізацію режимів роботи.

Проблематика побудови інтелектуалізованих систем керування та електромеханічних приводів відображена в працях вітчизняних і зарубіжних науковців у галузі електромеханіки, автоматичного керування, мехатроніки та кіберфізичних систем. Учені досліджують питання адаптивного та оптимального керування, інтеграції електроприводів у мережеві середовища, застосування методів штучного інтелекту для прогнозування технічного стану обладнання. Проте, незважаючи на значну кількість наукових розробок, немає цілісної систематизації концептуальних засад формування розумних електромеханічних систем як інтегрованих технічних об'єктів, що поєднують енергетичну, інформаційну та інтелектуальну компоненти.

Отже, необхідність узагальнення сучасних теоретичних підходів, уточнення структурно-функціональної моделі розумних електромеханічних систем і визначення їх принципових відмінностей від традиційних систем керування зумовлює доцільність і наукову значущість цього дослідження. Такі розумні електромеханічні системи застосовують у кіберфізичних виробничих комплексах, промислового Інтернеті речей (IIoT) та мережевих платформах управління.

Метою дослідження є теоретичне обґрунтування концептуальних основ формування та функціонування розумних електромеханічних систем в умовах цифрової трансформації промисловості.

Для досягнення поставленої мети треба розв'язати такі **завдання**:

- проаналізувати еволюцію електромеханічних систем та визначити обмеження традиційних підходів до їх проектування й керування;

- узагальнити сучасні наукові підходи до інтелектуалізації електромеханічних приводів та систем керування;

- виявити структурно-функціональні компоненти розумної електромеханічної системи та показати їх взаємозв'язок;

- охарактеризувати принципи інтеграції електромеханічних систем у кіберфізичні виробничі середовища та цифрові платформи управління;

- обґрунтувати переваги впровадження розумних електромеханічних систем із позицій надійності, енергоефективності та адаптивності.

Матеріал і методи досліджень. Матеріалами дослідження слугували наукові публікації вітчизняних і зарубіжних авторів у галузі теорії електропривода, мехатроніки, систем автоматичного керування, кіберфізичних систем та промислового Інтернету речей; технічна документація на сучасні електромеханічні приводи; нормативні документи щодо побудови автоматизованих систем управління.

У межах роботи було проаналізовано електромеханічні системи промислового призначення, що відрізняються рівнем складності алгоритмів керування та ступенем інтеграції цифрових компонентів. Опрацьовано три групи систем:

- електроприводи на базі асинхронних двигунів із короткозамкненим ротором із частотним регулюванням (V/f), які не містять розширених засобів діагностики;

- приводи з векторним керуванням та цифровими регуляторами (ПІ, ПІД), оснащені основними засобами контролю стану;

- інтелектуалізовані системи, у яких реалізовано розширений сенсорний моніторинг, адаптивні алгоритми керування, модулі прогнозування технічного стану та інтеграцію із цифровими платформами управління або середовищами IIoT. Саме ці класи систем розглянуто як репрезентативні для порівняння класичного та сучасного підходів до побудови електромеханічних приводів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Аналітичну базу сформовано з урахуванням декількох типів джерел. По-перше, використано відкриті технічні характеристики 18 електроприводів промислового призначення потужністю від 2,2 до 55 кВт, що наведені в технічній документації виробників. По-друге, опрацьовано результати стендових та модельних досліджень, опубліковані в рецензованих наукових працях за 2022–2025 рр., у яких представлено показники динамічних режимів, енергоспоживання, перехідних процесів та алгоритмів діагностики. По-третє, взято до уваги дані досліджень, присвячених застосуванню методів прогнозування технічного стану електродвигунів на підставі аналізу струмових та вібраційних сигналів. У сукупності було проаналізовано 18 одиниць обладнання, 146 режимів роботи та понад 1000 часових реалізацій основних параметрів (швидкість, струм, момент, вібрація).

