УДК 621.313:004.94
DOI https://doi.org/10.15589/znp2026.3(506).15

DEVELOPMENT OF A DIGITAL TWIN CONCEPT FOR AN ELEVATOR ELECTRIC DRIVE BASED ON THE ARIMAX STOCHASTIC MODEL

РОЗРОБКА КОНЦЕПЦІЇ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА ЕЛЕКТРОПРИВОДА ЛІФТА НА ОСНОВІ СТОХАСТИЧНОЇ МОДЕЛІ ARIMAX

Stefan V. Zaichenko
zstefv@gmail.com
ORCID: 0000-0002-8446-5408

Yevhen O. Filatov
filatov.eugene@gmail.com
ORCID: 0009-0000-6822-5888

С. В. Зайченко,
докт. техн. наук, професор

Є. О. Філатов,
аспірант

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ

Abstract. *Objective*. To develop a concept for a digital twin of an elevator system's electric drive that combines physical models, stochastic forecasting methods, and sensor data streams to reproduce the system's dynamic operating modes in real time. *Methodology*. The study involved the analysis and generalization of approaches to technical diagnostics and the construction of digital twins, mathematical modeling of electromagnetic and mechanical processes in an asynchronous motor, and structural modeling of the system architecture. In addition, stochastic modeling and analysis of the corresponding time series were performed. To enable the description of degradation, physical-statistical and stochastic models were considered. *Results*. A mathematical model of an asynchronous electric drive in a rotating coordinate system was proposed, which describes acceleration, deceleration, and load change modes. In addition, the main malfunctions, monitored parameters, and methods of vibration, temperature, electrical, and spectral diagnostics were summarized. To predict the technical condition, the use of the ARIMAX model was justified, taking into account phase currents, temperature, speed, and electromagnetic torque. Within the scope of this study, a multilevel structure of a digital twin is proposed, comprising physical and sensor levels, peripheral processing, a time-series repository, an analytical core, and visualization tools. *Scientific novelty*. A concept for a hybrid digital twin of an elevator electric drive has been developed, combining mathematical models of electromechanical processes, degradation modeling, stochastic forecasting, and real-time analysis of sensor data. The proposed approach ensures comprehensive consideration of the system's electrical, mechanical, and temperature parameters. *Practical significance*. The proposed structure can be used to create a condition-based maintenance system for elevator equipment, enable early detection of degradation changes, predict remaining service life, and generate maintenance alerts. The results obtained are primarily aimed at practical applications.
Key words: technical condition; remaining service life; electromechanical system; stochastic forecasting; sensor data; condition-based maintenance.

Анотація. *Мета* – розроблення концепції цифрового двійника електропривода ліфтової установки, що поєднує фізичні моделі, стохастичні методи прогнозування та потоки сенсорних даних для відтворення динамічних режимів роботи системи в реальному часі. *Методика*. Застосовано аналіз та узагальнення підходів щодо технічного діагностування та побудови цифрових двійників, математичне моделювання електромагнітних, а також механічних процесів асинхронного двигуна, структурне моделювання архітектури системи. Крім того проведене стохастичне моделювання й аналіз відповідних часових рядів. Для можливості проведення опису деградації розглянуто фізико-статистичні та стохастичні моделі. *Результати*. Запропоновано математичну модель асинхронного електропривода в обертовій системі координат, яка описує режими розгону, гальмування та зміни навантаження. Крім того, було узагальнено й основні несправності, контрольовані параметри та методи вібраційного, температурного, електричного і спектрального діагностування. Для здійснення прогнозування технічного стану обґрунтовано застосування моделі ARIMAX з урахуванням фазних струмів, температури, швидкості та електромагнітного моменту. У межах проведеного дослідження запропоновано багаторівневу структуру цифрового двійника, що включає фізичний і сенсорний рівні, периферійну обробку, сховище часо-

вих рядів, аналітичне ядро та засоби візуалізації. *Наукова новизна*. Розроблено концепцію гібридного цифрового двійника ліфтового електропривода, яка поєднує математичні моделі електромеханічних процесів, опис деградації, стохастичне прогнозування та аналіз сенсорних даних у реальному часі. Запропонований підхід забезпечує комплексне врахування електричних, механічних і температурних параметрів системи. *Практична значимість*. запропонована структура може бути використана для створення системи обслуговування ліфтового обладнання за фактичним станом, раннього виявлення деградаційних змін, прогнозування залишкового ресурсу та формування сервісних попереджень. Отримані результати направлені, насамперед на практичну площину застосування.

