

АВТОМАТИЗАЦІЯ, КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА РОБОТОТЕХНІКА

УДК 004.942:681.5

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-4-8>

СИСТЕМА ВІДДАЛЕНОГО МОНІТОРИНГУ СТАНУ ПРОМИСЛОВОГО РОБОТА

Баранова Ольга Андріївна,

здобувач вищої освіти

Національного університету «Запорізька політехніка»

ORCID ID: 0009-0007-4270-4179

Єфименко Микола Володимирович,

доктор технічних наук, професор,

професор кафедри інформаційних технологій електронних засобів

Національного університету «Запорізька політехніка»

ORCID ID: 0000-0001-7760-8610

Миронова Наталя Олексіївна,

кандидат технічних наук, доцент,

доцент кафедри інформаційних технологій електронних засобів

Національного університету «Запорізька політехніка»

ORCID ID: 0000-0001-7484-559X

Молочков Денис Євгенійович,

доктор філософії,

старший викладач кафедри інформаційних технологій електронних засобів

Національного університету «Запорізька політехніка»

ORCID ID: 0000-0002-9030-5371

Куляба-Харитоновна Тетяна Іванівна,

старший викладач кафедри інформаційних технологій електронних засобів

Національного університету «Запорізька політехніка»

ORCID ID: 0000-0002-4146-4931

У сучасних умовах стрімкого розвитку індустрії 4.0 роботи відіграють ключову роль в автоматизації різноманітних виробничих процесів. Для ефективного використання роботизованих систем необхідний постійний контроль їх технічного стану, своєчасне виявлення відхилень у роботі й забезпечення оперативного реагування на потенційні несправності. Особливого значення набувають системи віддаленого моніторингу, що дозволяють здійснювати контроль за роботою обладнання без фізичної присутності оператора, що критично важливо у випадках географічної віддаленості виробничих майданчиків або обмеженого доступу до об'єктів. Таким чином, розроблення системи віддаленого моніторингу промислового робота є актуальною задачею і дозволяє підвищити ефективність, гнучкість і безпеку сучасного виробництва. У статті представлено результати дослідження, спрямованого на розроблення системи віддаленого моніторингу технічного стану промислового робота Yaskawa Motoman MH5SII. Запропонована система дозволяє здійснювати моніторинг положення робота в базових системах координат, помилки сервоприводів робота, крутного моменту осей, поточного стану контролера, даних завдання, що наразі виконуються на контролері в режимі реального часу без фізичної присутності оператора. Розробка базується на багаторівневій клієнт-серверній архітектурі, що включає використання протоколу WireGuard VPN для захищеного з'єднання, бібліотеки YMCconnect – для комунікації з контролером робота, проміжного Python-сервера (API) та вебінтерфейсу на основі HTML, CSS і JavaScript. Обмін даними між сервером і клієнтом здійснюється за допомогою WebSocket, що забезпечує мінімальні затримки та стабільну роботу. Експериментальні дослідження підтвердили надійність системи, її постійну роботу за тривалого використання, а також відповідність сучасним вимогам до промислових систем віддаленого моніторингу. Окрему увагу приділено перспективам розвитку: реалізація цифрового двійника, історії даних, сповіщень

та підтримки флоту роботів. Стаття буде корисною для розробників автоматизованих систем, інженерів і дослідників у сфері робототехніки та промислової автоматизації.

Ключові слова: система віддаленого моніторингу, промисловий робот, вебінтерфейс, Yaskawa Motoman MH5SII, VPN, WireGuard, YMConnect.

Baranova Olha, Yefymenko Mykola, Myronova Natalia, Molochkov Denys, Kulyaba-Kharytonova Tatiana. The system for remote state monitoring of an industrial robot

In the era of rapid Industry 4.0 advancement, robots play a key role in automating diverse manufacturing processes. To ensure the effective use of these robotic systems, it is essential to continuously monitor their technical condition, promptly detect operational deviations, and enable a rapid response to potential faults. Remote monitoring systems are particularly important as they allow for equipment supervision without the physical presence of an operator – a critical advantage for geographically dispersed production sites or facilities with restricted access. Consequently, developing a remote monitoring system for an industrial robot is a highly relevant task that can significantly enhance the efficiency, flexibility, and safety of modern manufacturing.

This article presents the results of a study on the development of a remote monitoring system for the technical condition of a Yaskawa Motoman MH5SII industrial robot. The proposed system enables real-time, remote monitoring of the robot's position in its base coordinate system, servo drive errors, joint torques, the controller's current state, and the execution status of the active program.

The system utilizes a multi-tiered client-server architecture, incorporating the WireGuard VPN protocol for secure connectivity, the YMConnect library for communication with the robot controller, a Python-based middleware server (API), and a web-based user interface developed with HTML, CSS, and JavaScript. Data exchange between the server and the client uses the WebSocket protocol, ensuring low latency and stable communication.