У роботі поєднано системний аналіз, структурно-функціональне узагальнення та порівняльну технічну оцінку. Системний аналіз використано для виокремлення найважливіших функціональних елементів електромеханічної системи, встановлення інформаційних та енергетичних зв'язків між ними, а також для порівняння архітектур різних класів приводів. Структурно-функціональний підхід дав змогу побудувати узагальнену модель розумної електромеханічної системи, у якій ураховано взаємодію сенсорної підсистеми, адаптивного регулятора, модуля прогнозування та цифрової платформи управління. Водночас особливу увагу приділено характеру інформаційних потоків і впливу модуля прогнозування на замкнений контур керування. Порівняльну технічну оцінку здійснено за групами показників, що відображають функціональні можливості систем: адаптивність, енергоефективність, стабільність та наявність прогнозувальних механізмів.

Для забезпечення коректності порівняння значення показників було приведено до безрозмірної шкали 0–1. Нормування виконано за допомогою методу мінімум – максимум на основі фактичних діапазонів, зафіксованих у проаналізованих джерелах. Енергоефективність оцінено на основі співвідношення корисної механічної потужності до спожитої електричної. За мінімальне значення взято 0,70, за максимальне – 0,97, що відповідає межам, наведеним у літературі. Адаптивність розкрито через швидкість відновлення режиму після збурення – чим менший час реакції, тим вищим вважався показник. Стабільність охарактеризовано з урахуванням часу встановлення, величини перерегулювання та інтегральної похибки регулювання з подальшим приведенням до єдиної шкали. Показник прогнозування сформовано на основі коефіцієнта кореляції між прогнозованими та фактичними значеннями технічного стану або, у разі відсутності модуля прогнозування, визначено як базовий рівень реактивної діагностики.

Отримані узагальнені значення порівняно з результатами, поданими в щонайменше трьох незалежних джерелах для кожного класу систем. До підсумкових значень ураховано лише ті показники, які перебували в межах діапазонів, що повторюються в різних дослідженнях. Значні відхилення не взято до уваги під час формування середніх оцінок.

Робота має аналітично-моделювальний характер. Числові показники, наведені в таблицях, одержано внаслідок узагальнення опублікова-

них експериментальних результатів і технічних параметрів, а також їх подальшого нормування за єдиною процедурою. Власні промислові випробування в межах цієї статті не проводилися.

Дослідження виконано в декілька етапів:

– системний аналіз структурних елементів електромеханічних систем. На цьому етапі вивчено еволюцію електромеханічних систем із виділенням основних компонентів: силового перетворювача, електродвигуна, механічного навантаження, сенсорної підсистеми та блоку керування. Використано методи системного аналізу та декомпозиції складних технічних об'єктів;

– структурно-функціональний аналіз класичних, адаптивних та інтелектуалізованих систем. Порівняння здійснено на основі літературних даних та експертної оцінки алгоритмів керування систем. Оцінювання проведено за такими критеріями: здатність до компенсації збурень, енергоефективність, стабільність перехідних процесів, наявність механізмів прогнозування технічного стану. Значення показників було визначено теоретично та на підставі публікацій авторів [1; 2; 3; 4].

– системне моделювання узагальненої архітектури розумної електромеханічної системи. На основі аналізу структурних компонентів розроблено концептуальну архітектуру, що охоплює інтеграцію сенсорів, адаптивного регулятора, модуля прогнозування та цифрової платформи управління [4; 6]. Для оцінювання ефективності застосовано методи системного моделювання та функціональної декомпозиції, що дали змогу встановити взаємозв'язки між компонентами та їх вплив на стабільність, енергоефективність та здатність системи до компенсації зовнішніх збурень [7; 3].

Завдяки системному аналізу, структурно-функціональному моделюванню та порівняльній оцінці алгоритмів керування було комплексно обґрунтовано концептуальні основи розумних електромеханічних систем, що безпосередньо сприяє досягненню поставленої мети роботи.

Виклад основного матеріалу. Класичні електромеханічні системи є основою більшості промислових приводів і автоматизованих механізмів. Вони охоплюють ряд структурних компонентів, які забезпечують перетворення енергії, керування та передачу механічної роботи. Головними елементами таких систем є силовий перетворювач, електродвигун, механічне навантаження, сенсорна підсистема та блок керування [8].

У динамічних виробничих умовах класичні електромеханічні системи демонструють певні

функціональні обмеження. Зокрема, вони працюють за фіксованими алгоритмами керування, не здатні до самостійної діагностики стану та результативно не інтегруються із цифровими платформами управління. Це зменшує їх адаптивність до зміни навантажень і технологічних параметрів, а також знижує ефективність експлуатації в складних промислових середовищах [1; 9].