Ключові слова: технічний стан; залишковий ресурс; електромеханічна система; стохастичне прогнозування; сенсорні дані; обслуговування за фактичним станом.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Основою для сучасного існування технічного об'єкта слід визначити його показники надійності, які й визначаються шляхом проведення певних діагностичних процедур [1–3]. Особливої уваги потребує підйомно-транспортне обладнання, як-от ліфти. Навіть враховуючи той факт, що сучасні засоби контролю дають змогу оцінювати поточний стан ліфтового обладнання, слід зважати, що для реалізації обслуговування за фактичним станом необхідне також прогнозування розвитку несправностей і залишкового ресурсу. Це зумовлює практичну необхідність у комплексному врахуванні електричних, механічних, а також температурних параметрів роботи ліфтового електропривода. У зв'язку з вищевказаним актуальним видається створення цифрового двійника ліфтової установки, що поєднує математичне моделювання, сенсорні дані та стохастичні методи прогнозування.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Теоретично-доктринальна площина у визначеному напрямі наукової діяльності є доволі обширною та враховує ряд практичних особливостей. Зокрема, вагомою видається праця Ван, Чень, Сяо та ін. [4], які запропонували цифровий двійник із використанням технології PINN та графових нейронних мереж для аналізу вібрації й діагностування дефектів ліфтового обладнання. Разом з тим, у роботі недостатньо висвітлено стохастичне моделювання деградації та прогнозування залишкового ресурсу. У свою чергу, Є та ін. [5] використали цифровий двійник для генерування синтетичних даних і моніторингу аномальної вібрації на основі згорткової нейронної мережі. Тим не менш, у визначеному дослідженні не розглянуто прогнозування подальшої зміни технічного стану обладнання. Натомість, Гічане та ін. [6] розробили уніфіковану систему моніторингу й керування ліфтом із використанням комп'ютерного зору, програмованого логічного контролера та протоколу OPC UA, однак, на жаль, не передбачили моделювання деградації та прогнозування технічного стану. Гангсар і Тіварі [8] же систематизували методи діагностування асинхронних двигунів за вібраційними та струмовими сигналами, що обґрунтовує їх спільне використання в цифровому двійнику ліфтового електропривода. Лей та ін. [10] визначили основні етапи прогнозування технічного стану: збір даних, формування індикатора стану, поділ процесу деградації на стадії та прогнозування залишкового ресурсу. Врешті, Фалекас і Карліс [12] обґрунтували доцільність поєднання фізичних моделей, сенсорних даних і методів прогнозного обслуговування в цифрових двійниках електричних машин.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Проведений аналіз сучасних публікацій демонструє, що в більшості робіт переважають моделі, які не враховують процеси деградації електромеханічних компонентів. Крім того, видається, що недостатньо дослідженими залишаються питання ймовірнісного оцінювання надійності, прогнозування технічного стану та залишкового ресурсу, а також урахування стохастичного характеру навантажень, вібраційних впливів і термічного старіння ізоляції. Відсутні комплексні рішення, які поєднують роботу цифрового двійника в реальному часі з прогнозуванням зносу механічних та електричних компонентів ліфтової установки.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у висвітлені структури цифрового двійника електропривода, що поєднує математичні моделі електромагнітних і механічних процесів із потоками експериментальних даних у режимі реального часу.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою дослідження є розроблення концепції цифрового двійника електропривода ліфта, здатного відтворювати динамічні режими роботи електромеханічного об'єкта в реальному часі шляхом інтеграції фізичних моделей, стохастичних методів і потоків сенсорних даних.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

У межах дослідження було використано методи аналізу та узагальнення наукових підходів щодо технічного діагностування та подальшої побудови цифрових двійників; математичного моделювання електромеханічних процесів; структурного моделювання архітектури цифрового двійника; стохастичного моделювання та аналізу часових рядів для

обгрунтування застосування моделі ARIMAX. Об'єкт дослідження – електромеханічні процеси функціонування та деградації в системі електропривода підйомного механізму ліфта. Предмет дослідження – методи, моделі та алгоритми оцінювання й прогнозування деградаційних процесів і зносу електродвигуна та підйомного механізму ліфта, реалізовані в структурі цифрового двійника електромеханічної системи.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Для реалізації цифрового двійника ліфтової установки необхідним є створення математичної моделі електромеханічного об'єкта, здатної відтворювати електромагнітні та механічні процеси в реальному масштабі часу. Як базову модель електропривода доцільно використовувати модель асинхронного двигуна в обертовій системі координат dq, оскільки вона забезпечує адекватний опис динамічних режимів роботи, перехідних процесів, а також змін параметрів при виникненні дефектів.

Модель електропривода будується на основі рівнянь напруг статора та ротора, рівнянь потокозчеплення, електромагнітного моменту та механічного руху ротора [7].

Рівняння електричної рівноваги статора в координатах dq мають вигляд:

$$u_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\psi_{sd}}{dt} - \omega_e \psi_{sq}; \quad (1)$$

$$u_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\psi_{sq}}{dt} + \omega_e \psi_{sd}, \quad (2)$$

де u_{sd}, u_{sq} – це проєкції напруг статора;

R_s – це активний опір обмотки статора;

i_{sd}, i_{sq} – це складові струму статора;

ψ_{sd}, ψ_{sq} – потокозчеплення статора;

ω_e – це кутова швидкість обертової системи координат.