Experimental results confirmed the system's reliability and stable performance during extended operation, demonstrating its compliance with modern industrial monitoring requirements. Future development will focus on implementing a digital twin, historical data logging, an automated alerting system, and support for multi-robot fleet management. This article will be valuable for developers of automated systems, engineers, and researchers in robotics and industrial automation.

Keywords: remote monitoring system, industrial robot, web interface, Yaskawa Motoman MH5SII, VPN, WireGuard, YMConnect.

Вступ. Стрімкий розвиток автоматизації, робототехнічних систем, мереж зв'язку надав поштовх до розвитку технологій віддаленого моніторингу. Віддалений моніторинг – це комплекс апаратних та програмних засобів, що надає можливість здійснювати контроль стану об'єкта або процесу на відстані в реальному часі. Системи віддаленого моніторингу (СВМ) зазвичай використовуються для спостереження за обладнанням, інфраструктурою, навколишнім середовищем чи виробничими процесами, часто без необхідності фізичної присутності оператора на місці. Такі системи широко застосовуються у сфері сільського господарства (моніторинг агророботів і дронів), медицини (медичні маніпулятори, телероботика, RPM), екології (вимірювання радіаційного фону, рівня забруднення повітря), IT (моніторинг серверів, мереж, дата-центрів), охорони (відеоспостереження, датчики руху, пожежна сигналізація), у рятувальних операціях, космічних дослідженнях тощо.

Особливе місце автоматизовані СВМ займають у сфері промислової автоматизації, на виробничих лініях, у логістичних центрах або у важкодоступних зонах. У минулому виробничі галузі значною мірою поклалися на ручні методи збору даних, що часто призводило до помилок, затримок і проблем безпеки. Віддалений моніторинг дозволяє здійснювати контроль за станом обладнання у режимі реального часу,

забезпечуючи збір та аналіз телеметричних даних, виявлення відхилень у роботі, фіксацію аварійних ситуацій, а також прогнозування можливих збоїв. Це допомагає уникати дорогих поломок і підтримувати безперебійну роботу. Також СВМ використовуються для відстеження місцезнаходження продукції, контролю рівня запасів та прогнозування необхідності їх поповнення. Це допомагає виробникам гарантувати наявність необхідних матеріалів та продуктів, коли це необхідно, скорочуючи затримки і забезпечуючи ефективність виробничих процесів [8].

Автоматизація виробничих процесів із використанням СВМ є одним із ключових умов переходу до Industry 4.0, четвертої промислової революції, що прагне оптимізувати безпеку промислових робітників та покращити використання машин за допомогою моніторингу стану і стратегій віддаленого моніторингу [5].

Збільшення значущості СВМ можна спостерігати в тому, як усе більше великих компаній з розроблення роботів представляють власні СВМ. Такі системи не є універсальними, більшість із них покликана працювати з конкретною моделлю робота від фірми виробника системи. Це зумовлює потребу створення власної універсальної системи, орієнтованої на використання з роботами Yaskawa.

Мета роботи – проектування та розроблення системи для віддаленого моніторингу стану

робота Yaskawa Motoman MH5SII у режимі реального часу з використанням сучасних технологій передачі та візуалізації даних.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі задачі:

- дослідити сучасні системи віддаленого моніторингу роботів;
- дослідити наявні технології та засоби проектування систем віддаленого моніторингу роботів;
- спроектувати систему віддаленого моніторингу роботів;
- налаштувати захищене підключення до робота;
- розробити застосунок для візуалізації телеметрії робота;
- провести експериментальне дослідження розробленої системи.

Методи та методики дослідження. У процесі виконання дослідження було застосовано комплекс методів, що забезпечили всебічне вивчення предметної області, розроблення архітектури системи та оцінювання її ефективності в експериментальних умовах.

Теоретико-методологічна база ґрунтувалася на методі системного аналізу для дослідження сучасних підходів до побудови систем віддаленого моніторингу. Зокрема, було розглянуто архітектури, методи збору, передачі, оброблення, збереження і візуалізації даних, а також забезпечення безпеки і стійкості систем віддаленого моніторингу. Для вивчення наявних рішень проведено порівняльний аналіз систем, як-от ABB Ability™, KUKA Connect, Foxglove Studio тощо.

На етапі проектування було використано методи UML-моделювання для побудови структури та логіки взаємодії компонентів системи. Моделі створено за допомогою безкоштовного онлайн-сервісу Draw.io. Архітектура системи базувалася на принципах клієнт-серверної взаємодії та п'ятирівневого підходу до організації CBM.