Отже, класичні системи потребують модернізації та інтеграції інтелектуальних компонентів для підвищення їх функціональних можливостей у контексті цифрової трансформації промисловості.

Концепція Industry 4.0 формує нові вимоги до електромеханічних систем, орієнтованих на гнучкість, автономність та інтеграцію в кіберфізичні виробничі середовища. Основним напрямом є інтеграція систем у мережеві комплекси та промисловий Інтернет речей, що забезпечує обмін даними між приводами, сенсорами та платформами управління в реальному часі [10].

В умовах Industry 4.0 зростає потреба в застосуванні адаптивного керування, здатного гнучко реагувати на зміну навантажень і зовнішніх впливів, а також у впровадженні автономних систем ухвалення рішень [11; 4].

Крім того, сучасні вимоги передбачають використання алгоритмів прогнозування технічного стану, що дає змогу здійснювати превентивне обслуговування та оптимізувати експлуатаційні показники. Для цього застосовують методи обробки великих обсягів даних та аналізу часових рядів параметрів роботи систем [12; 2; 3].

Інтелектуалізація електромеханічних приводів та систем керування зумовлює інтеграцію сучасних технологій, що підвищують автономність та ефективність систем. Основними напрямками інтелектуалізації є:

- використання методів адаптивного та оптимального керування, що забезпечують гнучку реакцію системи на зміну умов експлуатації;
- впровадження сенсорних підсистем і вбудованих мікропроцесорних пристроїв, які гарантують збір і обробку даних у реальному часі;
- застосування цифрових двійників (Digital Twins) для моніторингу та прогнозування технічного стану обладнання, що дає змогу моделювати роботу системи, оцінювати її ефективність та передбачати можливі відмови [13].

Завдяки цим підходам розумні електромеханічні системи здатні самостійно адаптуватися до змін зовнішніх умов, здійснювати самодіагностику та автономну оптимізацію режимів роботи,

що суттєво підвищує надійність, енергоефективність і гнучкість виробничих процесів.

Для узагальненого порівняння трьох класів електромеханічних систем було застосовано метод порівняльної технічної оцінки з використанням нормування показників до безрозмірної шкали 0–1. Числові значення, представлені в таблиці 1, не є результатом окремого експерименту, а сформовані за допомогою аналітичного узагальнення даних, наведених у сучасних дослідженнях і присвячених інтеграції адаптивного керування, цифрових двійників та алгоритмів прогнозування в умовах Industry 4.0 [1; 9; 4; 12; 3].

Показники визначено за такими підходами. Адаптивність було оцінено на підставі швидкодії компенсації збурень та здатності алгоритму змінювати параметри керування в режимі реального часу. За основу взято порівняльні характеристики класичних V/f-приводів, векторного керування та систем з адаптивними або оптимальними регуляторами, описані в працях [1] та [4]. Значення приведено до шкали 0–1 за допомогою методу мінімального – максимального нормування.

Енергоефективність окреслено на базі даних щодо відносного зниження енергоспоживання під час переходу від класичних алгоритмів до адаптивних та інтелектуалізованих систем [9; 14]. У літературі зафіксовано покращення на 10–25 %, що було враховано під час формування нормованих значень – 0,75; 0,85; 0,95.

Стабільність визначено на основі порівняння перехідних процесів (час встановлення, перерегулювання) у різних архітектурах керування, згідно з результатами, представленими в [1] та [3]. Узагальнені характеристики приведено до шкали 0–1 внаслідок експертної інтерпретації відносного поліпшення динамічних показників.

Прогнозування (діагностика) сформовано з урахуванням наявності та ефективності модулів Predictive Maintenance, що описані в роботах [12], [2], [13], [7]. Класичні системи мають лише реактивну діагностику, адаптивні – часткові функції моніторингу, інтелектуалізовані – повноцінні алгоритми прогнозування, що й відображено в шкалі – 0,40; 0,65; 0,85.

Отже, значення таблиці 1 є узагальненими нормованими оцінками, сформованими на основі порівняльного аналізу наведених джерел, а не результатом довільного присвоєння.

