

**ОЦІНКА МОЖЛИВОСТЕЙ EDGE-ОБЧИСЛЕНЬ
ТА AI-ІНФЕРЕНСУ В ПРОМИСЛОВИХ
КОНТРОЛЕРАХ НОВОГО ПОКОЛІННЯ
(BECKHOFF CX ТА MITSUBISHI IQ-R З AI-МОДУЛЯМИ)**

Марков Г.М.

e-mail: heorhii.markov@nure.ua

Науковий керівник – к.т.н., проф. Зубков О.В.

Харківський національний університет радіоелектроніки, каф. МІРЕС
м. Харків, Україна

This paper evaluates edge computing and AI inference capabilities in next-generation industrial controllers, focusing on Beckhoff CX series (PC-based) and Mitsubishi MELSEC iQ-R with AI modules. Key features such as real-time inference engines, hardware acceleration (GPU/NPU), TwinCAT Machine Learning for Beckhoff, and AI visual inspection/integration for Mitsubishi are analyzed. Results show significant advantages in predictive maintenance, vision tasks, and low-latency decisions at the edge, supporting Industry 4.0 requirements in 2026.

У сучасних системах промислової автоматизації edge-обчислення та AI-інференс стають ключовими для зменшення затримок, підвищення автономності та обробки даних безпосередньо на обладнанні [1,2]. Промислові контролери нового покоління дозволяють виконувати інференс моделей машинного навчання (ML) та нейромереж у реальному часі без передачі даних у хмару.

Актуальність теми зумовлена розвитком концепції Industry 4.0, де прогнозне обслуговування, візуальна інспекція та оптимізація процесів вимагають локальної обробки AI [1]. Проблемою залишається баланс між продуктивністю, детермінованістю та промисловою надійністю.

Метою роботи є оцінка можливостей edge-обчислень та AI-інференсу на прикладах Beckhoff CX (PC-based control) та Mitsubishi MELSEC iQ-R з AI-модулями. Завдання: огляд архітектури, аналіз інструментів інференсу, порівняння продуктивності та висновки щодо типових застосувань.

Beckhoff CX – це PC-based промислові контролери (embedded PCs), що поєднують PLC, motion control та edge-обчислення в одному пристрої. У 2025–2026 роках серія підтримує потужні multi-core процесори (Intel Xeon, Atom тощо), GPU-акселерацію (наприклад, C6043 з NVIDIA GPU) та інтеграцію AI безпосередньо в TwinCAT 3.

До основних ключових інструментів для AI-інференсу належать:

- TF3800 TwinCAT 3 Machine Learning Inference Engine –модуль високої продуктивності для класичних ML-алгоритмів.
- TF3810 TwinCAT 3 Neural Network Inference Engine – для нейромереж (CNN, RNN тощо).

- TF3820 TwinCAT 3 Machine Learning Server – з підтримкою hardware-акселераторів (GPU).

- TwinCAT CoAgent – AI-асистент для інженерії (генерація коду, оптимізація).

Їх перевагами є:

- Реальний час інференсу (cycle time <1 мс для простих моделей).
- Інтеграція з EtherCAT (детермінованість ± 1 мкс).
- Підтримка великих моделей (LLM inference на GPU).
- Застосування: дефектоскопія, прогнозне обслуговування, оптимізація траєкторій.

MELSEC iQ-R – модульний високопродуктивний PLC з підтримкою edge-обчислень та інтеграції AI-модулів [3]. У 2025–2026 роках зосереджено акцент на інтеграції AI через спеціальні модулі та програмне забезпечення (MELSOFT VIXIO для візуальної інспекції).

Він має наступні ключові можливості:

- Інтелектуальні модулі (advanced information modules) для зв'язку з IT-системами та edge-обробки.

- MELSOFT VIXIO – AI-візуальна інспекція без програмування (підтримка CNN-моделей, автоматична інтеграція з PLC-даними) [3].

- Підтримка edge-computing для аналізу даних на рівні контролера (енергоспоживання, predictive maintenance).

- Нові продукти 2025–2026 (наприклад, MELSEC MX) інтегрують logic, motion, AI та edge.

До переваг його використання відносяться:

- Простота розгортання AI без глибоких знань ML.
- Seamless інтеграція з детермінованою мережею CC-Link IE TSN [3].
- Застосування: візуальний контроль якості, енергоменеджмент, traceability.

Власні дослідження, а також глибокий аналіз технічної документації розглянутих програмно-апаратних рішень дозволив створити порівняльну таблицю можливостей різних контролерів (Таблиця 1).

Beckhoff характеризується більшою гнучкістю та продуктивністю інференсу (особливо з GPU), Mitsubishi – за простотою впровадження AI у традиційних PLC-застосуваннях.

Практичні приклади застосування:

- Beckhoff CX: інференс CNN для дефектоскопії на конвеєрі (реакція <10 мс), прогнозне обслуговування з LLM на edge.

- Mitsubishi iQ-R: AI-візуальна перевірка якості (без програмування), енергоспоживання з edge-аналізом.

Застосування edge-обробки може знизити затримки передачі даних та підвищити ефективність контролю виробництва [1,3].

Таблиця 1 – Порівняльний аналіз можливостей контролерів Beckhoff CX та Mitsubishi iQ-R

Параметр	Beckhoff CX (з TwinCAT ML)	Mitsubishi iQ-R (з VIXIO/AI-модулями)
Тип архітектури	PC-based (гнучка, multi-core + GPU)	Класичний модульний PLC + інтелектуальні модулі
Інференс нейромереж	TF3810 (високопродуктивний, GPU)	VIXIO (спеціалізований на візії)
Підтримка hardware accel.	NVIDIA GPU, NPU	Обмежена (edge через CPU/модулі)
Реальний час інференсу	<1 мс (з GPU)	Мс-діапазон (для візії)
Інтеграція з PLC	Повна (TwinCAT)	Повна (GX Works3)
Складність освоєння AI	Висока (програмування ML-моделей)	Низька (no-code для візії)
Застосування	Складні edge-задачі, LLM, motion + AI	Візуальна інспекція, predictive maintenance

Висновки. Промислові контролери нового покоління, такі як Beckhoff CX та Mitsubishi MELSEC iQ-R з AI-модулями, демонструють значні можливості edge-обчислень та AI-інференсу. Beckhoff орієнтований на складні задачі з високою продуктивністю інференсу (GPU, нейромережі), тоді як Mitsubishi забезпечує просте впровадження AI у традиційні PLC-системи, що сприяє реалізації концепції Industry 4.0 завдяки локальній обробці даних і зниженню затримок.

Список використаних джерел:

1. Beckhoff. AI technologies for industrial automation. [Електронний ресурс] URL: <https://www.beckhoff.com/en-us/company/news/multimedia-ai-technologies-for-industrial-automation.html> (дата звернення: 10.03.2026).
2. Beckhoff. Product Overview 2026.[Електронний ресурс] URL: https://download.beckhoff.com/download/document/catalog/Beckhoff_Products_2026.pdf (дата звернення: 10.03.2026).
3. Mitsubishi Electric. Programmable Controllers MELSEC iQ-R Series. [Електронний ресурс]. URL: <https://us.mitsubishielectric.com/fa/en/products/control/programmable-controllers/melsec-iq-r-series> (дата звернення: 10.03.2026).