Для перевірки функціональності системи застосовано експериментальний метод, зокрема інженерне тестування та імітаційне навантаження. Оцінювалися: стабільність VPN-з'єднання, затримка передачі даних, частота оновлення телеметрії, коректність візуалізації та поведінка інтерфейсу в реальному часі.

Також використовувались емпіричні методи спостереження, фіксація результатів у логах, аналіз продуктивності мережевого трафіку та графічне представлення параметрів із використанням інструментів JavaScript-візуалізації.

Результати. На ринку представлено низку готових рішень для віддаленого моніторингу

промислових роботів. Серед найбільш відомих – Boston Dynamics Orbit [7], ABB Ability™ Connected Services [1], KUKA Connect [6] та Foxglove Studio [3]. Хоча кожна із цих систем володіє значною кількістю функціональних можливостей, більшість із них розроблена виключно для обладнання власного виробництва.

Порівнюючи CBM (табл. 1), можна помітити, що кожна з них орієнтована на свою задачу: Orbit спеціалізується на мобільних роботах Spot і підтримує повноцінне 3D-відображення середовища, тоді як ABB і KUKA орієнтовані на класичні промислові маніпулятори і пропонують глибоку діагностику технічного стану. Foxglove Studio вирізняється відкритістю, гнучкістю та підтримкою ROS-екосистеми, що робить її універсальним інструментом для розробників. Крім безпосереднього відображення даних про роботу, системи зазвичай підтримують і деякі додаткові можливості, як-от віддалений доступ до робота, можливість діагностики обладнання й аналітики даних, підтримка флоту роботів та інтеграція з іншими системами. Усі розглянуті системи підтримують хмарну архітектуру, що відображає загальну тенденцію розвитку подібних систем.

Однак усі зазначені рішення мають певні обмеження:

- обмежена підтримка моделей сторонніх виробників;
- висока вартість комерційних ліцензій;
- непрозорість механізмів передачі даних;
- залежність від закритих API або обмеженого доступу до контролера робота.

З огляду на це постає необхідність створення гнучкої системи моніторингу, що не прив'язана до певного бренду, підтримує відкрите API, використовує стандартні мережеві протоколи та забезпечує захищене з'єднання.

Розроблена система віддаленого моніторингу базується на п'ятирівневій архітектурі [2], типовій для сучасних промислових CBM (рис. 1).

Рівень збору даних (Device Layer) – промисловий робот Yaskawa Motoman MH5SII, з якого зчитується інформація про положення, крутий момент, помилки положення.

Edge-рівень – проміжне ПЗ на C++ (модуль RobotConnect), яке підключається до контролера через YMConnect.

Комунікаційний рівень (Network Layer) – захищене VPN-з'єднання через WireGuard, а також використання WebSocket для передачі даних у режимі реального часу.

Серверна обробка (Server Layer) – Python API (CommunicationAPI), що приймає потік даних, обробляє їх і передає клієнтам.

Таблиця 1

Порівняння систем віддаленого моніторингу

Характеристика	Boston Dynamics Orbit	ABB Ability™ Connected Services	KUKA Connect	Foxglove Studio
Постачальник	Boston Dynamics	ABB Robotics	KUKA Robotics	Foxglove
Призначення	Віддалене управління та інспекція мобільних роботів (Spot)	Моніторинг, діагностика та обслуговування промислових роботів	Аналітика, діагностика і резервування даних роботів KUKA	Візуалізація, налагодження та аналіз робототехнічних даних
Візуалізація	3D-карта, відеопотік, маршрут	Діаграми, статуси, графіки	Графіки, таблиці, статуси	3D-сцена, часові графіки, зображення, трансформації
Підтримувані роботи	Spot, Stretch (частково)	Роботи ABB (IRB, GoFa тощо)	Роботи KUKA	Платформа-агностик (підтримує ROS 1/2, MCAP, bag)
Тип доступу	Хмарна вебплатформа	Хмарна платформа з вебінтерфейсом	Хмарна платформа (Lite / Plus)	Веб і десктопна версії
Тип архітектури	SaaS, хмарна/гібридна	Хмарна з можливістю інтеграції з локальними системами	Хмарна	Локальна або хмарна (через API / сховища)
Функції моніторингу	Стан, маршрут, відео, 3D-мапи, інспекційні дані	Температура, навантаження, помилки, обслуговування	Події, продуктивність, обслуговування	Дані сенсорів, відео, траєкторії, часові графіки
Діагностика та аналітика	Так	Так	Так	Частково (через користувацькі панелі)
Віддалений доступ до роботів	Так	Так	Так	Ні (тільки перегляд і візуалізація даних)
Підтримка кількох роботів (флот)	Так	Так	Так	Так
Інтеграція з іншими системами	API, CMMS, IoT, SCADA	CMMS, ERP, MyRobot	Часткова	Так (через API та ROS)



Рис. 1. Загальна архітектура CBM

Рівень візуалізації (UI Layer) – вебінтерфейс, реалізований за допомогою HTML, CSS, JavaScript, який дозволяє оператору відслідковувати параметри робота у зручному форматі. Motoman MH5S II – компактний і високошвидкісний 6-осьовий промисловий робот від компанії Yaskawa, розроблений для широкого спектра промислових застосувань, включаючи пакування, полірування й оброблення поверхонь, завантаження/розвантаження деталей, монтаж та складання, лазерне різання, дозування клею та герметиків.