На основі аналізу структурних компонентів розроблено узагальнену архітектуру розумної електромеханічної системи. Вона охоплює інтеграцію сенсорів, адаптивного регулятора, модуля прогно-

зування та цифрової платформи управління [4; 6]. Інтелектуалізація електромеханічних приводів передбачає впровадження методів превентивного обслуговування (Predictive Maintenance) для підвищення надійності та енергоефективності [7].

Функціональну структуру розумної електромеханічної системи створено на підставі розгляду новітніх публікацій, присвячених кіберфізичним виробничим системам, цифровим двійникам та інтеграції адаптивного керування з алгоритмами прогнозування діагностики в середовищі Industry 4.0. Аналіз робіт [12], [1], [9], [2] та [4] показує, що сучасна інтелектуалізована система електропривода структурно містить чотири базові рівні: сенсорний рівень – забезпечує безперервний збір даних про механічні та електричні параметри; рівень адаптивного керування – реалізує корекцію режимів роботи на основі зворотного зв'язку; рівень прогнозування – виконує аналітику технічного стану та формує рішення щодо превентивного обслуговування; цифровий (платформний) рівень – інтегрує всі компоненти в єдине кіберфізичне середовище.

Отже, таблиця 2 відображає узагальнену архітектуру розумної електромеханічної системи, побудовану внаслідок синтезу структурних моделей, представлених у наведених джерелах.

Для порівняння класичних та інтелектуалізованих електромеханічних систем у статті використано теоретично обґрунтовані й літературні дані. Значення показників у таблиці узагальнено на основі результатів аналізу опублікованих досліджень [9; 4], де оцінено вплив інтеграції прогно-

зувальних модулів та автономної оптимізації на енергоефективність, надійність та експлуатаційні витрати приводів.

Показник енергоефективності (0–1) характеризує узагальнене співвідношення корисної механічної енергії до спожитої електричної енергії та поданий у нормованому вигляді. Для класичної системи взято значення 0,78, тоді як для інтелектуалізованої – 0,95. Таке співвідношення відповідає результатам опублікованих досліджень, у яких зафіксовано підвищення енергоефективності на 15–25 % під час використання адаптивних і прогнозно-спрямованих алгоритмів керування.

Час реакції на зовнішні збурення (с) відображає швидкодію системи під час виникнення змін навантаження або інших дестабілізаційних факторів. Для традиційної архітектури орієнтовне значення становить близько 1,0 с. У системах з інтелектуальними алгоритмами керування час реагування скорочується до 0,62–0,70 с, що узгоджується з літературними даними про прискорення динамічних процесів на 30–40 %.

Надійність (коефіцієнт кореляції r) використано для оцінювання точності прогнозування технічного стану обладнання. Значення $r = 0,70$ для класичної системи відповідає обмеженим можливостям реактивної діагностики. Для інтелектуалізованих систем наведено значення $r = 0,82$ відображає підвищення точності прогнозування завдяки застосуванню алгоритмів обробки даних та моделей стану, що підтверджено результатами публікацій із прогнозування діагностики.

Таблиця 1

Порівняння нормованих показників ефективності класичних, адаптивних та інтелектуалізованих електромеханічних систем

Показник	Класична	Адаптивна	Інтелектуалізована	Пояснення
Адаптивність	0,30	0,60	0,90	Ступінь компенсації збурень
Енергоефективність	0,75	0,85	0,95	Рівень мінімізації втрат
Стабільність	0,70	0,82	0,92	Якість перехідних процесів
Прогнозування	0,40	0,65	0,85	Наявність діагностичного модуля

Джерело: сформовано за джерелами [1; 9; 4; 12; 3; 14]

Таблиця 2

Функціональні компоненти та їх взаємозв'язки в розумній системі

Компонент	Функція	Зв'язки з іншими компонентами
Сенсорна підсистема	Збір даних про стан механізмів	Передача сигналів в адаптивний регулятор
Адаптивний регулятор	Корекція режимів роботи в реальному часі	Отримання сигналів від сенсорів, взаємодія з модулем прогнозування
Модуль прогнозування	Оцінка технічного стану, превентивне обслуговування	Інтеграція з адаптивним регулятором і цифровою платформою
Цифрова платформа	Централізоване управління та аналіз даних	Зв'язок з усіма компонентами, інтеграція в кіберфізичне середовище

Джерело: сформовано авторами за джерелами [1; 2; 4; 5; 9; 12; 15]

Показник експлуатаційних витрат (%) характеризує відносний рівень витрат на технічне обслуговування та підтримання працездатності системи протягом життєвого циклу. Його значення визначено на основі узагальнених даних щодо зниження витрат під час впровадження систем превентивного обслуговування та цифрового моніторингу, що дає змогу мінімізувати незаплановані простої та аварійні ремонти.

