

## ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ КОНТРОЛЬ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ПРОМИСЛОВИХ ОБ'ЄКТІВ НА БАЗІ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ

**Анотація.** У статті розглянуто підходи до створення системи контролю технічного стану промислових електроприводів на основі цифрового двійника, побудованого на математичній моделі асинхронного двигуна в координатах  $d-q$ . Показано можливість поєднання електромагнітної, теплової та вібраційної підсистем у єдиній структурі цифрового двійника для оцінки параметрів приводу в режимі, близькому до реального часу. Обґрунтовано вибір частоти оновлення даних 10–50 мс з урахуванням затримок у сенсорних каналах та обчислювальних процесах. Сформовано контур діагностики, що поєднує модельні дані та експериментальні сигнали з використанням методів спектрального аналізу та машинного навчання. Запропонований підхід може бути використаний для прогнозного контролю та підвищення надійності промислових електроприводів.

**Ключові слова:** цифровий двійник, електропривод,  $dq$ -модель, діагностика, прогнозне технічне обслуговування, вібраційний аналіз, теплова модель

**Вступ.** Сучасна промислова енергетика перебуває у фазі глибокої цифрової трансформації, що зумовлює інтеграцію технологій *Industrial Internet of Things (IIoT)*, штучного інтелекту та цифрових двійників у системи керування електротехнічними комплексами [1, 2].

Особливо актуальним є застосування таких технологій у системах електроприводів, які забезпечують до 60–70 % споживання електроенергії на промислових підприємствах.

Електроприводи виконують ключові функції у виробничих процесах металургії, гірничодобувної, хімічної та енергетичної галузей, а тому оптимізація їхньої роботи має значний вплив на загальну енергоефективність виробництва.

Традиційні системи керування електроприводами, навіть оснащені частотними перетворювачами, не забезпечують повного контролю технічного стану обладнання в реальному часі [3].

Відсутність механізмів прогнозування та аналітичної оцінки стану призводить до невиправданих зупинок, підвищених енергетичних втрат і скорочення ресурсу машин.

Упровадження цифрових двійників дає змогу реалізувати принципи *Predictive Maintenance* – прогнозного технічного обслуговування, при якому рішення базуються на аналізі цифрової копії фізичного об'єкта, що відтворює дефекти [4].

Цифровий двійник електропривода – це інтегрована модель, що поєднує математичний опис електромеханічних процесів, теплових і вібраційних характеристик із потоками експериментальних даних від датчиків струму, напруги, температури та прискорення [3].

Завдяки такій взаємодії створюється єдиний інформаційний простір між фізичним і віртуальним рівнями системи керування, який дозволяє аналізувати, прогнозувати й оптимізувати режими роботи електромеханічних комплексів.

Проблематика побудови ефективного цифрового двійника електропривода полягає у виборі адекватної математичної моделі, яка забезпечує компроміс між точністю відтворення процесів і можливістю функціонування в реальному часі.

Крім того, важливими є питання розроблення контурів діагностики з мінімальною затримкою обробки сигналів, а також інтеграції моделей різної фізичної природи (електромагнітної, теплової, механічної) у єдине програмне середовище.

Отже, актуальним завданням є створення цифрового двійника, здатного забезпечити інтеграцію фізичних та аналітичних моделей у режимі реального часу

**Постановка задачі.** Незважаючи на значний прогрес у розвитку систем автоматизованого керування електроприводами, актуальним залишається питання створення уніфікованої моделі цифрового двійника, здатної забезпечувати одночасно високу точність відтворення процесів, стабільність обчислень і можливість реалізації у режимі реального часу.

Складність завдання полягає у необхідності поєднання різнорідних фізичних процесів – електромагнітних, механічних, теплових та вібраційних — у межах єдиної математичної структури, що потребує балансування між обсягом обчислень і затримками сигналів.