Інформація, яку можна передавати й отримувати від контролера робота, залежить від бібліотеки, що використовується. Для взаємодії з роботами Yaskawa наразі доступні бібліотеки YMConnect і HSEC.

YMConnect – це інтуїтивно зрозуміла сучасна комунікаційна DLL-бібліотека, яка дозволяє встановлення Ethernet-комунікації з контролером робота та швидко й легко створювати інноваційні робототехнічні програми, розроблена Yaskawa America і є наступником MotoCom SDK. YMConnect розповсюджується за ліцензією Apache 2.0, що передбачає можливість безкоштовного використання. Наразі бібліотека підтримує мови програмування C++

і C#. Вона сумісна з операційними системами Windows 10 і новіше та Ubuntu 22.04 і новішими версіями. Працює з контролерами YRC1000, YRC1000micro, FS100, DX200 та DX100 (версія DS2.07.00-00 і вище). Має гарну документацію та приклади реалізації на C++ та C# [9].

HSEC (High Speed Ethernet Client) є пропрієтарним протоколом, що забезпечує взаємодію зовнішніх програмних додатків із контролерами Yaskawa за допомогою мережі Ethernet [4]. Він дозволяє розробникам створювати клієнтське програмне забезпечення для моніторингу та керування промисловими роботами на основі сокет-програмування. Розробником протоколу є компанія Yaskawa Nordic AB.

Порівняно з альтернативним рішенням YMConnect, протокол HSEC має розширену функціональність. Зокрема, він надає доступ до керування функціями руху (Motion) для контролерів версії DX200, тоді як YMConnect підтримує аналогічні операції лише для новішої серії YRC1000.

Ключовим недоліком HSEC є його комерційна модель розповсюдження. Протокол надається на основі платної ліцензії, вартість якої становить 500 доларів США. Пакет включає детальну технічну документацію англійською мовою з прикладами програмної реалізації на мові C#.

Зважаючи на доступність для зчитування телеметрії з промислового робота, було

вибрано офіційну бібліотеку YMConnect. Серед основних параметрів для зчитування з робота було виділено:

- а) поточне положення робота в базових координатах;
- б) помилки сервоприводів робота, тобто кількість імпульсів між поточним положенням і цільовим положенням, отриманих з енкодерів;
- в) крутний момент кожного серводвигуна;
- г) виконане завдання: назва завдання; номер поточного рядка в програмі; номер поточного кроку в програмі; швидкість переміщення у відсотках від максимальної;
- д) статус контролера: поточний цикловий режим контролера, тобто як виконується завдання (покроково, циклічно, автоматично); статус сервоприводів (ввімкнені/вимкнені); активні помилки; активні аварії.

Для побудови безпечного каналу між оператором і роботом використовується WireGuard VPN, що забезпечує:

- мінімальне навантаження на систему (на відміну від OpenVPN);
- високу швидкість і низьку затримку передачі;
- криптографічну безпеку, базовану на сучасних алгоритмах (ChaCha20, Curve25519).

Підключення до робота здійснюється тільки після встановлення VPN-тунелю, що гарантує ізоляваність внутрішньої мережі робота від зовнішніх загроз.