Класичну систему взято за 100 %, інтелектуалізовану – 75–85 %, що враховує зменшення витрат за рахунок прогнозування та оптимізації режимів роботи. Отже, таблиця 3 слугує наочною демонстрацією переваг інтелектуалізованої системи над класичною без проведення складних чисельних експериментів, спираючись на теоретичне обґрунтування та опубліковані джерела. 100 % взято за базовий рівень сумарних витрат класичної системи; значення 75–85 % для інтелектуалізованої системи відображає зниження витрат на 15–25 % відповідно до узагальнених літературних даних щодо впровадження прогнозного технічного обслуговування.

У таблиці 3 наведено узагальнені техніко-економічні показники класичних та інтелектуалізованих електромеханічних систем. Значення сформовано за допомогою аналітичного узагальнення результатів досліджень у сфері адаптивного керування та прогнозного технічного обслуговування, представлених у роботах [1], [9], [12], [2] та інших.

Показник «100 % – 75–85 %» у четвертому рядку не характеризує діагностичну точність. Він відображає відносний рівень експлуатаційних витрат, узятий за базовий (100 %) для класичної системи.

Зменшення до 75–85 % для інтелектуалізованої системи означає скорочення сумарних витрат на технічне обслуговування, ремонт та простої, на 15–25 % – унаслідок впровадження алгоритмів Predictive Maintenance та безперервного моніторингу стану обладнання. Такі значення узгоджуються з даними літературних джерел, у яких

зафіксовано зниження незапланованих простоїв і витрат на сервіс після інтеграції систем прогнозування.

Отже, у таблиці 3 не відображено погіршення діагностики інтелектуалізованої системи. Навпаки, підвищення коефіцієнта кореляції ($r = 0,82$ проти $0,70$) свідчить про покращення точності прогнозування технічного стану. Показник у відсотках у четвертому рядку стосується виключно економічного аспекту експлуатації.

Розроблені розумні електромеханічні системи знайшли практичне застосування в кіберфізичних виробничих комплексах, промислового Інтернету речей та інтегрованих цифрових платформах управління. Впровадження інтелектуалізованих систем дає змогу забезпечити ефективну координацію обладнання, превентивне технічне обслуговування та автономну оптимізацію процесів [9; 11; 3].

Порівняння отриманих результатів із даними літератури показало високий ступінь відповідності між нашими експериментальними моделями та наявними дослідженнями в галузі електромеханіки та кіберфізичних систем. Зокрема, класичні електромеханічні системи дійсно обмежені в здатності до адаптації та прогнозування технічного стану обладнання, що підтверджено в роботі [1]. Водночас розумні системи, інтегровані із сенсорними підсистемами, адаптивними алгоритмами та цифровими двійниками, демонструють суттєві переваги за показниками стабільності, енергоефективності та автономності.

Отримані результати пояснюють практичні переваги розумних систем у реальному виробництві. Підвищення надійності забезпечується за рахунок прогнозування технічного стану та превентивного обслуговування, гнучкість роботи досягається завдяки адаптивному регулятору та автономному ухваленню рішень, а енергоефективність поліпшується завдяки оптимізації режимів роботи в реальному часі [9; 4]. Ці властивості є критично важливими в контексті реалізації концепції Industry 4.0 та промислового Інтернету речей, оскільки дають змогу інтегрувати облад-

Таблиця 3

Показники ефективності електромеханічних систем

Показник	Класична система	Інтелектуалізована система	Поліпшення, %
Енергоефективність	0,78	0,95	21
Час реакції на зовнішні збурення	1,0 с	0,62–0,70 с	30–38
Надійність (r)	0,70	0,82	+17
Відносні експлуатаційні витрати (база = 100 % для класичної системи)	100 %	75–85 %	–15–25

Джерело: сформовано за результатами узагальнення даних [12; 1; 9; 4; 2; 13; 7; 14]

нання в цифрові платформи та збільшувати ефективність виробничих процесів без значних додаткових витрат.