Метою роботи є розроблення узагальненої архітектури цифрового двійника електропривода промислового об'єкта та обґрунтування вибору математичної моделі, придатної для використання в системах реального часу.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити такі завдання:

- виконати аналіз існуючих математичних моделей асинхронного двигуна та визначити критерії їхньої придатності для моделювання у режимі онлайн;
- розробити структурну схему цифрового двійника з урахуванням інформаційних потоків між фізичним, віртуальним і аналітичним рівнями;
- сформувавати контур діагностики та визначити часові характеристики його функціонування;
- провести аналіз чутливості моделі до зміни параметрів і нестационарних режимів;
- оцінити потенційні переваги застосування цифрових двійників у системах керування електроприводами.

Виконання зазначених завдань дозволить сформувавати комплексну основу для побудови цифрового двійника електропривода.

## Основний зміст роботи.

*Класифікація математичних моделей електроприводів.*

Математичні моделі електроприводів класифікуються за рівнем деталізації, фізичним змістом і цільовим призначенням. Залежно від мети моделювання, виділяють такі основні типи табл.1

Таблиця 1

Порівняльна характеристика математичних моделей асинхронного двигуна

Тип моделі	Основні рівняння	Переваги	Недоліки
Трифазна (abc)	диференціальні рівняння у фазній системі координат	висока точність, відображення несиметрії фаз і гармонік	значна обчислювальна складність, повільна
Векторна (dq)	рівняння у синхронній обертовій системі координат	придатна для керування типу FOC, висока швидкодія	потребує перетворення координат, втрачено частину гармонік
Grey-box (ідентифікаційна)	параметри отримані шляхом статистичної ідентифікації	проста реалізація, універсальність	знижена фізична інтерпретованість
Полюва (FEM)	рівняння поля, розв'язок методом скінченних елементів	висока точність, моделює насичення	непридатна для роботи у реальному часі
Теплова RC	еквівалентна RC-мережа теплообміну	дозволяє прогнозувати перегрів	не описує електромагнітну динаміку

Аналіз показує, що векторна dq-модель є найбільш придатною для реалізації у реальному часі, оскільки забезпечує баланс між точністю й обчислювальною ефективністю [5-7].

Саме вона лежить в основі сучасних алгоритмів керування електроприводами типу *Field Oriented Control (FOC)*, реалізованих у промислових частотних перетворювачах.

*Математичний опис d q-моделі асинхронного двигуна.*

Векторна модель базується на перетвореннях Кларка–Парка, які переводять трифазну систему у дві ортогональні складові, орієнтовані за магнітним потоком ротора [5, 7]:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 120^\circ) & \cos(\theta + 120^\circ) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - 120^\circ) & -\sin(\theta + 120^\circ) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

Основна система рівнянь асинхронного двигуна у координатах (d-q) має вигляд [8, 9]:

$$\begin{aligned}\frac{d\psi_{dr}}{dt} &= \frac{L_m i_d - \psi_{dr}}{T_r} + \omega_r \psi_{qr}, \\ \frac{d\psi_{qr}}{dt} &= \frac{L_m i_q - \psi_{qr}}{T_r} - \omega_r \psi_{dr}, \\ u_d &= R_s i_d + \frac{d\psi_{ds}}{dt} - \omega_s \psi_{qs}, \\ u_q &= R_s i_q + \frac{d\psi_{qs}}{dt} + \omega_s \psi_{ds}, \\ M_e &= \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r} (\psi_{dr} i_q - \psi_{qr} i_d), \\ J \frac{d\omega_r}{dt} &= M_e - M_L - B \omega_r.\end{aligned}$$

де  $i_d, i_q$  – струми статора у системі координат (d-q);

$\psi_{dr}, \psi_{qr}$  – потокозчеплення ротора;

$\omega_s, \omega_r$  – частота обертання поля статора та ротора;

$R_s, R_r, L_s, L_r, L_m$ , – параметри схеми заміщення.