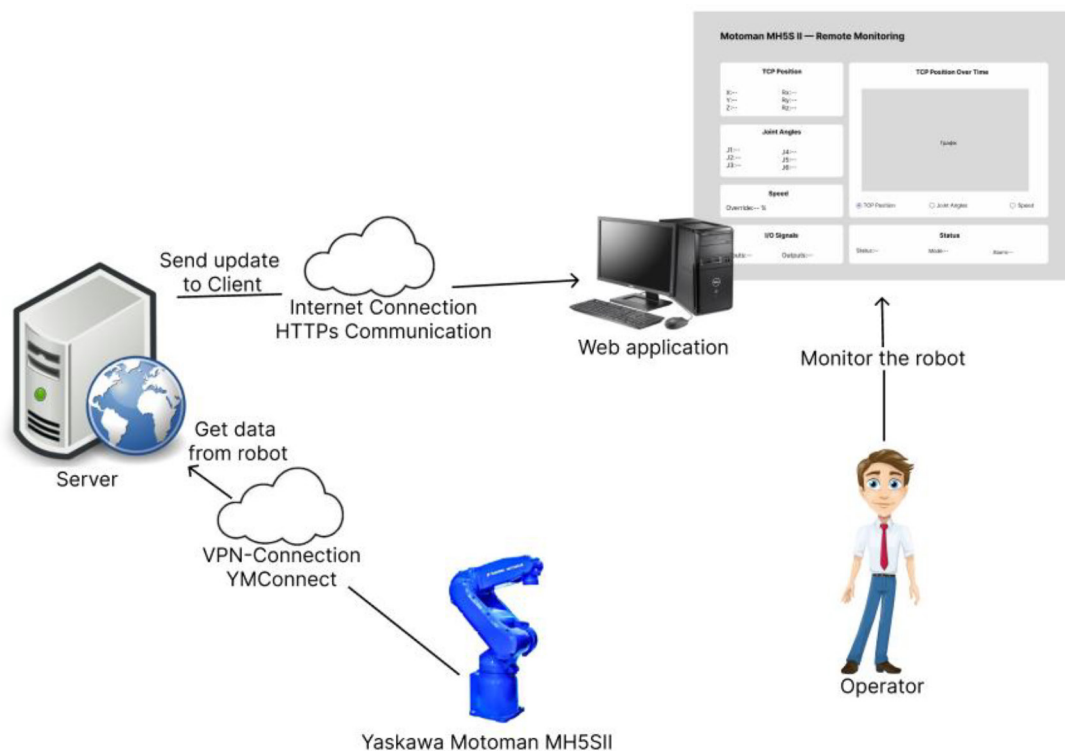


Рис. 2. Запропонована архітектура CBM

На рисунку 2 (виконано у Figma) наведено архітектуру CBM для робота Yaskawa Motoman MH5SII.

Запропонована система складається з таких компонентів:

- робот, підключений до мережі;
- сервер – backend-застосунок, який підключається до роботи через VPN;
- клієнт – вебзастосунок, який взаємодіє із сервером через HTTPs.

З'єднання VPN забезпечує безпечний доступ до внутрішньої мережі, де знаходиться робот. Сервер підключається до роботи по внутрішньому IP/порту через бібліотеку YMConnect, що надається виробником. Вебклієнт підключається до сервера по HTTPs і отримує необхідні дані. Сервер транслює дані від робота до клієнта.

Для отримання параметрів робота створено локальний сервер на C++ – RobotConnect, який встановлює з'єднання з контролером через WireGuard VPN і записує дані у JSON-файл.

Для забезпечення передачі даних від сервера RobotConnect до вебінтерфейсу було реалізовано проміжний сервер на мові програмування Python (CommunicationAPI), який відстежує оновлення JSON-файлу, зчитує їх і передає до вебінтерфейсу в реальному часі через WebSocket. Надалі цей модуль може бути використаний не тільки для передачі даних, але і для їх оброблення перед відправкою на вебсторінку.

На рисунку 3 відображено діаграму розміщення компонентів системи під час її розгортання.

Клієнтська частина реалізована у вигляді вебінтерфейсу за допомогою HTML, CSS і JavaScript (рис. 4). У заголовку сторінки зазначена модель робота, дані якого відстежуються, а також назва застосунку. Тіло сторінки розділене на дві колонки. У лівій колонці відображаються дані про положення, крутний момент, помилки сервоприводів та роботу. У правій колонці відображаються назва графіка, статус отримання даних, безпосередньо графік, вид якого можна вибирати переключенням між кнопками нижче, стан контролера та дані часу.

Розроблена CBM дозволяє аналізувати стан робототехнічної системи на основі зібраних даних, представлених у вигляді графіків: залежності положення робота від часу; залежності крутного моменту серводвигунів від часу; залежності помилки положення від часу.

Крім того, важливими для аналізу є параметр Last Data Received – час останнього отримання даних, будь-то дані про стан робота, чи повідомлення про помилку, а також параметр Latency – час затримки між надходженням даних з робота та їх візуалізацією на вебсторінці.

У разі надходження даних про помилку відповідне повідомлення відображається в полі Status, яке автоматично підсвічується червоним кольором. Аналогічний механізм візуальної індикації застосовується до полів Alarm та Error за фіксації тривожного сигналу або помилки на контролері.

