

**В.В. Воротніков, д.т.н., доц.  
К.І. Матвеев, ст. викладач  
Ю.М. Россінський, к.т.н., доц.**

*Державний університет «Житомирська політехніка»*

## **Система керування технологічними процесами з використанням концепції IoT і технологій штучного інтелекту**

*Для забезпечення процесу автоматизованого керування традиційно використовують програмовані логічні контролери (PLC), робота яких базується на керуванні обладнанням на основі заздалегідь заданих умов і програм. Цей підхід заснований на жорсткому налаштуванні всіх алгоритмів під час встановлення системи. Модернізація програми PLC ускладнена необхідністю перезаписувати програмний код повністю і викликає виведення об'єкта з роботи (для систем безперервної дії та за відсутності резервування всієї системи цей факт є критичним). Автоматизація виробництва класичним підходом на PLC має високу зв'язність та жорстку залежність алгоритмів керування, тому зміни призводять до ланцюгової реакції у всій програмі, спричиняючи необхідність внесення корекції або адаптації у багатьох її частинах, що є дорогим та часоємним процесом. У виробничих середовищах є звичайною практикою уникати модернізації програмних продуктів, особливо якщо існуючі системи автоматизації працюють надійно.*

*У статті висвітлено процес розробки та впровадження комплексу програмних і апаратних засобів для функціонування системи, продемонстровано функціонування самостійного продукту на прикладі автоматизації каналізаційних насосних станцій (КНС) та доповнення до готового рішення індивідуального теплового пункту (ТТП), що розширює межі використання спеціалізованого PLC (ECL310 компанії Danfoss). Завдяки впровадженню рішення цієї об'єкт отримує покращення ефективності, оптимізацію управлінських процесів та нову систему оповіщення. Відображено налаштування Edge-пристрою віддалено, з можливістю зміни параметрів через брокер. Відповідно підвищено стабільність системи за рахунок оперативного виявлення та виправлення проблем із обладнанням, що дозволяє зменшити час його простою.*

*Запропоноване рішення дозволяє використовувати сучасні підходи до класичної автоматизації та розширювати її межі застосування.*

**Ключові слова:** програмовані логічні контролери; PLC; автоматизація; IoT; IIoT; ML; AI; Modbus; MQTT; обробка даних; індивідуальний тепловий пункт; каналізаційна насосна станція; Індустрія 4.0.

**Актуальність теми.** Для впровадження сучасних методів обробки даних і прийняття рішень класичні системи промислової автоматизації стикаються з низкою важливих проблем, що потребують вирішення.

Однією з проблем є те, що сучасні промислові системи часто використовують архітектуру Master-Slave, де Slave-пристрої нездатні самостійно ініціювати комунікацію між собою, що породжує складнощі у комунікації між пристроями. Для передачі даних від одного Slave до іншого необхідно спочатку зчитати ці дані через Master і лише потім записати їх на інший Slave. Така схема значно збільшує навантаження на Master-контролер, що може негативно впливати на стабільність і продуктивність всієї системи, ускладнюючи її управління.

У промислових протоколах передачі даних існують серйозні проблеми із забезпеченням захисту та аутентифікації. Більшість контролерів не мають належного рівня безпеки, що робить їх вразливими до несанкціонованого доступу, маніпуляцій з даними та кібератак. Відсутність надійних механізмів захисту може призвести до серйозних збоїв у роботі систем і втрати конфіденційної інформації. Тому важливим є впровадження сучасних засобів шифрування та аутентифікації для забезпечення стабільної і безпечної роботи обладнання.

Під час конструювання систем, що об'єднують дані та забезпечують комунікацію між IoT-пристроями, необхідно приділяти увагу оптимізації трафіку. Дані мають передаватися тільки в разі їх зміни, а не за фіксованими інтервалами часу, що значно зменшує навантаження на мережу та покращує ефективність системи. Крім того, важливо впровадити механізми для своєчасного виявлення збоїв або невідповідності обладнання, щоб забезпечити стабільну роботу та мінімізувати простої системи.

Відповідно рішенням для зазначених проблем може бути застосування мікросервісної архітектури, не концентрувати всі обчислювальні ресурси на одному сервісі. Переваги мікросервісної архітектури полягають у можливості незалежного масштабування, оновлення і розвитку окремих компонентів системи, підвищенні її стійкості та ефективності, а також гнучкості у виборі технологій та ресурсів для

різних мікросервісів. Це також дозволяє уникати зайвого навантаження комунікаційними функціями (кожен сервіс обробляє тільки свої дані і не забезпечує інші сервіси транспортним рівнем).

Класичні системи автоматизації є обмеженими у зборі та обробці великої кількості даних, вони спеціалізуються на контролі та керуванні обладнанням, а не на аналізі даних, не можуть використовувати інструменти аналізу даних, таких як машинне навчання або штучний інтелект. Недостатня гнучкість і масштабованість призводить до складності для змін і розширення в майбутньому. Непоодинокими є проблеми в сумісності, через використання виробниками закритих протоколів або апаратного забезпечення, що ускладнює їх розширення та інтеграцію з іншими системами. Саме тому багато компаній не практикують оптимізацію програм контролерів через страх перед ризиком та несправностями, які можуть виникнути під час впровадження нових технологій або систем у працюючу виробничу ділянку. Всі перераховані чинники є перепорою на шляху підвищення ефективності автоматичних систем управління (АСУ) та загальмували розвиток практик впровадження та модернізації систем автоматизації на виробництвах.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** За останні кілька років спостерігається зростаючий інтерес до Інтернету речей (IoT) [4]. IoT є однією з технологій з найвищими темпами розвитку, яку все більше використовують і формують різні галузі та організації, щоб реалізувати свої цілі. В результаті очікується, що IoT стане основною складовою майбутнього інтернету і залучить значну увагу як від промисловості, так і від академії через його великий потенціал надавати послуги для клієнтів у багатьох аспектах сучасного життя. IoT дозволяє взаємодію різних приладів і пристроїв з інтернетом, що дозволяє їм комунікувати та обмінюватися даними. Ця взаємопов'язана мережа пристроїв має внести значні зміни у способи життя та роботи людей.

Основною перевагою IoT є можливість збирати, агрегувати та аналізувати великі обсяги даних, що дозволяє автоматизувати різні процеси або генерувати корисні інсайти, які допомагають у процесі прийняття рішень. IoT інтегрується в різні вертикалі застосування, враховуючи розумну охорону здоров'я, розумну промисловість, автономні транспортні засоби, розумне сільське господарство та розумні міста.

Останні досягнення в галузі бездротового зв'язку та обчислювальних технологій інтегрують покращене з'єднання, збільшені пропускі здатності та швидкості передачі даних, а також комунікації з низькою затримкою. Це робить можливим з'єднання більш широкого спектра систем і пристроїв та сприяє реалізації застосунків наступного покоління IoT (NG-IoT) [5].