$J$  – момент інерції ротора;

$M_e$  – електромагнітний момент двигуна;

$M_L$  – момент навантаження;

$B \omega_r$  – момент опору, що пропорційний швидкості обертання ротора, враховує втрати механічної енергії.

Перевагою цієї моделі є можливість відокремлення контурів регулювання потоку і моменту, що забезпечує стабільну роботу системи при зміні навантаження.

У аналітичних моделях діагностики зміна  $B$  може сигналізувати про підвищення опору в підшипниках або дефект балансування ротора.

У тепловій моделі частина втрат  $B \omega_r^2$  може бути переведена у тепло  $P_{\text{тертя}}$ .

*Урахування зовнішніх впливів та нестационарних процесів.*

Для забезпечення адекватності моделі в реальних умовах у dq-модель вводяться допоміжні підсистеми:

*Теплова підсистема:*

$$R_s(T) = R_{s0} [1 + \alpha(T - T_0)],$$

де  $\alpha = 0,0039 \sim 1/^\circ\text{C}$ ; ця залежність дозволяє врахувати зміну опору обмоток при нагріванні.

*Вібраційні впливи:* аналізуються через частотне представлення сигналу прискорення  $a(t)$  [10]:

$$A(f) = \left| \int a(t) e^{-j2\pi ft} dt \right|,$$

що дозволяє виявляти гармоніки, пов'язані з дефектами підшипників і дисбалансом ротора.

*Мережеві спотворення:* урахуються шляхом додавання гармонік у вираз для вхідних напруг [11, 12]:

$$u_a = U_m \sin(\omega t) + \sum_{n=3,5,7} U_n \sin(n\omega t + \phi_n),$$

де гармоніки  $n=3,5,7$  відображають неідеальність мережі.

Отримані рівняння дозволяють моделювати динаміку потокозчеплень, моменту та швидкості, що робить dq-модель базовим ядром цифрового двійника.

*Узагальнена архітектура цифрового двійника.* Архітектура цифрового двійника електропривода є багаторівневою системою, що забезпечує обмін даними між фізичним об'єктом, математичною моделлю та аналітичними алгоритмами у реальному часі [13].

Основна мета такої архітектури – створення єдиного інформаційного простору для моніторингу, прогнозування та оптимізації роботи електромеханічних комплексів.

Схема узагальненої архітектури наведена на рис. 1.

Запропонована архітектура забезпечує інтеграцію між фізичним, віртуальним та аналітичним рівнями, формуючи основу для побудови систем моніторингу та прогнозного керування.

Характеристика рівнів системи

1. Фізичний рівень.

Включає реальні технічні засоби – електродвигун, перетворювач частоти, датчики струму, напруги, температури, вібрацій та контролер (ПЛК).

Основна функція – вимірювання параметрів у реальному часі й передача їх до віртуального рівня через промислові протоколи (*Modbus TCP, PROFINET, IO-Link*) [14].

Тут формується первинний потік даних  $i_a, i_b, i_c, U_{ab}, \omega_r, T, a(t)$ .

2. Віртуальний рівень (модель цифрового двійника).

Представляє собою математичну копію електропривода, побудовану на основі dq-моделі асинхронного двигуна з урахуванням теплових і механічних підсистем.