З метою підтвердження ефективності розробленої CBM було проведено експериментальне

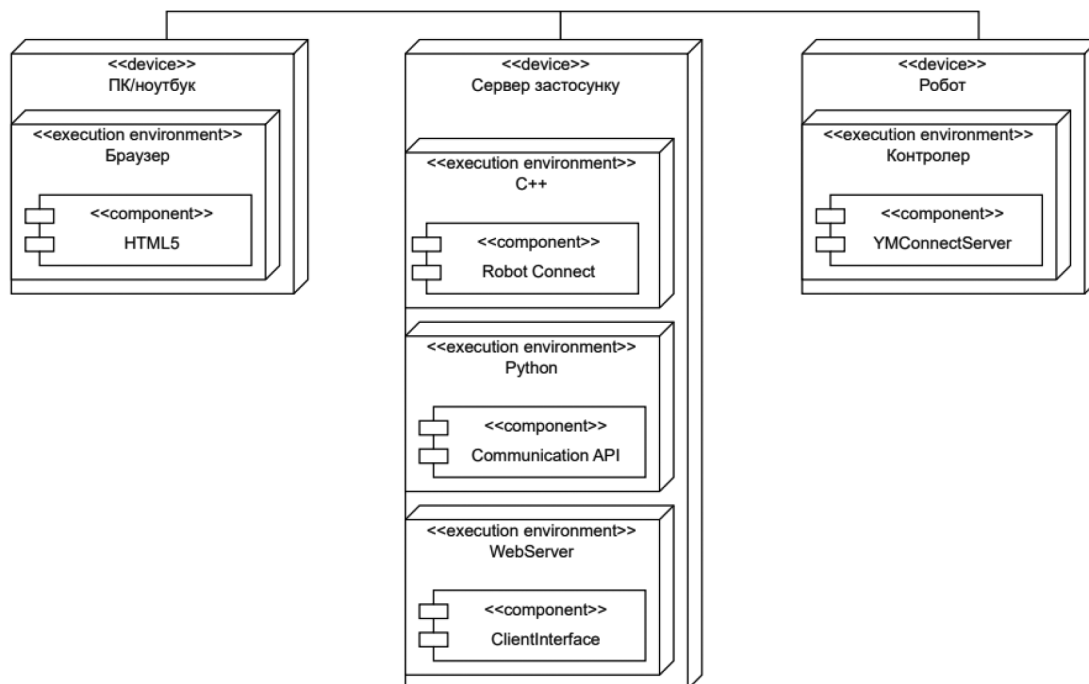


Рис. 3. Діаграма розміщення CBM

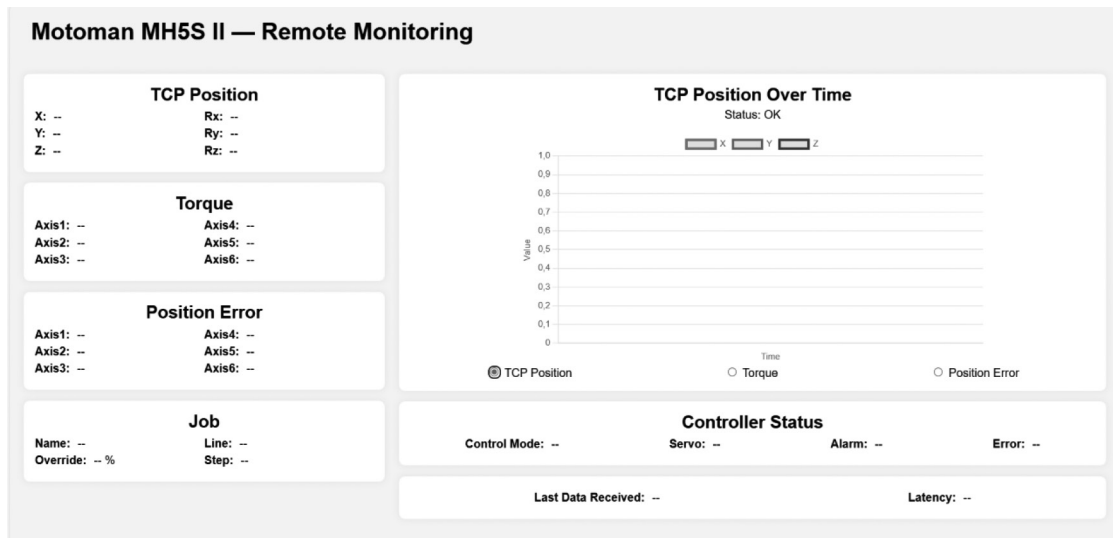


Рис. 4. Інтерфейс користувача СВМ

дослідження, спрямоване на комплексне оцінювання її функціональності, точності, стабільності та зручності використання. Тестування системи відбувалося за трьома ключовими сценаріями: моніторинг у штатному режимі роботи для перевірки відображення параметрів без збоїв, моделювання аварійної ситуації шляхом навмисного порушення траєкторії руху з генерацією помилки, а також перевірка механізму відновлення після примусового розриву VPN-з'єднання з подальшою повторною ініціалізацією.