Для короткозамкненого ротора рівняння мають вигляд:

$$0 = R_r i_{rd} + \frac{d\psi_{rd}}{dt} - (\omega_e - \omega_r)\psi_{rq}; \quad (3)$$

$$0 = R_r i_{rq} + \frac{d\psi_{rq}}{dt} + (\omega_e - \omega_r)\psi_{rd}, \quad (4)$$

де R_r – це активний опір ротора;

i_{rd}, i_{rq} – це складові струму ротора;

ψ_{rd}, ψ_{rq} – це потокозчеплення ротора;

ω_r – це механічна кутова швидкість ротора. Потокозчеплення визначаються через індуктивні параметри електродвигуна:

$$\begin{aligned} \psi_{sd} &= L_s i_{sd} + L_m i_{rd}; \\ \psi_{sq} &= L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \\ \psi_{rd} &= L_r i_{rd} + L_m i_{sd} \\ \psi_{rq} &= L_r i_{rq} + L_m i_{sq}, \end{aligned} \quad (5)$$

де L_s, L_r – індуктивності статора та ротора;

L_m – взаємна індуктивність. Електромагнітний момент асинхронного двигуна визначається виразом:

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

де p – це число пар полюсів;

M_e – це електромагнітний момент.

Механічна частина електропривода описується рівнянням руху:

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = M_e - M_L - B\omega_r, \quad (7)$$

де J – це момент інерції системи;

M_L – це момент навантаження;

B – це коефіцієнт механічного тертя.

Запропонована математична модель дозволяє описувати динамічні режими роботи ліфтового електропривода, зокрема процеси розгону, гальмування та зміну навантаження. Крім того, модель забезпечує можливість дослідження впливу деградаційних процесів на електромагнітні параметри системи. Зокрема, дефекти підшипників, міжвиткові замикання та ексцентриситет ротора можуть бути представлені у вигляді параметричних збурень опорів, індуктивностей або моменту навантаження.

Сучасні електроприводи є складними електромеханічними системами, надійність та ефективність функціонування яких значною мірою визначається можливістю своєчасного виявлення дефектів. У зв'язку з цим особливого значення набувають методи технічного діагностування, що дозволяють оцінювати поточний стан обладнання без його зупинки та демонтажу. У таблиці 1 розглянуто типові несправності та їх діагностичні ознаки для ліфтового підйомника.

Одним із найбільш поширених підходів є вібраційна діагностика, яка базується на аналізі параметрів вібрації, що виникають під час роботи електропривода [8]. До таких параметрів належать амплітуда, частота та фаза вібраційного сигналу. Даний метод дозволяє ефективно виявляти механічні дефекти, зокрема дисбаланс, неспіввісність валів, знос підшипників та ослаблення кріплень, на ранніх стадіях їх розвитку. До основних методів вібраційної діагностики належать аналіз часових сигналів, спектральний аналіз та аналіз огинаючої [9]. Аналіз часових сигналів передбачає визначення середньоквадратичного значення вібрації для оцінки загального технічного стану. Спектральний аналіз, що реалізується за допомогою швидкого перетворення Фур'є, дозволяє розкласти сигнал на окремі частотні складові та ідентифікувати характерні частоти, пов'язані з конкретними дефектами. Аналіз огинаючої (метод високочастотного резонансу) є ефективним інструментом для раннього виявлення дефектів підшипників та зубчастих передач. Крім того, використання систем безперервного

Таблиця 1. Матриця відповідності несправностей та діагностичних ознак

Група несправностей	Типові дефекти	Контрольовані параметри	Методи діагностування
Підшипникові вузли та механічна передача	Дефекти кілець і тіл кочення, знос зубчастого зачеплення	Вібрація, температура, момент	Вібраційний і спектральний аналіз, аналіз огинаючої, тепловий контроль
Ротор і з'єднання валів	Незбалансованість, ексцентриситет, порушення центрування	Вібрація, фазні струми, швидкість	Вібраційний аналіз, аналіз сигнатури струму статора
Обмотки електродвигуна	Міжвиткові замикання, асиметрія фазних струмів	Фазні струми, температура	Електричне діагностування, аналіз сигнатури струму статора, тепловий контроль
Канатно-шківна та гальмівна системи	Знос канатів і шківів, несправності гальма	Швидкість, момент, вібрація, температура, струм котушки гальма	Аналіз швидкості й моменту, вібраційний і тепловий контроль
Частотний перетворювач	Деструкція роботи силових елементів і широтно-імпульсної модуляції	Фазні струми, напруга, швидкість	Гармонічний аналіз, оцінювання коефіцієнта гармонічних спотворень

моніторингу вібрації забезпечує можливість своєчасного попередження аварійних ситуацій.Серед переваг вібраційної діагностики слід відзначити можливість раннього виявлення несправностей, безрозбірний характер контролю, а також високу точність локалізації дефектів [10]. У зв'язку з цим вона є важливою складовою систем технічного обслуговування за фактичним станом.

Іншим важливим напрямком є температурна діагностика, яка базується на аналізі теплового стану електропривода [11]. Контроль температури основних вузлів, таких як обмотки статора, підшипники та корпус, дозволяє виявляти перегріви, що є індикаторами наявності дефектів. До таких дефектів належать міжвиткові замикання, порушення умов охолодження, перевантаження та механічні пошкодження. Основними методами температурної діагностики є тепловізійний контроль, контактні вимірювання температури та аналіз теплового балансу [12]. Тепловізійний контроль дозволяє формувати температурні карти об'єкта та виявляти локальні перегріви. Контактні методи базуються на використанні термопар, терморезисторів або пірометрів для безперервного контролю температури окремих вузлів. Аналіз теплового балансу передбачає порівняння фактичних температур з нормативними значеннями при заданому навантаженні. Температурна діагностика дозволяє виявляти як електричні (міжвиткові замикання, обриви обмоток), так і механічні (знос підшипників, дисбаланс) та вентиляційні дефекти. Вона характеризується відносною простотою реалізації та невисокою вартістю, що робить її ефективним інструментом для практичного застосування.