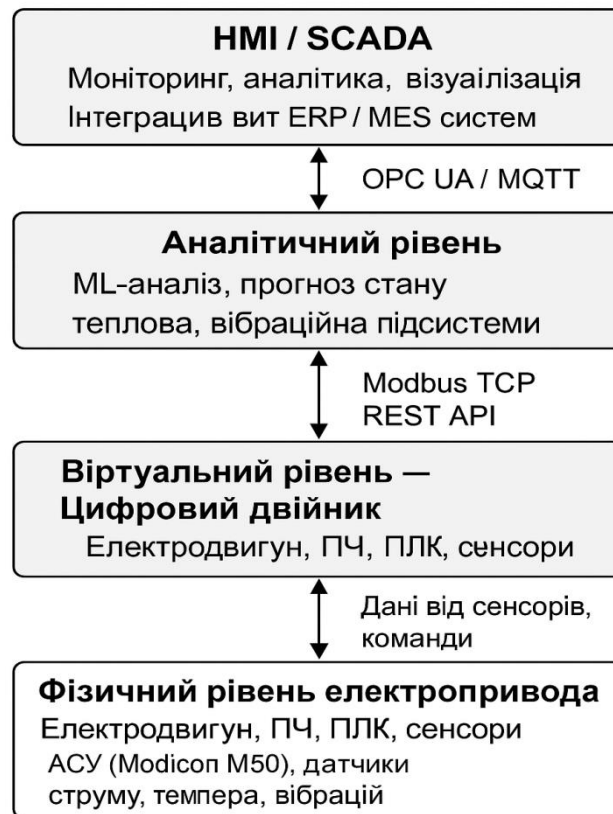


Рис. 1. Узагальнена архітектура цифрового двійника електропривода

Цей рівень виконує:

- чисельну інтеграцію рівнянь (оцінка поточних параметрів, моменту, швидкості);
- симуляцію електромеханічних процесів;
- адаптацію параметрів у реальному часі за вимірними даними.
- Модель працює з частотою оновлення 10–50 мс, що дозволяє виявляти короточасні відхилення параметрів.

Одним із критичних параметрів побудови цифрового двійника є вибір частоти оновлення даних ( $f_s = 1/T_s$ ), що визначає здатність системи коректно відтворювати короточасні відхилення електромеханічних параметрів.

Інтервал оновлення 10–50 мс вважається оптимальним для цифрового двійника електропривода, оскільки забезпечує баланс між точністю, швидкістю та навантаженням на обчислювальні ресурси.

**Динамічні властивості електропривода.** Асинхронний двигун є системою з різними часовими сталими, що визначають швидкість змін процесів табл.2.

Таблиця 2

## Основні підсистеми цифрового двійника та їхні часові параметри

Підсистема	Характерна часова стала, с	Тип процесу
Електромагнітна	0,01–0,05	зміна потоків і струмів ротора
Механічна	0,1–1,0	зміна швидкості та моменту
Теплова	10–300	зміна температури обмоток і корпусу
Вібраційна	0,002–0,02	короткочасні коливання та удари

Таким чином, найшвидші зміни у струмах і потоках мають період близько **10–20 мс**, тоді як механічні процеси – на порядок повільніші.

Це дозволяє цифровому двійнику працювати з частотою 20–100 Гц без втрати суттєвої інформації.

Критерій Найквіста–Шеннона. Для відтворення сигналу без спотворень частота вибірки повинна задовольняти умову:

$$f_s \geq 2 \cdot f_{\max},$$

де  $f_{\max}$  – максимальна частота зміни контрольованого параметра.

Для електропривода, де  $f_{\max} \approx 50\text{--}100\text{ Гц}$ , мінімальна частота вибірки становить  $f_s = 200\text{ Гц} \Rightarrow T_s \leq 5\text{ мс}$ . Ця вимога застосовується для контурів струму в частотному перетворювачі, але не є обов'язковою для цифрового двійника, який працює з усередненими величинами: моментом, потокозчепленням, температурою.

Порівняння часових параметрів різних рівнів системи наведено у табл.3.

Таблиця 3

## Оцінка часових витрат контурів діагностики цифрового двійника

Рівень системи	Функція	Типовий інтервал оновлення, мс
Контур струму (ПЧ)	стабілізація миттєвого моменту	0,1–1
Контур швидкості (ПЛК)	регулювання частоти обертання	1–10
Цифровий двійник (віртуальний рівень)	симуляція потоків, моменту, теплового стану	10–50
Аналітичний рівень (ML / SCADA)	прогноз і візуалізація	100–1000

Інтервал 10–50 мс дозволяє цифровому двійнику фіксувати всі релевантні зміни параметрів двигуна з достатньою точністю та одночасно не перевантажує канали зв'язку (обсяг даних < 50 кБ/с).