У цьому контексті дослідники визначили кілька ключових викликів, які потрібно вирішити:

- великі обсяги даних та кількість пристроїв. Видатною особливістю IoT є щільне розгортання великої кількості пристроїв. Ці пристрої генерують великий обсяг даних, які мають бути ефективно передані та оброблені. Концепція Big Data стосується того, як ці дані збираються, зберігаються та обробляються;

- всюди присутня бездротова мережа. Мобільні мережі забезпечують широке покриття, що дозволяє забезпечити надійний обмін даними, та є кандидатами для інфраструктури зв'язку. Однак трафік, що генерований пристроями IoT, має певні особливості та значні відмінності порівняно з трафіком, що генерований людськими комунікаціями. Тому ці атрибути мають бути враховані під час проектування та впровадження майбутніх мобільних мереж;

- взаємодія. Вказує на можливість пристроїв та додатків різних виробників працювати разом безшовно. Це вважається однією з найважливіших аспектів IoT, оскільки вона дозволяє комунікацію та обмін даними між пристроями, незалежно від виробника чи використовуваної технології. Ключовими викликами в досягненні взаємодії в області IoT є різноманітність пристроїв і протоколів, а також відсутність стандартизації в цій галузі;

- енергоефективність. Енергоефективність стосується мінімізації споживання енергії за забезпечення мінімального рівня якості обслуговування (QoS). Це є критичним фактором в IoT, оскільки більшість пристроїв мають обмежені запаси енергії. Тому зменшення витрат енергії допомагає продовжити їхній час роботи. Крім того, досягнення високого рівня енергоефективності може ефективно зменшити загальне енергоспоживання мережі;

- безпека даних. Застереження щодо кібербезпеки враховують заходи, призначені для захисту пристроїв, даних та мереж від несанкціонованого доступу та кібератак, таких як атаки типу «посередник», підроблення пристроїв та атаки типу «відмова в обслуговуванні». Кібербезпека стала серйозною проблемою через зростаючу кількість пристроїв IoT. Крім того, обмежені обчислювальні можливості пристроїв IoT роблять впровадження високотехнологічних кіберзаходів важким завданням.

Для вирішення зазначених викликів виникло кілька технологій, однією з яких є цифровий близнюк. Концепція цифрового близнюка дозволяє цифрове представлення фізичного об'єкта чи системи. Цифровий близнюк створюється, накопичуючи дані від датчиків на фізичному пристрої чи системі та використовуючи ці дані для створення віртуальної моделі реального пристрою чи системи [7]. Цифрова система існує поруч з фізичною, оскільки ці дві системи пов'язані надійними та швидкими зв'язками.

Передача даних у реальному часі між фізичними та цифровими системами забезпечує синхронізовану та злагоджену роботу фізичних та віртуальних еквівалентів [1].

Це дозволяє реалізувати різноманітні сценарії моделювання та аналізу за допомогою цієї моделі для оцінки можливих результатів до їх фактичного застосування в реальному світі. З цього погляду цифрові близнюки можуть бути використані для створення цифрових представлень пристроїв та/або мереж Інтернету речей з метою моніторингу, управління та оцінки продуктивності пристрою / системи в реальному часі. Цифрові близнюки можуть бути використані в різноманітних застосунках та сценаріях, враховуючи [1, 7]:

- віртуальне проектування. Цифровий близнюк може бути використаний для тестування та оцінки різних варіантів конструкції, що призводить до оптимального проекту фінального продукту перед його виготовленням. Це може ефективно скоротити час виробництва та пов'язані витрати на тестування;

- прогнозування обслуговування. Спостерігаючи за роботою пристрою чи системи з плином часу, цифровий близнюк може бути використаний для прогнозування моменту потреби в обслуговуванні та для планування обслуговування в найоптимальніший час. Крім того, можна симулювати різні сценарії, задаючи різні параметри та створюючи нестандартні ситуації, щоб знайти найкращий варіант дій щодо обслуговування об'єкта;

- автоматизація будівель. Зазвичай автоматизація інженерних систем будівель складається з компонентів з різних галузей, враховуючи вентиляцію, опалення, енергетику, механіку та сантехніку. Цифровий близнюк будівлі або комплексу будівель дозволяє перевірити сумісність роботи інженерних систем шляхом моделювання впливів, виявлення аномалій у роботі, особливостей використання та необхідності прийняття інженерних рішень до побудови об'єкта. Це дозволяє заощадити час та кошти на виправлення потенційних проблем, що могли бути виявлені після монтажу, якщо вони пов'язані з їх функціонуванням або неузгодженістю систем.

**Метою статті** є презентація системи керування технологічними процесами запроєктованими по класичній схемі автоматизації з використанням PLC шляхом організації зв'язку, побудованого на основі концепції IoT з можливістю використовувати технології штучного інтелекту, машинного навчання та аналітики в комплексі, що є необхідним для створення підприємства Індустрії 4.0 [3].

**Викладення основного матеріалу.** Однією з важливих характеристик систем Інтернету речей є можливість аналізу та обробки великих обсягів даних. Застосування алгоритмів машинного навчання та штучного інтелекту дозволяє виявляти закономірності, прогнозувати події та ухвалювати обґрунтовані рішення для покращення та оптимізації роботи системи.

Інтеграція ІОТ та систем промислової автоматизації надають механізм для вирішення проблем оптимізації потужності генеруючого та насосного обладнання, зменшення навантаження на мережі та покращення ефективності.

Таким чином, розширення функціоналу промислового обладнання через його інтеграцію як елемента ІоТ дозволить:

- отримати унікальну систему ідентифікації обладнання на підприємстві та наскрізну доступність даних;

- перетворити все обладнання разом з підприємством на дані, зв'язані між собою, що дозволяє передачу даних у реальному часі між фізичними та цифровими системами, забезпечуючи синхронізовану та злагоджену роботу фізичних та віртуальних еквівалентів [1];

- застосувати системний підхід [2] в побудові інформаційного обміну між компонентами системи та виконати цифрову трансформацію промислового обладнання, що забезпечить відстеження технологічних процесів, що є необхідним для створення підприємства Індустрії 4.0 [3];

- впровадити сучасні технології (цифровий близнюк, віртуальне проектування, прогнозування, автоматизація будівель, наскрізна доступність даних, машинне навчання, штучний інтелект).

Вибір ІоТ-протоколу, який відповідає потребам клієнта, є важливим завданням. Виробники виявляють, що поєднання потужності промислового зв'язку Modbus з відкритим вихідним кодом і потужності MQTT, який більше підходить для випадків використання ІоТ, є дуже ефективним.

І Modbus TCP (типову структурну схему наведено на рисунку 1) і MQTT (типову структурну схему наведено на рисунку 2) мають переваги та недоліки. Зважування цих відмінностей і конкретних потреб у розгортанні виробництва допоможе визначити, яку з них застосувати в конкретному випадку та як їх комбінувати за необхідності. У випадку, коли об'єднання цих даних має сенс, ми можемо об'єднати дані між двома системами, щоб отримати найкраще з обох світів.

Як бачимо на рисунку 1, для реалізації обміну даними потрібно розділяти пристрої, яким доступні комунікаційні можливості за допомогою Ethernet та пристрої з послідовними інтерфейсами.