Електричні методи діагностування ґрунтуються на аналізі параметрів електричної енергії, що споживається електроприводом [13]. До основних діагностичних параметрів належать струми, напруги, опір ізоляції, пускові характеристики та споживана потужність. Контроль стану ізоляції дозволяє запобігати електричним пробоям, тоді як аналіз струмів і напруг забезпечує виявлення асиметрії фаз, перевантажень та обривів. Особливе місце займає аналіз пускових режимів, який дозволяє ідентифікувати механічні несправності, зокрема заклинювання ротора. Діагностика за споживаною потужністю дає змогу оцінити рівень навантаження та втрати в системі. Окремим напрямком є метод аналізу сигнатури струму (MCSA), який базується на спектральному аналізі струму статора та дозволяє виявляти дефекти ротора та ексцентриситет.

Спектральний метод діагностування є одним із найбільш інформативних підходів, що передбачає аналіз частотного складу сигналів (струму, напруги або вібрації) за допомогою перетворення Фур'є [14]. Його принцип дії полягає у переході від часової області до частотної, де дефекти проявляються у вигляді характерних гармонік. Найчастіше аналізу піддається струм статора, що дозволяє реалізувати метод MCSA. Застосування спектрального аналізу забезпечує можливість виявлення як електричних дефектів (обрив стрижнів ротора, міжвиткові замикання), так і механічних (ексцентриситет, дефекти підшипників). Перевагами методу є висока точність, можливість дистанційного моніторингу та проведення діагностики без зупинки виробничого процесу. Водночас його використання пов'язане зі складністю обробки великих обсягів даних та інтерпретації результатів при наявності комплексних дефектів.

Таким чином, комплексне застосування вібраційних, температурних, електричних та спектральних методів діагностування дозволяє забезпечити ефективний моніторинг технічного стану електроприводів і своєчасне виявлення дефектів на ранніх стадіях їх розвитку, що є основою для реалізації концепції обслуговування за фактичним станом.

Прогнозування технічного стану електроприводів (ЕП) є важливим елементом сучасних систем технічного обслуговування за фактичним станом [15].

Основою такого прогнозування є аналіз процесів деградації, що відбуваються в елементах електромеханічних систем під впливом електромагнітних, термічних та механічних навантажень. Деградація визначається як незворотна зміна параметрів об'єкта, що призводить до зниження його функціональних характеристик і, в кінцевому підсумку, до відмови.

Фізико-статистичні моделі (Physics-of-Failure) базуються на описі фізичних механізмів руйнування матеріалів і компонентів електропривод [16]. Вони дозволяють встановити причинно-наслідкові зв'язки між навантаженнями та процесами деградації.

Процеси старіння ізоляції електричних машин описуються законом Арреніуса [17]:

$$k = A\exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right), \tag{8}$$

де k – це швидкість деградації;

A – це передекспоненційний множник;

E_a – це енергія активації;

R – це універсальна газова стала;

T – це абсолютна температура. Згідно з цією залежністю, навіть незначне підвищення температури призводить до експоненціального прискорення старіння ізоляції, що суттєво зменшує ресурс електродвигуна.

Деградація силових модулів (IGBT, SiC) обумовлена циклічними температурними навантаженнями. Для її опису застосовується модель Коффіна–Менсона:

$$N_f = C(\Delta T)^{-m}, \tag{9}$$

де N_f – це кількість циклів до відмови;

ΔT – це амплітуда температурних коливань;

C, m – це емпіричні коефіцієнти. Модель показує, що збільшення амплітуди температурних циклів призводить до різкого зниження довговічності напівпровідникових елементів.

Ресурс підшипників кочення оцінюється за моделлю Лундберга–Палмгрена:

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^p, \tag{10}$$

де L_{10} – це номінальний ресурс;

C – це динамічна вантажопідйомність;

P – це еквівалентне навантаження;

p – це показник ступеня. У реальних умовах експлуатації процеси деградації часто мають випадковий характер. Для їх опису використовуються стохастичні моделі, які дозволяють враховувати невизначеність та варіативність навантажень.

Для моделювання немонотонної деградації застосовується вінерівський процес:

$$X(t) = X_0 + \mu t + \sigma W(t), \tag{11}$$

де $X(t)$ – це стан системи;

μ – це середня швидкість деградації;

σ – це інтенсивність випадкових флуктуацій;

$W(t)$ – це стандартний вінерівський процес. Для опису монотонного накопичення пошкоджень використовується гамма-процес:

$$\boldsymbol{X(t)} \sim \Gamma(\alpha \boldsymbol{t}, \beta), \tag{12}$$

де α, β – це параметри розподілу. Цей підхід застосовується для моделювання процесів зносу, таких як ерозія контактів або деградація ізоляційних матеріалів.