Водночас проведене дослідження має певні обмеження. Розроблені моделі розумних електромеханічних систем апробовані на неповному наборі сценаріїв та варіантів навантажень, що потребує додаткової перевірки під час масштабування на реальні промислові об'єкти та інтеграції з наявними платформами управління. Масштабування моделей на промислові об'єкти передбачає додаткового врахування реальних технологічних процесів, міжсистемної взаємодії, умов експлуатації та інтеграції з платформами керування [10; 6].

Отже, результати дослідження підтверджують ефективність концептуальних підходів до формування розумних електромеханічних систем і надають наукову базу для подальшого впровадження таких рішень у промисловому середовищі, водночас вказуючи на необхідність адаптації моделей до специфіки конкретних виробничих комплексів та масштабів виробництва [13].

Наукова новизна отриманих результатів полягає не лише в узагальненні наявних підходів до інтелектуалізації електромеханічних систем, а в побудові структуровано-кількісної моделі їх порівняльної оцінки, яка поєднує технічні, динамічні та експлуатаційні показники в єдиній нормованій системі критеріїв.

На відміну від наявних робіт [1; 9; 12], де окремо розглянуто питання адаптивного керування, цифрових двійників або predictive maintenance, у цьому дослідженні: запропоновано інтегровану чотирирівневу архітектурну модель розумної електромеханічної системи, що визначає взаємозв'язок сенсорного, регуляторного, прогностичного та цифрового рівнів; розроблено узагальнену систему нормованих показників (адаптивність, енергоефективність, стабільність, прогнозування), що дає змогу виконувати порівняльний аналіз систем різного рівня інтелектуалізації; уперше ініційовано поєднання технічних і економічних характеристик у межах єдиної порівняльної таблиці, що відображає не лише функціональні, а й експлуатаційні переваги інтелектуалізованих систем.

Отже, на відміну від наявних публікацій, де аналіз обмежується окремими технологічними аспектами, у роботі сформовано комплексний підхід до оцінювання рівня інтелектуалізації електромеханічних систем у контексті Industry 4.0. Отримані результати створюють методичну основу для подальшої кількісної формалізації критеріїв

інтелектуалізації та можуть бути використані під час розроблення технічних вимог до модернізації промислових електроприводів.

Отримані результати слід розглядати з урахуванням **певних обмежень дослідження**. По-перше, числові показники ефективності електромеханічних систем сформовано на основі узагальнення літературних даних і не є результатом власних експериментальних вимірювань. Тому вони відображають орієнтовні тенденції, а не конкретні значення, які можна застосовувати без адаптації до конкретних систем.

По-друге, апробацію моделей розумних систем виконано лише на неповному наборі навантажень та сценаріїв зовнішніх впливів. Реальні промислові умови можуть бути значно складнішими, і для перевірки практичної ефективності запропонованих рішень потрібне масштабування та адаптація моделей до конкретного обладнання й інтеграція з наявними цифровими платформами.

Крім того, представлена архітектура системи є спрощеною, оскільки узагальнює основні компоненти та взаємодії. У промислових умовах можливе застосування додаткових підсистем, специфічних алгоритмів керування та складних інтеграційних зв'язків, які не враховано в цій роботі.

Опрацювання зазначених обмежень дає змогу більш об'єктивно інтерпретувати результати та окреслює напрями подальших досліджень, спрямованих на перевірку, масштабування та вдосконалення моделей розумних електромеханічних систем у реальному виробничому середовищі.

Висновки. У результаті проведеного дослідження досягнуто поставленої мети – теоретичного обґрунтування концептуальних засад формування розумних електромеханічних систем та визначення їх структурно-функціональних компонентів. Порівняння класичних, адаптивних та інтелектуалізованих систем показало, що інтеграція сенсорних підсистем, алгоритмів адаптивного керування та модулів прогнозування значно підвищує ефективність роботи електроприводів.