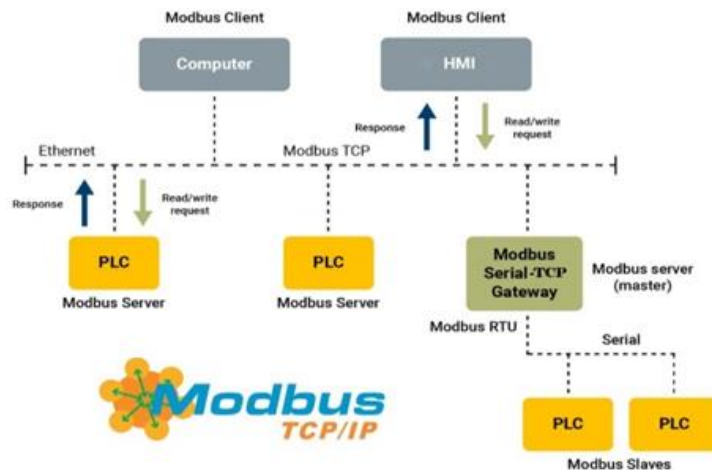


Рис. 1. Обмін даними між пристроями Modbus TCP [8]

Для Ethernet-пристроїв використовуючи VPN та програмний код (в даній роботі має назву «драйвер пристрою»), завдання якого опитувати пристрій, формувати повідомлення до брокера та отримані повідомлення надсилати на пристрій.

Існує два підходи до роботи з пристроями з точки зору виконання роботи драйвера.

Перший варіант – драйвер є програмним кодом та знаходиться на стороні сервера обробки. Перевагою цього підходу є відсутність додаткових периферійних пристроїв та необхідності їх обслуговувати, можливість заміни програмного забезпечення без потреби в оновленні пристроїв, легка модифікація, можливість використання децентралізації та хмарних сервісів.

Недоліком такого підходу є великий обмін даними, наявність затримок, втрата даних при відсутності зв'язку з обладнанням.

Другий варіант – драйвер є програмно-апаратним та знаходиться на стороні обладнання.

Перевагою даного підходу є мінімальний обмін даними, відсутність втрати даних (наявність буферизації на випадок зникнення зв'язку), можливість обробки даних на місці, що зменшує навантаження на систему в цілому і додає стабільності за рахунок певної автономності пристроїв.

Недоліком цього підходу є наявність додаткового обладнання, необхідність його адміністрування та обслуговування, оновлення відбувається складніше та веде до більших економічних витрат.

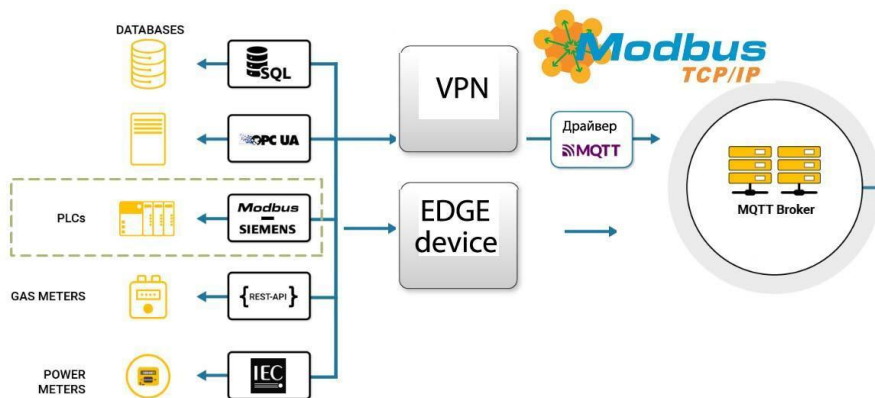


Рис. 2. Типова структурна схема опитування пристроїв [8]

Брокери даних MQTT відіграють життєво важливу роль у забезпеченні того, що дані збираються та доступні для розширених екземплярів, що дозволяє організаціям отримати повну вигоду від технологій Industry 4.0 та ІІоТ. Принцип наскрізної конвертації Modbus в MQTT представлено на рисунку 3.

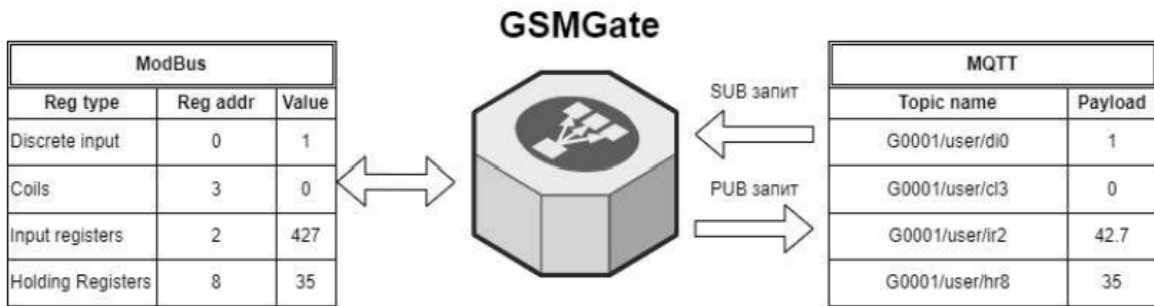


Рис. 3. Принцип наскрізної конвертації Modbus в MQTT повідомлень [9]

Незалежно від того, чи виконується драйвер на апаратному Edge-пристрої і туманній зоні на краю, чи в програмному коді на сервері, його завдання – узгодження рівня комунікації і перетворення пакетів.

**Використання єдиного середовища для обміну даними та безпека комунікації.**

Забезпечення безпеки в сучасному світі стає дедалі важливішим завданням, оскільки зростає кількість підключених пристроїв. Для забезпечення конфіденційності та доступності даних використовуються два основні підходи: використання VPN та шифрування через MQTT брокера.

По-перше, VPN надає безпечне з'єднання між пристроями та серверами, використовуючи шифрування трафіка. Це дозволяє попереджати можливі атаки від третіх осіб та забезпечує конфіденційність даних під час їх передачі між пристроями та обліковими записами користувачів.

По-друге, використання MQTT брокера для шифрування даних забезпечує додатковий рівень безпеки в IoT-системах та зручну схему обміну (рис. 4–5). Використовуються різні протоколи шифрування для захисту, передачі інформації від несанкціонованого доступу та перехоплення. Цей підхід надає комплексний механізм захисту, що забезпечує високий ступінь безпеки та довіри в мережах IoT.