Марковські моделі дозволяють представити електропривод як систему дискретних станів (справний, деградований, передаварійний, відмова). Динаміка переходів описується рівнянням:

$$\frac{\boldsymbol{d}}{\boldsymbol{dt}}\boldsymbol{P}(\boldsymbol{t}) = \boldsymbol{P}(\boldsymbol{t})\boldsymbol{Q}, \tag{13}$$

де $\boldsymbol{P}(t)$ – це вектор ймовірностей станів;

$\boldsymbol{Q}$ – це матриця інтенсивностей переходів. Такі моделі дозволяють оцінювати ймовірність відмови та прогнозувати залишковий ресурс.

На практиці прогнозування технічного стану електроприводів базується на комплексному поєднанні фізичних і стохастичних моделей деградації з алгоритмами обробки даних. Основний процес включає чотири взаємопов'язані етапи: збір первинних діагностичних сигналів (вібрація, струм, температура та інші параметри), виділення інформативних ознак (спектральні, часо-частотні та статистичні характеристики), ідентифікацію параметрів моделей деградації та безпосереднє прогнозування залишкового корисного ресурсу (Remaining Useful Life, RUL).

Для прогнозування технічного стану, виявлення аномалій та оцінки залишкового ресурсу в цифровому двійнику ліфта широко застосовуються стохастичні (часові) моделі. Вони дозволяють описувати випадкові складові сигналів (вібрація, струм, момент, температура), які не вдається повністю пояснити детермінованою фізико-математичною моделлю. Авторегресійна модель порядку AR описує поточне значення сигналу як лінійну комбінацію його попередніх значень плюс білий шум:

$$y_t = c + \sum_{i=1}^{p} \varphi_i y_{t-i} + \varepsilon_t, \tag{14}$$

де φ_i – це коефіцієнти авторегресії;

c – це константа;

ε_t – це білий шум. Застосування в цифровому двійнику ліфта: Модель AR добре працює для прогнозування вібрації на стабільних режимах (постійна швидкість).

Модель ковзного середнього порядку (MA(q)) виражає поточне значення через попередні значення випадкової складової:

$$\boldsymbol{y_t} = \boldsymbol{c} + \varepsilon_t + \sum_{j=1}^{q} \theta_j \varepsilon_{t-j}. \tag{15}$$

Застосування: Використовується для моделювання короткочасних шумових впливів (удари, перехідні процеси при старті ліфта). У поєднанні з AR утворює модель ARMA. Комбінована модель ARMA (p,q) поєднує обидва підходи:

$$y_t = c + \sum_{i=1}^{p} \varphi_i y_{t-i} + \varepsilon_t + \sum_{j=1}^{q} \theta_j \varepsilon_{t-j}. \quad (16)$$

Більшість реальних сигналів ліфта (особливо вібрація та струм) є нестаціонарними. Модель ARIMA(p, d, q) нівелює цю проблему за допомогою диференціювання порядку d:

$$(1-B)^d y_t = c + \sum_{i=1}^{p} \varphi_i (1-B)^d y_{t-i} + \varepsilon_t + \sum_{j=1}^{q} \theta_j \varepsilon_{t-j}, \quad (17)$$

де B – це оператор зсуву назад.

Найперспективнішою для цифрового двійника ліфта є модель ARIMAX(p, d, q) (ARIMA з екзогенними регресорами):

$$(1-B)^d y_t = c + \sum_{i=1}^{p} \varphi_i (1-B)^d y_{t-i} + \sum_{j=1}^{q} \theta_j \varepsilon_{t-j} + \sum_{k=1}^{m} \beta_k x_{k,ij}, \quad (18)$$

де $x_{k,t}$ – цеекзогенні змінні (наприклад, фазний струм, швидкість, момент навантаження, температура).

Модель ARIMAX(p,d,q) є найбільш перспективною для моделювання діагностичних сигналів ліфтових електроприводів завдяки можливості врахування екзогенних впливів. Вона дозволяє кількісно оцінювати вплив фазних струмів та електромагнітного моменту на рівень вібрації, що є критично важливим для точного прогнозування технічного стану системи. Крім того, ARIMAX забезпечує суттєве підвищення точності прогнозування в перехідних режимах роботи ліфта – розгоні, гальмуванні та зміні навантаження. Урахування зовнішніх регресорів створює передумови для підвищення точності прогнозування в перехідних режимах, однак кількісне оцінювання ефективності моделі зумовлює потребує у проведенні подальшої експериментальної перевірки.

Виходячи з усього вищезгаданого пропонується система цифрового двійника ліфтового електромеханічного комплексу,що реалізована як багаторівнева кіберфізична структура, що охоплює фізичний об'єкт, сенсорний рівень, периферійну обробку даних, сховище часових рядів, аналітичне ядро та інтерфейс візуалізації. На рис. 1 зображена структура цифрового двійника.

На фізичному рівні розташовано об'єкт моделювання – ліфтову установку, яка включає електропривід, редуктор, кабіну, канатну систему та інші механічні елементи. Даний рівень є джерелом первинних експлуатаційних параметрів та предметом моніторингу технічного стану. На сенсорному рівні здійснюється збір телеметричної інформації за допомогою комплексу датчиків, що включає інерціальні вимірювальні модулі (IMU), температурні сенсори, датчики струму, тахометричні та позиційні сенсори. Отримані сигнали характеризують динамічні, теплові та електричні параметри функціонування системи. На рівні периферійної обробки (Edge Layer) використовується локальний контролер, реалізований на базі мікроконтролерних або промислових платформ (ESP32, PLC), який виконує попередню фільтрацію, нормалізацію, агрегацію та буферизацію даних перед їх передачею до центрального сховища. На рівні зберігання даних застосовується база часових рядів типу InfluxDB, оптимізована для високочастотного запису телеметричних даних та забезпечення швидкого доступу до історичних часових послідовностей для подальшого аналізу. Аналітичне ядро цифрового двійника включає два основні модулі.