Зменшення інтервалу нижче 10 мс не дасть суттєвого приросту точності, але збільшить навантаження на процесор і мережевий трафік.

Таким чином, діапазон 10–50 мс забезпечує мінімальну похибку при помірній обчислювальній вартості.

Частота оновлення цифрового двійника 20–100 Гц (інтервал 10–50 мс) є достатньою для коректного відтворення електромеханічних процесів асинхронного двигуна, прогнозування короточасних відхилень параметрів та підтримання зв'язку у режимі реального часу без перевантаження системи.

### 3. Аналітичний рівень.

Забезпечує інтелектуальну обробку даних і формування діагностичних рішень.

Основні завдання:

- аналіз трендів змін параметрів;
- розрахунок спектральних характеристик (FFT/STFT) для вібрацій [10];
- класифікація технічного стану (норма, перегрів, розцентрування, дефект підшипника, міжвиткове замикання);
- прогнозування часу до відмови за допомогою рекурентних нейронних мереж (LSTM).

Дані передаються у цей рівень через *MQTT* або *REST API* з інтервалом 50–200 мс [15].

Алгоритми аналітики реалізовуватимуться на edge-сервері або у хмарному середовищі, що дозволяє масштабувати систему для групи приводів.

### 4. Рівень HMI/SCADA.

Призначений для відображення результатів моніторингу й діагностики, візуалізації поточних параметрів, побудови енергетичних балансів та передавання даних у вищі рівні керування (*MES/ERP*).

Інтерфейси операторів дозволяють контролювати стан обладнання в реальному часі, переглядати історію трендів і отримувати попередження про відхилення.

### 5. Контур діагностики та вимоги до швидкодії

Контур діагностики цифрового двійника реалізується як послідовність процесів оброблення даних, що включає:

1. зняття аналогових сигналів із сенсорів;
2. аналого-цифрове перетворення;
3. обмін між контролером і віртуальною моделлю;
4. обчислення діагностичних ознак;
5. формування висновків і передавання результатів на рівень аналітики або SCADA.

Загальний час реакції  $T_{\Sigma}$  можна подати як суму затримок окремих етапів:

$$T_{\Sigma} = T_{\text{АЦП}} + T_{\text{PLC}} + T_{\text{Comm}} + T_{\text{Model}} + T_{\text{Diag}} + T_{\text{Vis}},$$

де:  $T_{\text{АЦП}}$  – час аналого-цифрового перетворення сигналу;

$T_{\text{PLC}}$  – затримка циклу контролера;

$T_{\text{Comm}}$  – час передавання даних по мережі;

$T_{\text{Model}}$  – період оновлення моделі цифрового двійника;

$T_{Diag}$  – час аналітичної обробки сигналів;

$T_{Vis}$  – час оновлення візуалізації.

Таблиця 4

Оцінка часових витрат контурів

Етап	Опис процесу	Типова тривалість, мс	Коментар
Зняття сигналів (датчики)	Перетворення фізичних величин (струм, температура, вібрація) у аналоговий сигнал	0,1–1	Залежить від типу сенсора (MEMS, PT100, Hall)
АЦП (аналогово-цифрове перетворення)	Дискретизація сигналу контролером або модулем збору даних	0,1–5	12–16-бітні АЦП мають типову швидкодію 200–1000 зразків/с
Цикл ПЛК (scan time)	Читання входів, виконання програми, запис виходів	5–20	Для ПЛК середнього рівня (Schneider M580, Siemens S7-1500)
Обмін по мережі (Ethernet, Modbus TCP)	Передавання пакетів даних між ПЛК і цифровим двійником	2–10	Визначається швидкістю шини 100 Мбіт/с і розміром кадру
Оновлення моделі двійника	Інтеграція рівнянь dq-моделі, теплової та вібраційної підсистем	10–50	Вибраний інтервал обґрунтований вище
Аналітична обробка (FFT, ML)	Розрахунок спектрів, прогноз, класифікація	10–30	На основі пакетної обробки даних (256–512 точок)
Візуалізація (SCADA / HMI)	Оновлення екрану, запис у базу даних	100–1000	Відповідає людському сприйняттю, не впливає на контроль