У ході експерименту було підтверджено високу надійність системи. Встановлення стабільного VPN-з'єднання дозволило безпечно отримувати телеметричні дані, зокрема інформацію про положення робота, крутний момент осей, помилку позиціонування, а також статус контролера і виконуваної програми. Затримка між надходженням сигналу з контролера та його візуалізацією у вебінтерфейсі не перевищувала 100 мс, що є абсолютно прийнятним показником для завдань діагностики та контролю в реальному часі.

Вебінтерфейс забезпечив коректне та безперервне оновлення даних, продемонструвавши стабільну роботу на різних пристроях і в усіх тестованих браузерах (Chrome, Firefox, Edge). Відображення параметрів відбувалося з частотою оновлення 3 Гц, що є оптимальним для балансу між актуальністю інформації та навантаженням на мережу.

Окрему увагу було приділено аспектам безпеки та відмовостійкості. Увесь трафік передавався через захищений VPN-канал з використанням протоколу WireGuard, що гарантувало шифрування даних і надійну автентифікацію. Крім того, реалізований механізм автоматичного перепідключення успішно відновлював сесію

з контролером у разі тимчасової втрати з'єднання, забезпечуючи безперервність моніторингу.

Для оцінювання технічного стану механічної частини промислового робота було розроблено діагностичну методику, що ґрунтується на аналізі відносного навантаження на сервомотори за заданих швидкостей обертання осей. Основна гіпотеза полягає в тому, що деградація рухомих частин (поява додаткового тертя, механічний знос, дисбаланс) призводить до зростання моменту, необхідного для переміщення, що відображається в збільшенні навантаження на мотор.

Було створено тестову програму, в якій кожна із шести осей робота виконувала автономний рух у межах від 0 до 45° і назад. Програма забезпечувала рухи з кількома фіксованими значеннями швидкості – від 0 % до 50 % від максимальної допустимої. Для кожної осі фіксувалося максимальне значення навантаження, яке відображалось у відсотках від умовного максимуму (0–300 %), що базується на споживаному струмі двигуна.

Зібрані дані вказують на монотонне зростання навантаження на кожній осі зі збільшенням швидкості (рис. 5).

Найбільш чутливими до змін виявилися осі 3 та 5, що демонструють різке зростання навантаження в разі переходу від 25 % до 50 % швидкості. Це видно на графіку, де осі зображено окремими лініями: Axis 3 (жовта лінія) має найвищі значення навантаження.

Розроблена методика може використовуватись як основа для автоматизованої системи моніторингу стану привідних елементів промислових роботів і дозволить своєчасно виявляти зниження ефективності, попереджати аварії та планувати технічне обслуговування

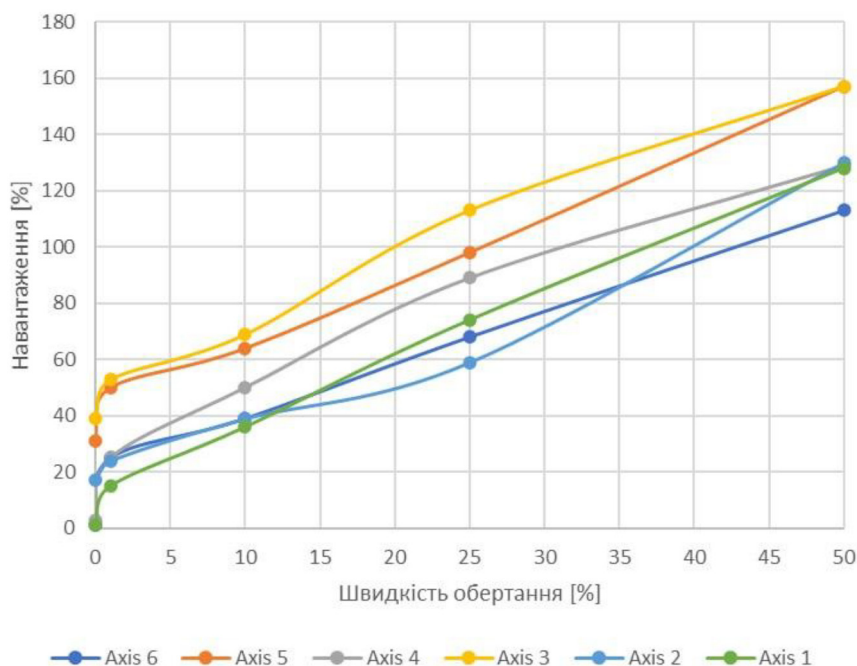


Рис. 5. Залежність навантаження на осі робота від швидкості обертання

на основі реальних даних, що зменшить простій обладнання.