Перший модуль реалізує стохастичну оцінку прихованого технічного стану системи за допомогою фільтра Калмана, що дозволяє відновлювати ненаблюдувані змінні стану на основі зашумлених сенсорних вимірювань. Для програмної реалізації модуля оцінювання стану запропоновано використовувати засоби Python і бібліотеку NumPy. Другий модуль забезпечує прогнозування деградаційних процесів на основі моделі ARIMAX, яка враховує як авторегресійні властивості часових рядів, так і вплив зовнішніх екзогенних факторів. Для програмної реалізації прогнозного модуля передбачено використання бібліотеки statsmodels. На рівні користувацького інтерфейсу застосовується панель моніторингу Grafana, що забезпечує візуалізацію поточних значень параметрів,



Рис. 1. Структурна схема цифрового двійника

індикаторів технічного стану, прогнозів залишкового ресурсу (RUL), а також генерацію аварійних попереджень і сервісних сповіщень.

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Запропонована у межах проведеного дослідження концепція цифрового двійника розширює підходи, що наразі представлені в попередніх дослідженнях ліфтових систем. Крім того, на відміну від моделей, орієнтованих переважно на аналіз вібрації, генерування синтетичних даних або моніторинг і керування обладнанням [4–6], розроблена структура передбачає комплексне врахування електричних, механічних і температурних параметрів. Видається, що це зумовлює можливість органічно поєднати діагностування поточного стану електропривода з моделюванням деградаційних процесів і прогнозуванням їх подальшого розвитку.

У свою чергу, інтеграція вібраційних і струмових сигналів узгоджується з підходом Гангсара і Тіварі [8], відповідно до якого поєднання різних діагностичних сигналів підвищує інформативність оцінювання стану асинхронного двигуна. Разом з тим, окреслена у дослідженні послідовність збору сенсорних даних, формування діагностичних ознак та прогнозування залишкового ресурсу відповідає загальній структурі прогнозування технічного стану, визначеній Леєм та ін. [10]. Врешті, послідовна інтеграція фізичної моделі електропривода, сенсорних даних і прогнозного модуля також розвиває положення Фалекаса і Карліса [12] щодо застосування цифрових двійників у прогнозному технічному обслуговуванні електричних машин.

Відмінною та фактично ключовою особливістю запропонованої концепції є включення до аналітичного ядра моделі ARIMAX, яка враховує не лише попередні значення діагностичного сигналу, а й вплив екзогенних змінних, зокрема фазного струму, температури, швидкості та електромагнітного моменту. Це створює передумови для врахування перехідних режимів роботи ліфта та стохастичного характеру навантаження. Водночас результати дослідження мають концептуально-модельний характер, тому точність прогнозування та ефективність запропонованої архітектури потребують подальшої експериментальної перевірки на реальних сенсорних даних.

ВИСНОВКИ

На основі проведеного дослідження розроблено концепцію гібридного цифрового двійника для прогнозування несправностей ліфтів. У роботі проведено аналіз сучасних підходів до побудови цифрових двійників електромеханічних систем ліфтових установок та встановлено, що більшість існуючих рішень орієнтовані переважно на моніторинг або окремі методи діагностики без урахування процесів деградації, прогнозування залишкового ресурсу та стохастичного оцінювання надійності. На основі проведеного аналізу запропоновано структуру цифрового двійника електропривода ліфта, яка поєднує математичні моделі електромагнітних і механічних процесів із потоками експериментальних даних у режимі реального часу.

Розроблена математична модель асинхронного електропривода в координатах dq дозволяє адекватно описувати динамічні режими роботи ліфтової установки, а також враховувати вплив деградаційних процесів і типових дефектів електромеханічної системи. Сформовано матрицю відповідності несправностей та діагностичних ознак, що забезпечує комплексне використання вібраційних, температурних, електричних і спектральних методів діагностування.

У роботі розглянуто фізико-статистичні та стохастичні моделі деградації, зокрема моделі Арреніуса, Коффіна–Менсона, Лундберга–Палмгрена, вінерівські, гамма- та марковські процеси, які дозволяють оцінювати технічний стан та прогнозувати залишковий ресурс електропривода. Для можливості проведення прогнозу часових рядів діагностичних параметрів обґрунтовано доцільність застосування моделі ARIMAX, яка дає змогу враховувати вплив екзогенних параметрів у перехідних режимах роботи ліфта. Причому, кількісне оцінювання точності моделі потребує подальшої перевірки на реальних сенсорних даних.фта.

Запропонована архітектура цифрового двійника представлено як багаторівнева кіберфізична система, що включає сенсорний рівень, периферійну обробку даних, сховище часових рядів, модулі оцінювання стану та прогнозування деградації, а також засоби візуалізації й моніторингу.