Сумарна затримка контуру діагностики:

$$T_{\Sigma} \approx 30\text{--}80 \text{ мс},$$

що відповідає для систем технічного моніторингу та дозволяє фіксувати зміни параметрів на частотах до 10–20 Гц без втрати інформативності [16].

Урахування ролі ПЛК у діагностиці.

У запропонованій архітектурі контур діагностики може бути реалізований у двох варіантах табл. 5.

Порівняння варіантів реалізації контуру діагностики.

Варіант	Джерело даних	Обробка	Коментар
А. Через ПЛК (вбудований режим)	Датчики → ПЛК → цифровий двійник	Виконується у циклі ПЛК (5–20 мс)	Синхронізовано з основним керуванням, висока достовірність, але більша затримка
Б. Через паралельний канал (Edge Gateway)	Датчики → шлюз → цифровий двійник	Паралельна обробка, поза циклом ПЛК	Вища швидкодія (5–10 мс), мінімальний вплив на керування

Вибір варіанту залежить від доступної обчислювальної потужності та критичності часу реакції. Для прогнозно-аналітичних задач доцільно застосовувати паралельний канал (*Edge Gateway* або *IoT-шлюз*), а для оперативного контролю стану – безпосередньо цикл ПЛК.

Баланс точності й швидкодії.

Для досягнення компромісу між інформативністю діагностичних ознак і частотою оновлення сигналів використовується комбінований підхід:

- високочастотні сигнали (вібрації, струми) дискретизуються з частотою 1–5 кГц у модулі збору даних, але передаються у цифровий двійник пакетно з інтервалом 10–50 мс у вигляді узагальнених характеристик (RMS, THD, спектральні піки);
- повільні сигнали (температура, момент, енергія) опитуються з інтервалом 0,5–1 с.

Такий підхід дозволяє суттєво зменшити навантаження на мережу та забезпечити необхідну роздільну здатність для діагностики.

#### 6. Особливості реалізації

Ключовими властивостями запропонованої архітектури є:

- модульність – можливість підключення або вимкнення окремих підсистем без перебудови всієї системи;
- масштабованість – здатність охоплювати один або декілька приводів у спільному аналітичному середовищі;
- взаємодія у реальному часі – затримка не перевищує 80 мс при оновленні даних із частотою 100 мс;
- енергетична інтеграція – можливість формування балансу потужності для розрахунку ефективності роботи;
- відкритість інтерфейсів – використання стандартів OPC UA, MQTT, REST забезпечує сумісність із різними апаратними платформами.

#### 7. Функціональне призначення архітектури

Завдяки взаємодії всіх рівнів система забезпечує:

- онлайн-оцінювання технічного стану електропривода за даними датчиків і моделі;

- побудову прогнозів деградації обмоток, підшипників, механічних з'єднань;
- енергетичну аналітику, включно з розрахунком ККД і втрат;
- передавання коригувальних команд до контролера або оператора;
- інтеграцію з системами технічного обслуговування (CMMS, ERP) для автоматичного планування ремонтів.

#### Практична реалізація та підготовчі експерименти

На даному етапі дослідження здійснюється аналіз можливостей реалізації цифрового двійника електропривода у лабораторних та промислових умовах, а також збір експериментальних даних для калібрування параметрів математичної моделі.

Основну увагу приділено оцінюванню обчислювальних і комунікаційних можливостей системи, аналізу часових затримок під час передавання сигналів та перевірки сумісності апаратних компонентів.