Висновки. У результаті проведеного дослідження було спроектовано та реалізовано систему віддаленого моніторингу стану промислового робота Yaskawa Motoman MH5SII, яка дозволяє здійснювати візуалізацію технічних параметрів у режимі реального часу з використанням сучасних мережевих технологій та відкритих протоколів.

У роботі запропоновано архітектуру, яка базується на клієнт-серверній моделі та п'ятирівневій структурі систем віддаленого моніторингу. Особливістю реалізації є використання протоколу WireGuard VPN для захищеного підключення, а також бібліотеки YMCconnect для отримання даних з контролера робота. Комунікація між сервером і клієнтом реалізована через WebSocket, що забезпечує низьку затримку та високу продуктивність.

Проведене експериментальне дослідження підтвердило працездатність розробленої системи. Для оцінювання технічного стану механічної частини промислового робота була розроблена діагностична методика, що ґрунтується на аналізі відносного навантаження

на сервомотори за заданих швидкостей обертання осей. Її реалізація дозволить своєчасно виявляти зниження ефективності, попереджати аварії та планувати технічне обслуговування на основі реальних даних.

Подальші напрями розвитку системи:

- реалізація цифрового двійника робота з 3D-візуалізацією;
- збереження історичних даних і реалізація аналітики для виявлення аномалій;
- розширення функціоналу для підтримки кількох роботів (моніторинг флоту);
- інтеграція системи зі SCADA, MES або ERP-рішеннями на підприємствах;
- запис і збереження історії телеметрії (архівування параметрів у базу даних);
- підтримка підключення декількох роботів одночасно з централізованого серверу;
- реалізація системи сповіщень (email/Telegram/SMS) у разі виникнення аварій;
- розроблення мобільного застосунку для інженера (iOS / Android).

Завдяки відкритій архітектурі та використанню стандартних технологій зазначені вдосконалення можуть бути легко реалізовані на основі вже створеного рішення.

ЛІТЕРАТУРА:

1. ABB Connected Services URL: <https://new.abb.com/products/robotics/service/data-driven-services/connected-services> (date of access: 24.06.2025).
2. Energy.gov – Purdue Model Framework for Industrial Control Systems & Cybersecurity Segmentation. URL: https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-10/Infra_Topic_Paper_4-14_FINAL.pdf
3. FoxgloveStudio URL: <https://wiki.ros.org/FoxgloveStudio> (date of access: 24.06.2025).

4. High Speed Ethernet Server Controller Status Reading. URL: <https://knowledge.motoman.com/hc/en-us/articles/21804200504087-High-Speed-Ethernet-Server-Controller-Status-Reading> (date of access: 24.06.2025)
5. Industry 4.0. URL: <https://it-enterprise.com/knowledge-base/technology-innovation/industry-4> (date of access: 24.06.2025).
6. KUKA introduces KUKA Connect robotics software platform at IMTS URL: <https://www.automation.com/enus/products/product04/kuka-introduces-kuka-connect-robotics-software-pla> (date of access: 24.06.2025).
7. Orbit Fleet management and data analysis software for Boston Dynamics robots URL: <https://bostondynamics.com/products/orbit> (date of access: 24.06.2025).
8. What is Remote Monitoring. URL: <https://www.montblanc.ai/en/blog/what-is-remote-monitoring> (date of access: 24.06.2025).
9. YMConnect Robot Control Library. URL: <https://www.motoman.com/en-us/products/software/development/ymconnect-sd> (date of access: 24.06.2025).

REFERENCES:

1. ABB Connected Services Retrieved from: <https://new.abb.com/products/robotics/service/data-driven-services/connected-services>
2. Energy.gov – Purdue Model Framework for Industrial Control Systems & Cybersecurity Segmentation. Retrieved from: https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-10/Infra_Topic_Paper_4-14_FINAL.pdf
3. FoxgloveStudio. Retrieved from: <https://wiki.ros.org/FoxgloveStudio> (date of access: 24.06.2025)
4. High Speed Ethernet Server Controller Status Reading. Retrieved from: <https://knowledge.motoman.com/hc/en-us/articles/21804200504087-High-Speed-Ethernet-Server-Controller-Status-Reading>
5. Industry 4.0. Retrieved from: <https://www.it.ua/knowledge-base/technology-innovation/industry-4>
6. KUKA introduces KUKA Connect robotics software platform at IMTS. Retrieved from: <https://www.automation.com/enus/products/product04/kuka-introduces-kuka-connect-robotics-software-pla>
7. Orbit Fleet management and data analysis software for Boston Dynamics robots. Retrieved from: <https://bostondynamics.com/products/orbit>
8. What is Remote Monitoring. Retrieved from: <https://www.montblanc.ai/en/blog/what-is-remote-monitoring>
9. YMConnect Robot Control Library. Retrieved from: <https://www.motoman.com/en-us/products/software/development/ymconnect-sd>