ДЕКЛАРАЦІЯ ПРО ВИКОРИСТАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

Під час підготовки рукопису використовувався інструмент штучного інтелекту ChatGPT (модель GPT-5.6 Sol, OpenAI) виключно для мовного редагування тексту. Штучний інтелект не застосовувався для формування наукових результатів, проведення розрахунків, аналізу даних, формулювання висновків або створення наукового змісту дослідження. Відповідальність за зміст, достовірність і наукову обґрунтованість матеріалу повністю несуть автори.

REFERENCES

[1] Zaichenko, S., Kulish, R., Derevyanko, D., & Zhukova, N. (2020). Justification of diagnostic parameters of autonomous electric power sources based on an internal combustion engine in the development of a technical diagnostics system. *Energy: Economics, Technology, Ecology*, (3), 29–34. https://doi.org/10.20535/1813-5420.3.2020.228607

[2] Zaichenko, S., & Kulish, R. (2021). Reduction of the degree of uncertainty in the technical condition of an autonomous power source. In *Applied Scientific and Technical Research: Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference, April 5–7, 2021* (Vol. 1, pp. 175–178). Academy of Technical Sciences of Ukraine.

[3] Zaichenko, S., Erçetin, Ü., Kulish, R., Derevyanko, D., & Shalenko, V. (2021). Determination of diagnostic parameters of power plants based on internal combustion engines. *Mining Revue, 27*(3), 86–92. https://doi.org/10.2478/minrv-2021-0028

[4] Wang, Q., Chen, L., Xiao, G., Wang, P., Gu, Y., & Lu, J. (2024). Elevator fault diagnosis based on digital twin and PINNs-e-RGCN. *Scientific Reports, 14*, 30713. https://doi.org/10.1038/s41598-024-78784-7

[5] Ye, W., Zhao, X., Wang, Y., Chen, H., & Lin, L. (2025). Digital twin-assisted online monitoring of elevator abnormal vibration using improved ShuffleNetV2 and domain adaptation. *IEEE Access, 13*, 46897–46908. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3550880

[6] Gichane, M. M., Byiringiro, J. B., Chesang, A. K., Nyaga, P. M., Langat, R. K., Smajic, H., & Kiiru, C. W. (2020). Digital triplet approach for real-time monitoring and control of an elevator security system. *Designs, 4*(2), 9. https://doi.org/10.3390/designs4020009

[7] Krause, P. C., Wasynczuk, O., Sudhoff, S. D., & Pekarek, S. (2013). *Analysis of electric machinery and drive systems* (3rd ed.). Wiley-IEEE Press. https://doi.org/10.1002/9781118524336

[8] Gangsar, P., & Tiwari, R. (2020). Signal based condition monitoring techniques for fault detection and diagnosis of induction motors: A state-of-the-art review. *Mechanical Systems and Signal Processing, 144*, 106908. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.106908

[9] Henao, H., Capolino, G.-A., Fernandez-Cabanas, M., Filippetti, F., Bruzzese, C., Strangas, E., Pusca, R., Estima, J., Riera-Guasp, M., & Hedayati-Kia, S. (2014). Trends in fault diagnosis for electrical machines: A review of diagnostic techniques. *IEEE Industrial Electronics Magazine, 8*(2), 31–42. https://doi.org/10.1109/MIE.2013.2287651

[10] Lei, Y., Li, N., Guo, L., Li, N., Yan, T., & Lin, J. (2018). Machinery health prognostics: A systematic review from data acquisition to RUL prediction. *Mechanical Systems and Signal Processing, 104*, 799–834. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.11.016

[11] Glowacz, A., & Glowacz, Z. (2016). Diagnostics of stator faults of the single-phase induction motor using thermal images, MoASoS and selected classifiers. *Measurement, 93*, 86–93. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.07.008

[12] Falekas, G., & Karlis, A. (2021). Digital twin in electrical machine control and predictive maintenance: State-of-the-art and future prospects. *Energies, 14*(18), 5933. https://doi.org/10.3390/en14185933

[13] Benbouzid, M. E. H. (2000). A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection. *IEEE Transactions on Industrial Electronics, 47*(5), 984–993. https://doi.org/10.1109/41.873206

[14] Thomson, W. T., & Fenger, M. (2001). Current signature analysis to detect induction motor faults. *IEEE Industry Applications Magazine, 7*(4), 26–34. https://doi.org/10.1109/2943.930988

[15] Lee, J., Wu, F., Zhao, W., Ghaffari, M., Liao, L., & Siegel, D. (2014). Prognostics and health management design for rotary machinery systems-Reviews, methodology and applications. *Mechanical Systems and Signal Processing, 42*(1–2), 314–334. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2013.06.004

[16] Pecht, M. G., & Kang, M. (Eds.). (2018). *Prognostics and health management of electronics: Fundamentals, machine learning, and the Internet of Things*. Wiley. https://doi.org/10.1002/9781119515326

[17] Zhang, J., Wang, J., Li, H., Zhang, Q., He, X., Meng, C., Huang, X., Fang, Y., & Wu, J. (2025). A review of reliability assessment and lifetime prediction methods for electrical machine insulation under thermal aging. *Energies, 18*(3), 576. https://doi.org/10.3390/en18030576

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] Зайченко, С. В., Куліш, Р. Д., Дерев'янко, Д. Г., Жукова, Н. І. (2020) Обґрунтування діагностичних параметрів автономних джерел електричної енергії на базі двигуна внутрішнього згоряння при розробці системи технічного діагностування. Енергетика: економіка, технології, екологія. № 3. С. 29–34. DOI: 10.20535/1813-5420.3.2020.228607

[2] Зайченко, С. В., Куліш, Р. Д. (2021) Зменшення ступеня невизначеності технічного стану автономного джерела живлення. Прикладні науково-технічні дослідження : матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції, 5–7 квітня 2021 р. Івано-Франківськ : Академія технічних наук України. Т. 1. С. 175–178.