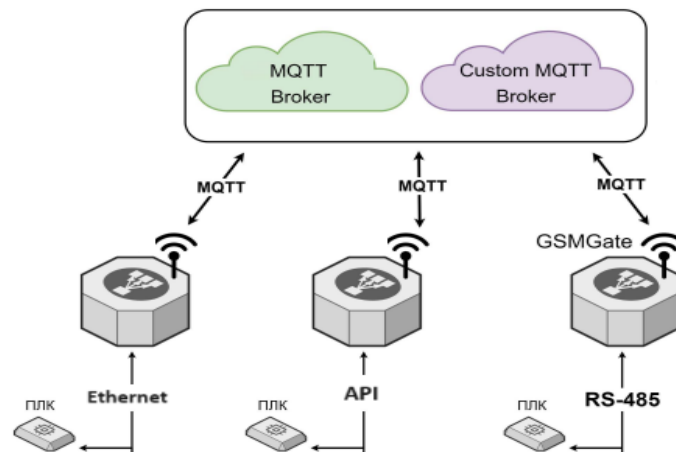


Рис. 4. Схема обміну за допомогою MQTT, використовуючи різні джерела даних та підходи до використання апаратних засобів [9]

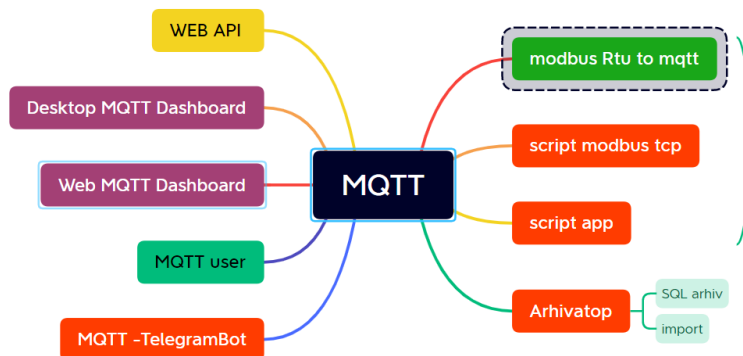
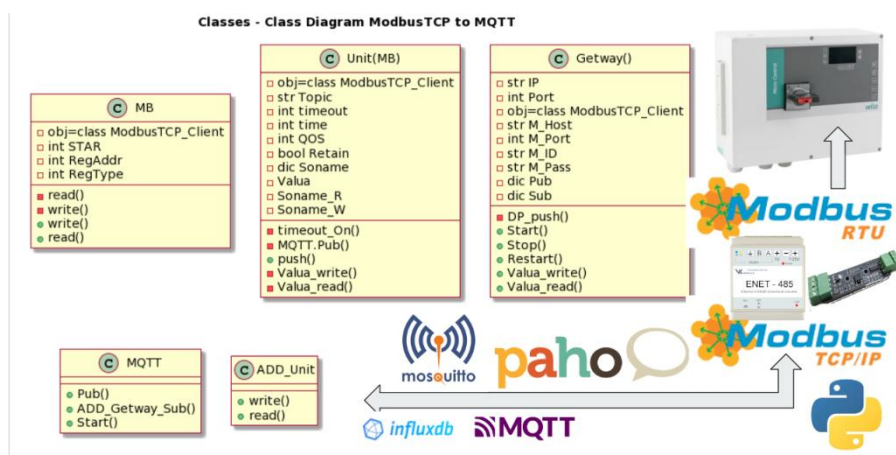


Рис. 5. Принципова схема обміну між компонентами системи за допомогою MQTT

Для організації програмно-апаратного комплексу використовують Edge-пристрої, побудовані на базі одноплатних комп'ютерів або контролерів зі спеціалізованим програмним забезпеченням. Принцип, закладений у схемах, що зображені на рисунках 6–7, можна використовувати до різних протоколів та інтерфейсів, тим самим поєднувати всі дані, утворюючи озера даних. Порівняти архітектури можна розглянувши рисунки 17–18.



Рис. 6. Схема побудови інтеграції Modbus-пристрою з MQTT за допомогою Edge-пристрою



Обробку даних розділено за принципом використання та взаємодії з оператором:

- відображення та операторське керування, що дозволяють, використовуючи програми, спостерігати за перебігом технологічного процесу та виконувати операторське втручання;
- автоматизація, що дозволяє виконувати сценарії за допомогою програмування, або блок діаграм для обробки потоків даних;
- збереження архівів та побудова AI з використанням ML, що дозволяє використовувати цифрового близнюка, виконувати моделювання та прогнозування реакції системи на різні зовнішні впливи. Виконувати аналітичне дослідження та зіставляти отримані результати з даними в реальному часі.

Використання ботів-помічників доводить ефективність і переваги в сучасних умовах. Варто запровадити ботів-помічників для автоматизації оповіщень та оперативного керування. Вони вже продемонстрували свою високу ефективність, поступаючись лише телефонним дзвінкам у швидкості реагування. Автоматичні акаунти здатні виконувати різні завдання, що робить їх незамінним інструментом у багатьох сферах діяльності. Таким чином, впровадження ботів-помічників – це практичне рішення для підвищення ефективності роботи та пришвидшення прийняття рішень.

**Реалізація проєкту та приклади використання запропонованого рішення для моніторингу та управління.**

Демонстрація роботи системи на каналізаційній насосній станції (КНС) (рис. 8–9).



Рис. 8. КНС заглибленого типу та шафи керування

На цьому об'єкті застосовано Edge-пристрій з вбудованим GSM-модемом, що дозволяє опитувати пристрій та забезпечувати обмін інформації з брокером.

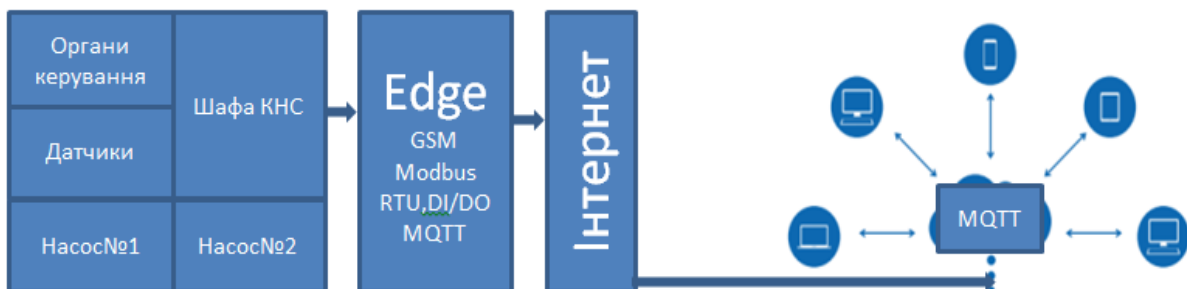


Рис. 9. Блок-схема побудови системи диспетчеризації та дистанційного керування КНС

Дані по роботі КНС були отримані MQTT broker Eclipse Mosquitto – це брокер повідомлень з відкритим кодом (з ліцензією EPL/EDL), який реалізує протокол MQTT версій 5.0, 3.1.1 і 3.1. Mosquitto підходить для використання на всіх пристроях, від одноплатних комп'ютерів з низькою потужністю до повноцінних серверів.

Даний об'єкт, завдяки використанню Edge-пристрою, отримує додатково такий функціонал:

- можливість відслідковувати, масштабувати значення параметрів, зіставляти їх з попередньо переданими даними та при відхиленнях менших дельти коливань, що визначається для кожного значення індивідуально, не дублює значення, що дозволяє економити трафік;
- дозволить виконувати віддалені керування (відкриття шлагбаума на в'їзд), має додатковий релейний вихід, яким дозволяє керувати за бажанням;
- можливість формувати сигнали повідомлення та виконувати їх розсилання;
- надавати статистику роботи системи та каналів зв'язку (кількість отриманих та переданих даних, помилок та реконектів).

Налаштування Edge-пристрою відбувається шляхом публікації в брокер певним чином сформованих топиків, що дозволяє керувати об'єктом без необхідності відвідування для налаштувань. Приклад інтерфейсу при роботі з брокером представлено на рисунках 10–11.