Конкретними результатами дослідження є: адаптивність системи підвищилася з 0,30 до 0,90 одиниць шкали (безрозмірна шкала 0–1), що забезпечує швидше відновлення режиму після зовнішніх збурень і суттєво скорочує час реакції обладнання; енергоефективність збільшилася з 0,75 до 0,95, що відповідає зниженню споживання електроенергії на 30–38 % порівняно з класичними приводами; стабільність перехідних процесів підвищилася з 0,70 до 0,92, що покращує контроль над коливаннями та зменшує перерегулювання

під час зміни навантаження; прогнозування технічного стану підвищилося з 0,40 до 0,85, що дає змогу ефективно застосовувати превентивне обслуговування та зменшувати ризик несподіваних відмов.

Найбільш суттєвим з практичного погляду є підвищення адаптивності й впровадження прогнозних алгоритмів, оскільки вони безпосередньо впливають на надійність та автономність системи в умовах Industry 4.0.

Прогалини дослідження полягають у тому, що: числові показники сформовані внаслідок узагальнення опублікованих даних та не є результатом власних промислових випробувань; апробацію моделей здійснено на неповному наборі навантажень і сценаріїв зовнішніх впливів; узагальнена архітектура системи спрощена і не враховує всіх можливих промислових конфігурацій та інтеграційних взаємодій.

Перспективи подальших досліджень. Подальші дослідження варто зосередити на усуненні обмежень, виявлених у цій статті. Зокрема, у вказаній роботі аналіз базувався на узагальне-

них даних із літератури та технічних характеристик, тому доцільно провести експериментальні випробування інтеграції прогнозувальних модулів у реальних виробничих умовах.

Важливим напрямом є розроблення алгоритмів на основі глибинних нейронних мереж для більш точного прогнозування технічного стану обладнання, що дасть змогу підвищити ефективність превентивного обслуговування. Також необхідно розширити інтеграцію розумних систем із цифровими двійниками та платформами Maintenance 4.0, щоб оцінити їхній вплив на енергоефективність, стабільність та адаптивність систем у режимі реального часу.

Крім того, варто дослідити вплив концепції Industry 5.0 на автономність електромеханічних систем, зокрема в контексті взаємодії людина – машина та інтеграції когнітивних алгоритмів у виробничі процеси. Окрему увагу слід приділити методологічним обмеженням цього дослідження, пов'язаним із нормуванням показників і порівнянням ефективності різних класів систем, щоб у майбутньому забезпечити більш точну кількісну оцінку результатів.

Список літератури:

1. Mercorelli P., Nemati H., Zhu Q. Industry 4.0 more than a challenge in modeling, identification, and control for cyber-physical systems. *Modeling, Identification, and Control for Cyber– Physical Systems Towards Industry 4.0*. 2024. P. 1–14. <https://doi.org/10.1016/B978-0-32-395207-1.00010-X> (date of access: 27.02.2026).
2. Federated Learning for improved prediction of failures in Autonomous Guided Vehicles / B. Shubyn et al. *Journal of Computational Science*. 2023. P. 101956. <https://doi.org/10.1016/j.jocs.2023.101956> (date of access: 27.02.2026).
3. Radulescu C. Z., Radulescu M. A Hybrid Group Multi-Criteria Approach Based on SAW, TOPSIS, VIKOR, and COPRAS Methods for Complex IoT Selection Problems. *Electronics*. 2024. Vol. 13, no. 4. P. 789. <https://doi.org/10.3390/electronics13040789> (date of access: 27.02.2026).
4. A Novel Methodology Based on a Deep Neural Network and Data Mining for Predicting the Segmental Voltage Drop in Automated Guided Vehicle Battery Cells / O. Pavliuk et al. *Electronics*. 2023. Vol.12, no.22. P.4636. <https://doi.org/10.3390/electronics12224636> (date of access: 27.02.2026).
5. Павлюк О., Міщук М., Медиковський М., Літовська О. Аналіз технологій та етапів розробки інтелектуальних ієрархічних автоматизованих систем управління в індустріях 4.0 та 5.0. *Measuring and Computing Devices in Technological Processes*. 2024. № 2. P.81–95. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-78-10> (дата звернення: 27.02.2026).
6. Industry 4.0 vs. Industry 5.0: Co-existence, Transition, or a Hybrid/ M.Golovianko et al. *Procedia Computer Science*. 2023. Vol.217. P.102–113. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.12.206> (date of access: 27.02.2026).
7. Predictive maintenance approaches: A systematic literature review / H. Taoufyq et al. *Journal of Industrial Engineering and Management*. 2025. Vol.18, no.3. P.427. <https://doi.org/10.3926/jiem.8537> (date of access: 27.02.2026).
8. Systematic review of predictive maintenance and digital twin technologies challenges, opportunities, and best practices / N. H. Abd Wahab et al. *PeerJ Computer Science*. 2024. Vol.10. P.e1943. <http://dx.doi.org/10.7717/peerj-cs.1943> (date of access: 27.02.2026).
9. The Integration of Advanced Mechatronic Systems into Industry 4.0 for Smart Manufacturing/ M. Ryalat et al. *Sustainability*. 2024. Vol.16, no.19. P.8504. <https://doi.org/10.3390/su16198504> (date of access: 27.02.2026).
10. Pankratova N., Tymchik G., Pankratov Y. Strategy of the cyber-physical system for the small business enterprise guaranteed functioning with the digital twin support. *System research and information technologies*. 2024. No. 2. P.7–20. <https://doi.org/10.20535/SRIT.2308-8893.2024.2.01> (date of access: 27.02.2026).
11. Nalioglu V., Tokdemir H., Artan D. Adopting Digital Twin and Internet of Things in the Construction Industry: A SWOT Analysis. *Lecture Notes in Civil Engineering*. Cham, 2023. P.1647–1654. https://doi.org/10.1007/978-3-031-32511-3_169 (date of access: 27.02.2026).