[3] Zaichenko, S., Erçetin, Ü., Kulish, R., Derevyanko, D., Shalenko, V. (2021) Determination of diagnostic parameters of power plants based on internal combustion engines. Mining Revue. Vol. 27(3). P. 86–92. DOI: 10.2478/minrv-2021-0028

[4] Wang, Q., Chen, L., Xiao, G., Wang, P., Gu, Y., Lu, J. (2024) Elevator fault diagnosis based on digital twin and PINNs-e-RGCN. Scientific Reports. Vol. 14. 30713. DOI: 10.1038/s41598-024-78784-7

[5] Ye, W., Zhao, X., Wang, Y., Chen, H., Lin, L. (2025) Digital twin-assisted online monitoring of elevator abnormal vibration using improved ShuffleNetV2 and domain adaptation. IEEE Access. Vol. 13. P. 46897–46908. DOI: 10.1109/ACCESS.2025.3550880

[6] Gichane, M. M., Byiringiro, J. B., Chesang, A. K., Nyaga, P. M., Langat, R. K., Smajic, H., Kiiru, C. W. (2020) Digital triplet approach for real-time monitoring and control of an elevator security system. Designs. Vol. 4(2). 9. DOI: 10.3390/designs4020009

[7] Krause, P. C., Wasynczuk, O., Sudhoff, S. D., Pekarek, S. (2013) Analysis of Electric Machinery and Drive Systems. 3rd Edition. Wiley-IEEE Press. DOI: 10.1002/9781118524336

[8] Gangsar, P., Tiwari, R. (2020) Signal based condition monitoring techniques for fault detection and diagnosis of induction motors: A state-of-the-art review. Mechanical Systems and Signal Processing. Vol. 144. 106908. DOI: 10.1016/j.ymssp.2020.106908

[9] Henao, H., Capolino, G.-A., Fernandez-Cabanas, M., Filippetti, F., Bruzzese, C., Strangas, E., Pusca, R., Estima, J., Riera-Guasp, M., Hedayati-Kia, S. (2014) Trends in fault diagnosis for electrical machines: A review of diagnostic techniques. IEEE Industrial Electronics Magazine. Vol. 8(2). P. 31–42. DOI: 10.1109/MIE.2013.2287651

[10] Lei, Y., Li, N., Guo, L., Li, N., Yan, T., Lin, J. (2018) Machinery health prognostics: A systematic review from data acquisition to RUL prediction. Mechanical Systems and Signal Processing. Vol. 104. P. 799–834. DOI: 10.1016/j.ymssp.2017.11.016

[11] Glowacz, A., Glowacz, Z. (2016) Diagnostics of stator faults of the single-phase induction motor using thermal images, MoASoS and selected classifiers. Measurement. Vol. 93. P. 86–93. DOI: 10.1016/j.measurement.2016.07.008

[12] Falekas, G., Karlis, A. (2021) Digital twin in electrical machine control and predictive maintenance: State-of-the-art and future prospects. Energies. Vol. 14(18). 5933. DOI: 10.3390/en14185933

[13] Benbouzid, M. E. H. (2000) A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection. IEEE Transactions on Industrial Electronics. Vol. 47(5). P. 984–993. DOI: 10.1109/41.873206

[14] Thomson, W. T., Fenger, M. (2001) Current signature analysis to detect induction motor faults. IEEE Industry Applications Magazine. Vol. 7(4). P. 26–34. DOI: 10.1109/2943.930988

[15] Lee, J., Wu, F., Zhao, W., Ghaffari, M., Liao, L., Siegel, D. (2014) Prognostics and health management design for rotary machinery systems – Reviews, methodology and applications. Mechanical Systems and Signal Processing. Vol. 42(1–2). P. 314–334. DOI: 10.1016/j.ymssp.2013.06.004

[16] Pecht, M. G., Kang, M. (eds.) (2018) Prognostics and Health Management of Electronics: Fundamentals, Machine Learning, and the Internet of Things. Wiley. DOI: 10.1002/9781119515326

[17] Zhang, J., Wang, J., Li, H., Zhang, Q., He, X., Meng, C., Huang, X., Fang, Y., Wu, J. (2025) A review of reliability assessment and lifetime prediction methods for electrical machine insulation under thermal aging. Energies. Vol. 18(3). 576. DOI: 10.3390/en18030576

© Зайченко С. В., Філатов Є. О.
Дата першого надходження статті до видання: 28.07.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 19.08.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 02.11.2026



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