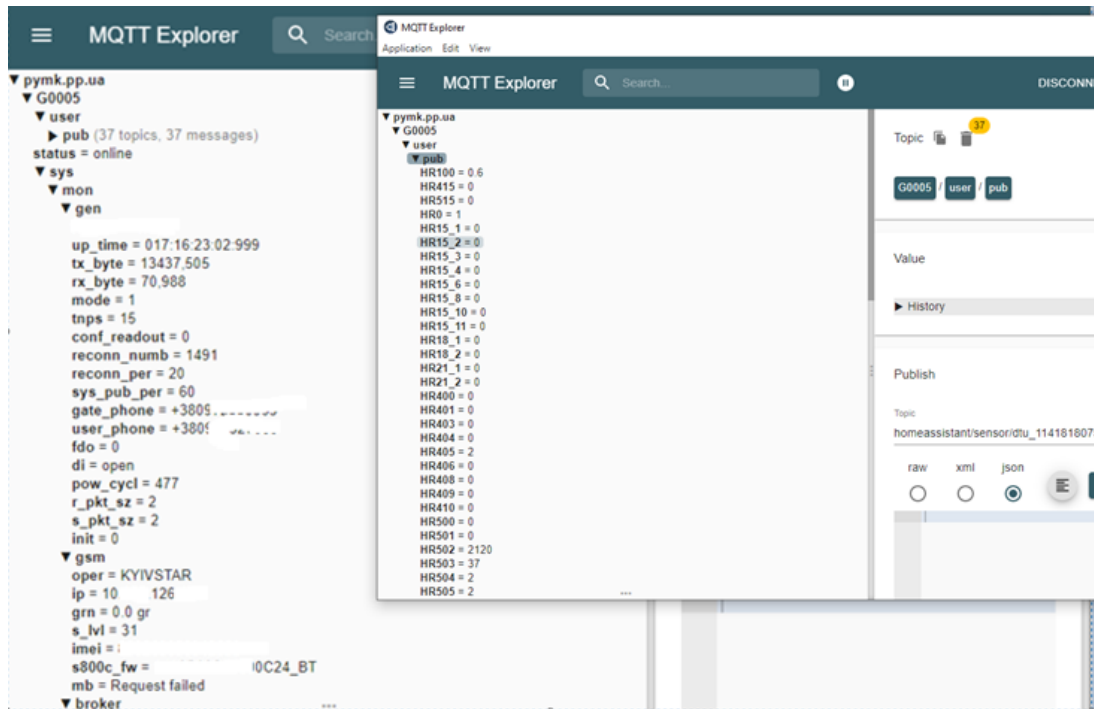


Рис. 10. Видяг системних топiк Edge пристрою керування КНС

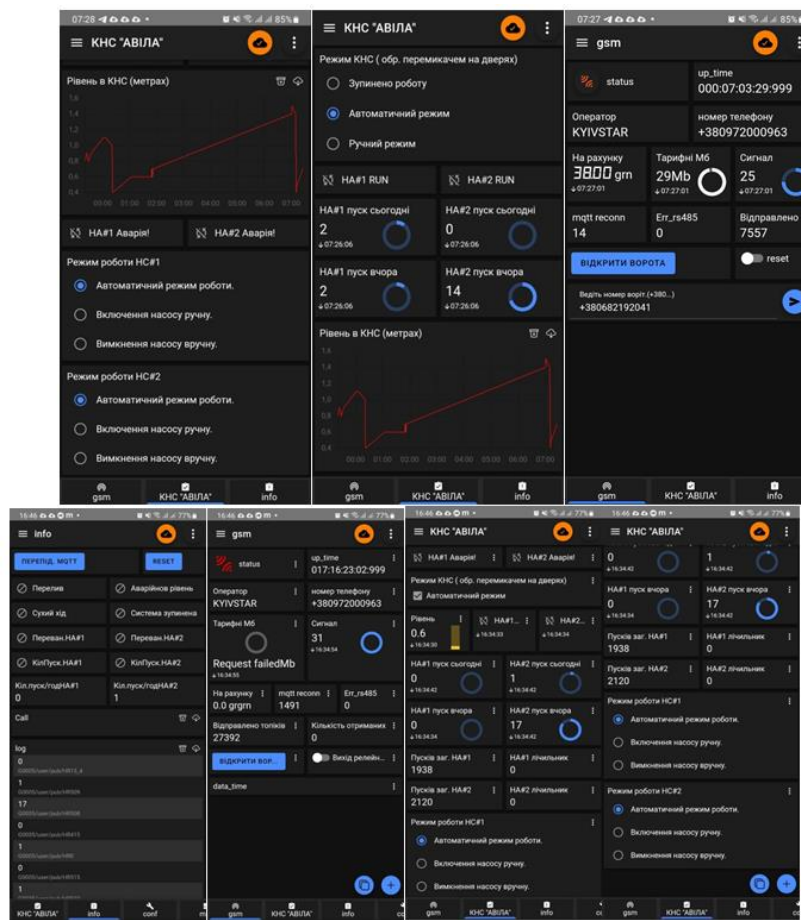


Рис. 11. Видяг сконфігурованого застосунку Панель IoT MQTT



Для попередження несправностей задіяна сигналізація, яка реагує на втрату зв'язку та аварії, повідомляючи обслуговуючий персонал про подію.

Для дослідження цього об'єкта показники архівуються в базу даних та файл csv, аналізуються для подальших розрахунків за допомогою певних макросів, що дозволяють вирахувати аномалію в роботі та попередити передчасний вихід з ладу обладнання.

**Демонстрація роботи системи індивідуального теплового пункту (ІТП) будинку представлено на рисунках 12–13.**



Рис. 12. ІТП багатоквартирного будинку

На цьому об'єкті застосовано контролер (ECL310 – це контролер для керування ІТП з різними схемами та конфігураціями, обладнаний програмним забезпеченням із закритим кодом) з вбудованим Modbus TCP, що дозволяє опитувати пристрій та за допомогою розробленого драйвера (в рамках цієї роботи) забезпечувати обмін інформації з брокером. Як сервіс до контролера на платній основі доступні засоби для обробки та диспетчеризації із закритим вихідним кодом та відсутністю інтеграцій та API для стороннього обладнання. Доступ до обладнання виконується штатними засобами за допомогою WEB та APP додатка (ECL Portal Всі права належать компанії Danfoss A/S, Данія).