#### 1. Поточний стан реалізації

Розроблено прототип архітектури цифрового двійника, який включає такі компоненти:

- контролер Modicon M580, що виконує зчитування сигналів струму, напруги, швидкості та температури з реального електропривода;
- периферійні сенсорні модулі (аналого-цифрові перетворювачі, датчики вібрацій IO-Link, термопари типу PT100);
- комунікаційні канали *Modbus TCP* та *Ethernet/IP* для обміну з комп'ютерною моделлю;
- віртуальну dq-модель, реалізовану у середовищі MATLAB/Simulink та Python (NumPy, SciPy);
- проміжний аналітичний сервер (Edge Gateway) для фільтрації та попередньої обробки сигналів.
- 

Виконується тестування пропускнуої здатності мережі, визначення затримок АЦП і циклу ПЛК для подальшого налаштування параметрів цифрового двійника.

#### 2. Тестування часових характеристик

Проведено серію попередніх вимірювань часу реакції системи при різних конфігураціях обробки сигналів. Результати наведено у табл.6.

Результати тестування часових характеристик системи.

Етап процесу	Джерело даних	Типова затримка, мс	Коментар
Аналого-цифрове перетворення (АЦП)	Модуль вводу аналогових сигналів ПЛК	1–3	залежить від роздільної здатності та частоти дискретизації
Обробка у циклі ПЛК	Modicon M580 (scan time)	10–20	при кількості 200 тегів
Передавання по мережі	Modbus TCP, 100 Мбіт/с	3–8	залежить від обсягу пакета
Оновлення dq-моделі	MATLAB/Simulink (локально)	10–50	залежно від розміру кроку інтеграції
Передача результатів у аналітичний рівень	MQTT / REST API	5–10	тестовано на локальному сервері
Загальна затримка системи	–	30–80	відповідає реальному часу для моніторингу

Результати підтверджують, що загальний час реакції системи не перевищує 80 мс, що забезпечує можливість діагностики швидких електромеханічних процесів і коректну роботу в режимі онлайн-моніторингу.

### 3. Аналіз обчислювальних можливостей

Виконано орієнтовні розрахунки навантаження процесора при різних варіантах реалізації моделі. Для dq-моделі асинхронного двигуна із тепловою підсистемою (6 диференціальних рівнянь + 3 алгебраїчних) середній час інтеграції одного кроку становить 0,3–0,8 мс при обробці в середовищі MATLAB.

Такий підхід забезпечує можливість моделювання у реальному масштабі часу з частотою до 100 Гц без перевантаження обчислювальних ресурсів персонального комп'ютера.

### 4. Подальші кроки експериментальної роботи

План реалізації подальших етапів включає:

1. Калібрування моделі на основі вимірянних струмів, напруг і швидкості реального привода.
2. Верифікацію dq-моделі через порівняння експериментальних і розрахункових характеристик (момент, струм, ККД).
3. Тестування контурів діагностики для виявлення типових дефектів (перегрів, вібраційні аномалії, міжвиткові замикання).
4. Розширення аналітичного рівня за рахунок алгоритмів машинного навчання для прогнозу стану.
5. Розроблення інтерфейсу SCADA/HMI з візуалізацією параметрів та формуванням звітів.

## 5. Прогнозовані результати

Виходячи з результатів попереднього аналізу, очікується, що реалізований цифровий двійник забезпечить:

- точність відтворення електромагнітних процесів у межах 3–5 %;
- можливість виявлення змін параметрів двигуна ( $R_s$ ,  $L_m$ ,  $J$ ) при їхній варіації понад 2–3 %;
- інтеграцію із системами SCADA та MES без перевищення допустимих затримок зв'язку;
- формування бази даних для подальшого навчання моделей прогнозу стану (*Predictive Maintenance*).