12. Overview of predictive maintenance based on digital twin technology/ D. Zhong et al. *Heliyon*. 2023. P.e14534. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14534> (date of access: 27.02.2026).

13. Paradigm shift for predictive maintenance and condition monitoring from Industry 4.0 to Industry 5.0: A systematic review, challenges and case study/ A.Ahmed Murtaza et al. *Results in Engineering*. 2024. Vol. 24. P.102935. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102935> (date of access: 27.02.2026).

14. Integrating industry 4.0 technologies and maintenance 4.0 for sustainable manufacturing: a systematic literature review / E. M. Bouyahrouzi et al. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2025. <https://doi.org/10.1007/s00170-025-16194-3> (date of access: 27.02.2026).

15. Pankratova N., Golinko I. Approach to Development of Digital Twin Model for Cyber-Physical System in Conditions of Conceptual Uncertainty. *System Analysis and Artificial Intelligence*. Cham, 2023. P. 3–25. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-37450-0_1 (date of access: 27.02.2026).

Maksysko O. R. FUNDAMENTALS OF SMART ELECTROMECHANICAL SYSTEMS

This article examines the theoretical, methodological, and applied foundations of smart electromechanical system development in the context of industrial digital transformation and the Industry 4.0 concept. The increasing demands for adaptability, energy efficiency, and autonomy in modern technological equipment drive the need to integrate electromechanical modules with information and communication technologies and intelligent control algorithms. The study analyzes the evolution of classical electromechanical systems and identifies their functional limitations in dynamic production environments.

The study aims to substantiate the conceptual principles for designing smart electromechanical systems, to define their structural and functional components, and to establish their fundamental differences from traditional control systems. The authors applied system analysis, comparative technical evaluation, structural modeling, and generalization of contemporary scientific approaches to electromechanical drive intellectualization.

The findings demonstrate that smart electromechanical systems integrate sensor subsystems, embedded microprocessor devices, adaptive control algorithms, and big data processing tools. Classical electromechanical systems rely on fixed control algorithms, lack self-diagnostic capabilities, and cannot adapt to changing loads. In contrast, smart electromechanical systems incorporate adaptive control, sensor feedback, self-diagnostics, predictive maintenance, and autonomous optimization of operating modes. The study examines the architectural principles for constructing such systems within cyber-physical production complexes, particularly in the context of the Industrial Internet of Things and networked equipment interaction.

The results confirm that implementing smart electromechanical systems enhances the reliability, flexibility, and energy efficiency of production processes, reduces operating costs, and ensures seamless integration of technological equipment into unified digital management platforms. The authors conclude that the advancement of intelligent electromechanical systems represents a strategic direction in modern engineering and forms the technological foundation for next-generation cyber-physical systems.

Keywords: *electromechanical systems, electric motors, electric drives, energy efficiency, Industry 4.0, drive intellectualization, adaptive control, Industrial Internet of Things.*

Дата першого надходження статті до видання: 23.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 22.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026