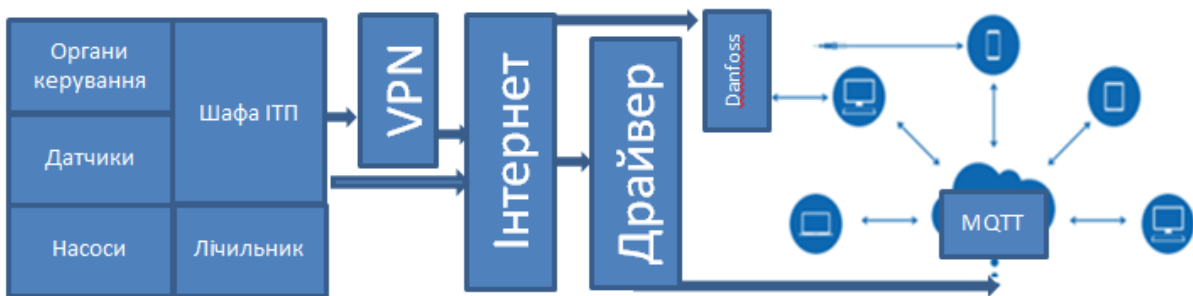


Рис. 13. Блок-схема побудови системи диспетчеризації та дистанційного керування ІТП з використанням вбудованих можливостей та розширення функціоналу за допомогою ІОТ

Цей об'єкт, завдяки використанню контролера ECL310, дозволяє керувати системою через web-портал та мобільний застосунок, та має дуже широкий функціонал:

- виконує комплексне керування тепловим пунктом, збір та зберігання параметрів (Зроки), оптимізацію трафіка за рахунок стискання та нормалізації показів (економить трафік);
- дозволяє виконувати віддалене керування, налаштування, аналіз у вигляді графіків та формування звітів;
- формує сигнали повідомлення та виконує їх розсилання на електронну пошту;
- дозволяє адмініструвати користувачів та надавати різні права доступу.

На рисунках 14–15 відображено зовнішній вигляд інтерфейсів WEB та APP застосунку.

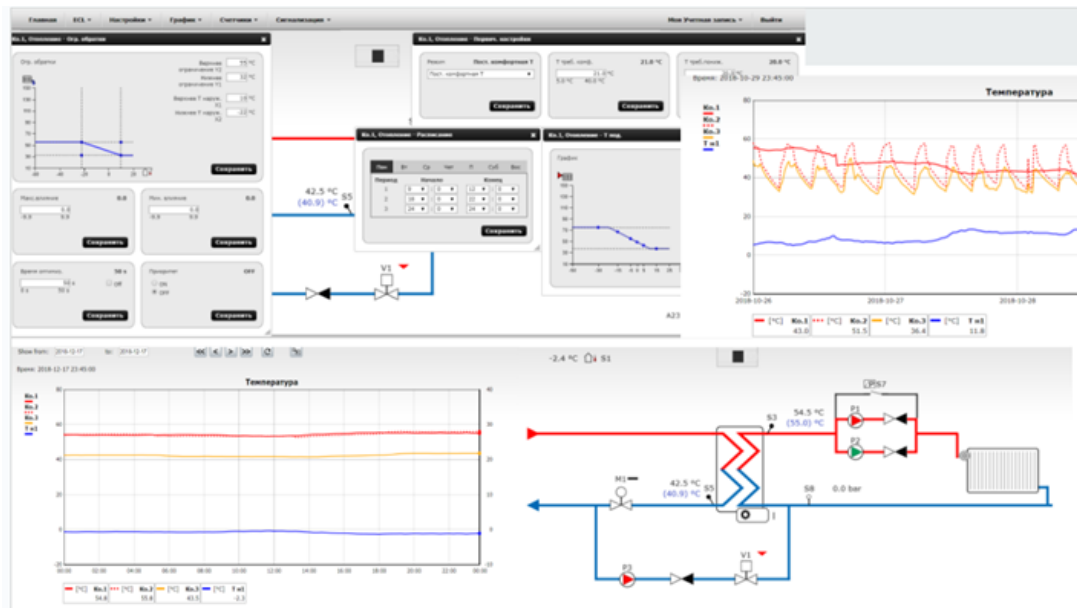


Рис. 14. Вигляд вікон web-застосунку, розробленого компанією «Danfoss A/S», Данія [10]

З огляду на можливості програмної реалізації функцій компанією «Danfoss» на даному етапі відсутня необхідність дублювання існуючих функцій, і використовується програмне забезпечення від виробника, але з'являється потреба в забезпеченні додаткових функцій, рішення якої покладено на продукт, продемонстрований в межах цієї конкурсної роботи.

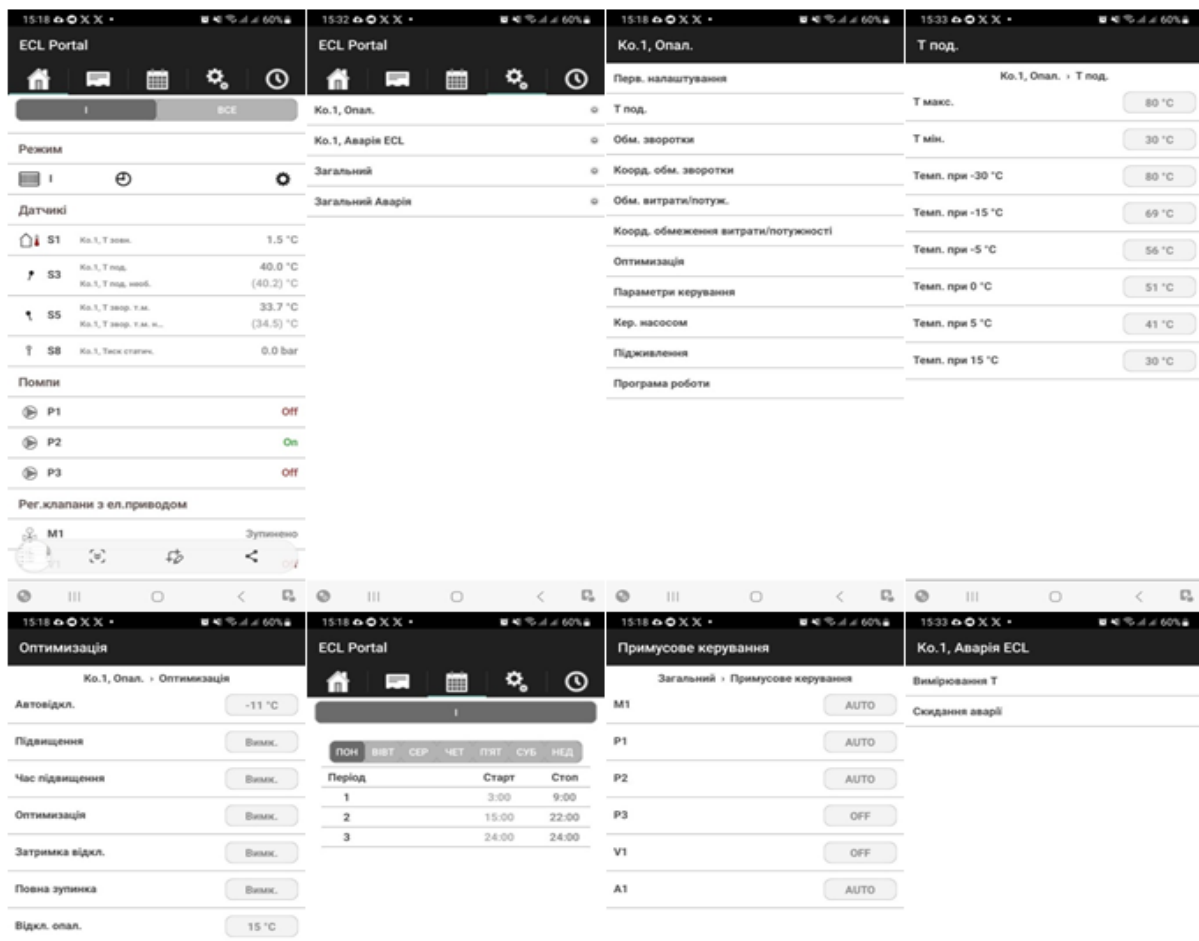


Рис. 15. Вигляд вікон APP застосунку, розробленого компанією «Danfoss»

Для обслуговування обладнання як одиничного проекту реалізований функціонал задовольняє всі вимоги та є достатнім для керівників сервісної організації та голів ОСББ, але якщо використовувати таке обладнання комплексно, виникає ряд проблем через відсутність інтеграції програмного забезпечення та можливості групового керування.