**Наукова новизна** одержаних результатів полягає у формуванні узагальненої архітектури цифрового двійника електропривода, яка поєднує електромагнітну dq-модель з тепловою, вібраційною та мережево-енергетичною підсистемами у єдиному інформаційному середовищі.

Запропоновано структуру контурів діагностики з урахуванням реальних часових затримок АЦП, циклу ПЛК та комунікаційних каналів, що забезпечує роботу системи у режимі реального часу з частотою оновлення 10–50 мс.

### Висновки.

1. В результаті проведеної роботи сформовано концептуальну модель цифрового двійника електропривода та визначено параметри, необхідні для його реалізації.
2. Проведено аналіз та узагальнення підходів до побудови цифрових двійників електроприводів промислових об'єктів, обґрунтовано доцільність використання dq-моделі як базової для моделювання електромагнітних процесів.
3. Розроблено концепцію архітектури цифрового двійника з багаторівневою структурою (фізичний, віртуальний, аналітичний і SCADA-рівні) та визначено вимоги до часових характеристик контурів керування й діагностики.
4. Проведено оцінку технічних можливостей апаратно-програмної реалізації, визначено затримки, обчислювальні витрати та пропускну здатність комунікацій, що підтвердило доцільність роботи системи у діапазоні 30–80 мс.
5. Результати підготовчого етапу створюють основу для подальшої експериментальної верифікації моделі та впровадження систем прогнозного технічного обслуговування (*Predictive Maintenance*) на базі цифрових двійників електроприводів.

### ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Tao F., Zhang H., Liu A., Nee A.Y.C. Digital Twin in Industry: State-of-the-Art and Future Trends. IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2019. Vol. 15, No. 4. P. 2405–2415.
2. Fuller A., Fan Z., Day C., Barclay P. Digital Twin: Enabling Technology, Challenges and Open Research. IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 108952–108971.
3. Glaessgen E., Stargel D. The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles. 51st AIAA/ASME Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. Orlando, 2010. P. 1–14.

4. Grieves M. Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication. CIMdata, 2015. 28 p.
5. Vas P. Vector Control of AC Machines. Oxford: Oxford University Press, 1990. 330 p.
6. Bose B.K. Modern Power Electronics and AC Drives. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002. 711 p.
7. Leonhard W. Control of Electrical Drives. 3rd ed. Berlin: Springer, 2001. 456 p.
8. Delaleau E., Louis J.-P., Ortega R. Modeling and Control of Induction Motors. International Journal of Applied Mathematics and Computer Science. 2001. Vol. 11, No. 1. P. 105–129.
9. Németh Z., Kuczmann M. State-Space Modeling Theory of Induction Machines. Pollack Periodica. 2020. Vol. 15, No. 1. P. 124–135.
10. Hu J., Xiao H., Ye Z., Luo N., Zhou M. Research and Prospects of Digital Twin-Based Fault Diagnosis of Electric Machines. Sensors. 2025. Vol. 25, No. 8. Article 2625.
11. IEC 60034-1:2017. Rotating Electrical Machines – Rating and Performance. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2017. 98 p.
12. ДСТУ ІЕС 60034-1:2019. Машини електричні обертові. Номінальні дані та характеристики. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019. 102 с.
13. ДСТУ EN 61800-5-1:2016. Системи електроприводу з регульованою швидкістю. Вимоги до електробезпеки та енергетичних показників. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016.
14. IEC 62443-3-3:2019. Industrial Communication Networks – Network and System Security – System Security Requirements and Security Levels. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2019.
15. Kostenko D., Kudryashov N., Maystrishin M., Potekhin V. Digital Twin Applications: Diagnostics, Optimisation and Prediction. Proceedings of the 29th DAAAM Symposium. 2018. P. 575–580.
16. Schneider Electric. EcoStruxure™ Power. Digital Applications for Large Buildings and Critical Facilities. IEC Design Guide. Rueil-Malmaison: Schneider Electric, 2022. 266 p.