Доповнена програма дозволяє усунути всі недоліки в користуванні та додати функціонал, що комплексно дозволяє використати обладнання як елемент ІоТ, не втрачаючи існуючий функціонал. Додати інтеграцію з будь-яким новим пристроєм ІоТ, забезпечити групове опитування чи розсилання команди на зупинку не проблема, як і отримання сервісних повідомлень.

Демонстрація реалізації мінімального функціонала в системних повідомленнях Telegram наведена на рисунку 16.

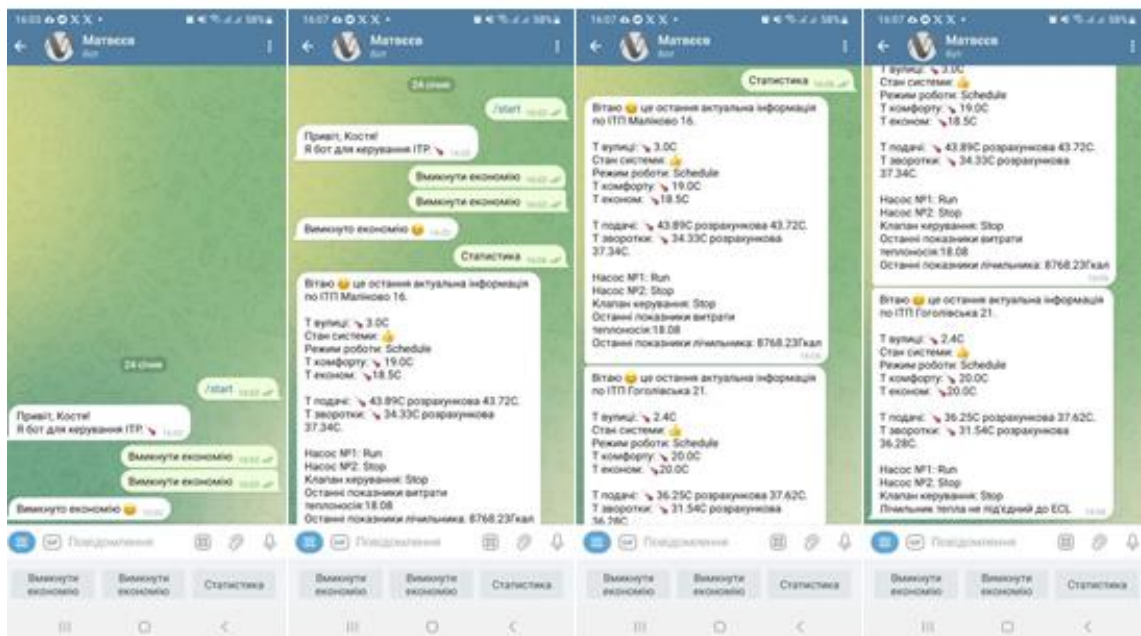
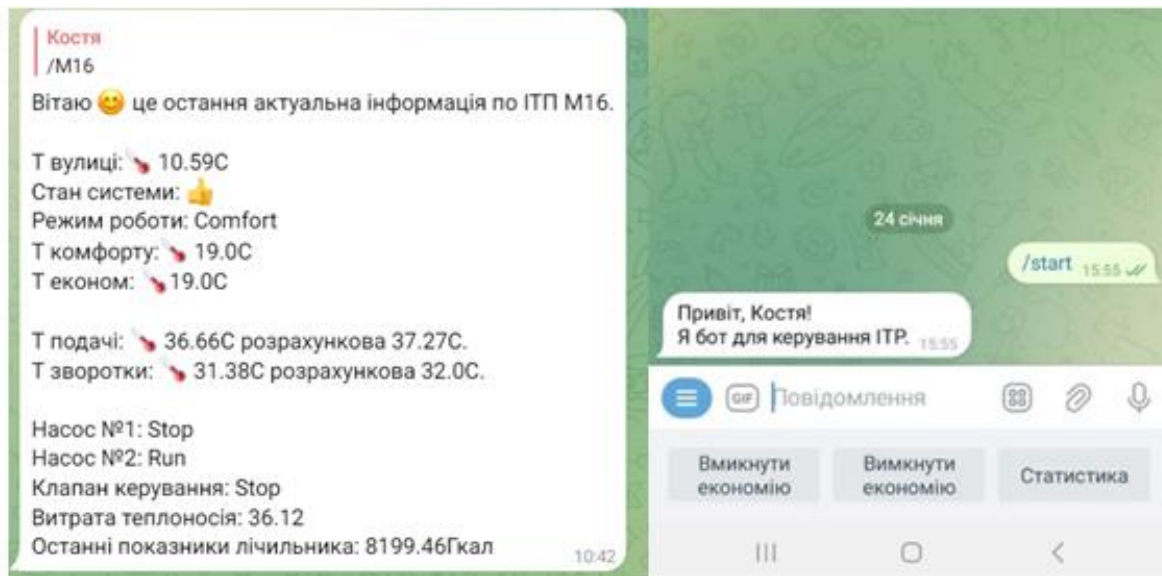


Рис. 16. Вигляд діалогу керування за допомогою Telegram-Вот

Аналіз роботи обладнання дозволяє позбутися стереотипів при проектуванні та виконувати підбір і аналіз обладнання, опираючись на отриману аналітику. Як результат вторинна економія на придбанні та експлуатації основного обладнання при модернізації.

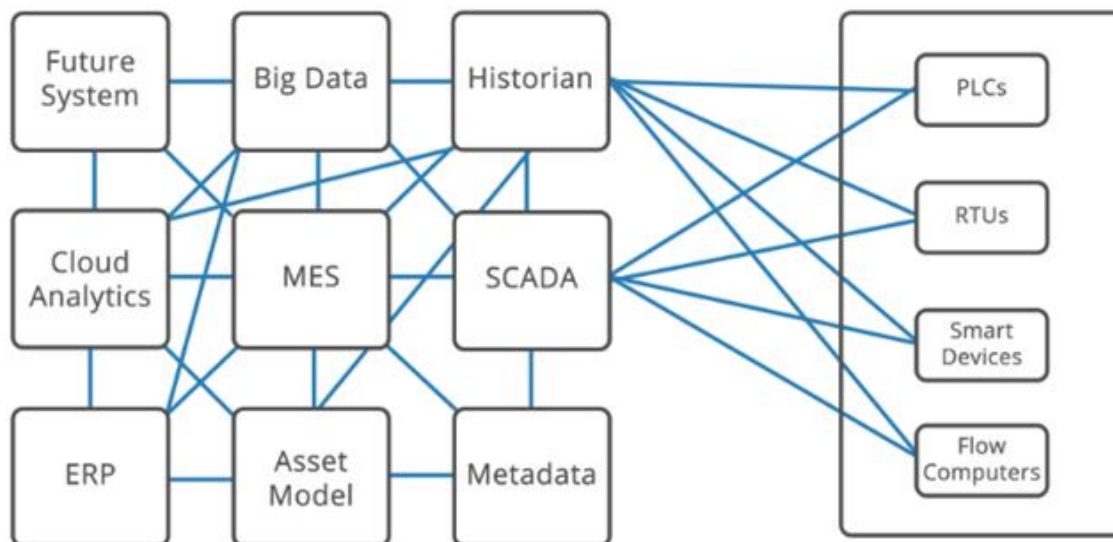


Рис. 17. Вигляд архітектури зі зв'язками класичних систем автоматизації [11]

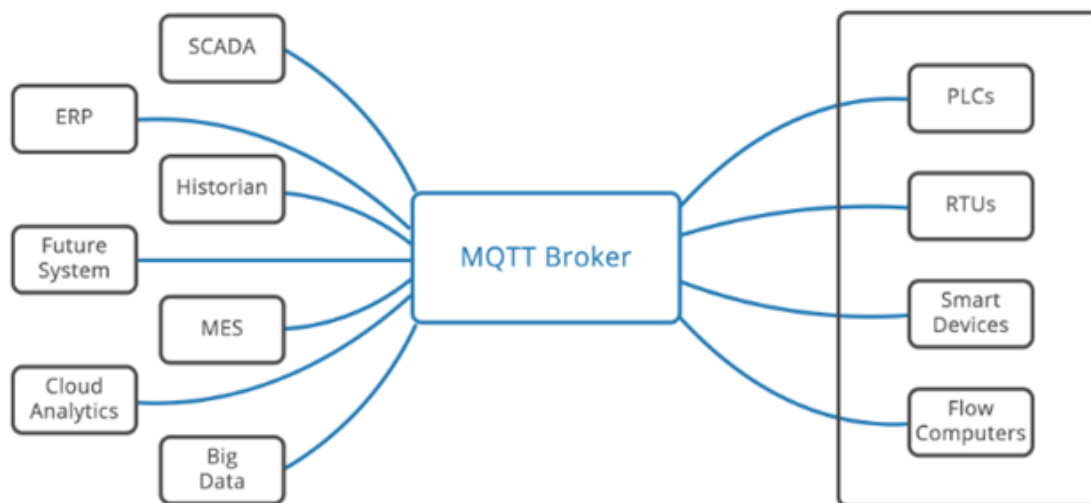


Рис. 18. Вигляд архітектури зі зв'язками IOT-систем автоматизації

**Висновки та перспективи подальших досліджень.** За результатами дослідження встановлено, що розроблений комплекс програмних та апаратних засобів для системи управління технологічними процесами на основі концепції IoT забезпечує високий рівень продуктивності та ефективності. Це дозволяє автоматизувати процеси, покращуючи контроль за станом обладнання та знижуючи витрати на енергоресурси.

Визначено, що використання відкритого та вільного програмного забезпечення сприяє доступності проекту для широкого кола користувачів, що підвищує його популярність та підтримку. Проведено оцінку функціонування розробленого рішення на прикладі автоматизації КНС, що підтвердило надійність та ефективність системи.

Розроблено промислово придатний зразок системи, що продемонстрував можливість віддаленого керування та налаштування, а також аналізу даних за допомогою технологій штучного інтелекту та машинного навчання.

У подальшому наукові дослідження будуть спрямовані на розвиток нових алгоритмів для обробки даних та використання хмарних технологій для підвищення ефективності контролю функціонування технологічних процесів.

#### Список використаної літератури:

1. Digital twins: A survey on enabling technologies, challenges, trends and future prospects / S.Mihai et al. // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2022. – Vol. 24, No. 4. – P. 2255–2291. DOI: 10.1109/COMST.2022.3208773.

2. Бродський Ю.Б. Системний аналіз та теорія прийняття рішень : навч. посіб. : в 3 ч. / Ю.Б. Бродський. – Житомир : Житомирська політехніка, 2022. – Ч. 1. Системологія. – 92 с.
3. Ortiz J.H. Industry 4.0 Current Status and Future Trends Edited / J.H. Ortiz. – London, United Kingdom, 2020. – P. 19–81.
4. Analytics every-where: Generating insights from the internet of things / H.Cao, M.Wachowicz, C.Renso, E.Carlini // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – P. 71749–71769. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2919514.
5. Building a roadmap for the next generation inter-net of things: Research, innovation and implementation 2021–2027 / NG-IoT Consortium. – 2019.
6. Акінишина О.В. Основні засади комплексного підходу до проблеми енергозбереження / О.В. Акінишина, А.І. Третякова [Електронний ресурс]. – Режим доступу : [www.academy.gov.ua](http://www.academy.gov.ua).
7. Minerva R. Digital twin in the IoT context:A survey on technical features, scenarios, and architectural models / R.Minerva, G.M. Lee, N.Crespi // Proceedings of the IEEE. – 2020. – Vol. 108, No. 10. – P. 1785–1824. DOI: 10.1109/JPROC.2020.2998530.
8. Modbus TCP to MQTT for IoT/IIoT Data Interoperability / HiveMQ. – 2024 [Electronic resource]. – Access mode : <https://www.hivemq.com/blog/modbus-tcp-to-mqtt-for-iiot-data-interoperability/>.
9. GSM Gate Manual / Certa [Electronic resource]. – Access mode : [http://certa.com.ua/downloads/GSMGate\\_manual.pdf](http://certa.com.ua/downloads/GSMGate_manual.pdf).
10. Danfoss ECL Portal / Danfoss [Electronic resource]. – Access mode : <https://ecl.portal.danfoss.com/login/auth?lang=ua>.
11. Sparkplug Specification / Eclipse Foundation [Electronic resource]. – Access mode : <https://sparkplug.eclipse.org/>.

#### References:

1. Mihai, S. et al. (2022), «Digital twins: A survey on enabling technologies, challenges, trends and future prospects», *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol. 24, No. 4, pp. 2255–2291, doi: 10.1109/COMST.2022.3208773.
2. Brodskiy, Yu.B. (2022), *Systemnyi analiz ta teoriia pryiniattia rishen*, navch. posib., v 3 ch., Zhytomyrska politekhnika, Zhytomyr, Part 1. Systemolohiia, 92 p.
3. Ortiz, J.H. (2020), *Industry 4.0 Current Status and Future Trends Edited*, United Kingdom, London, pp. 19–81.
4. Cao, H., Wachowicz, M., Renso, C. and Carlini, E. (2019), «Analytics every-where: Generating insights from the internet of things», *IEEE Access*, Vol. 7, pp. 71749–71769, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2919514.
5. Building a roadmap for the next generation inter-net of things: Research, innovation and implementation 2021–2027 (2019), *NG-IoT Consortium*.
6. Akinshyna, O.V. and Tretiakova, A.I., «Osnovni zasady kompleksnoho pidkhodu do problemy enerhozberezhennia», [Online], available at: [www.academy.gov.ua](http://www.academy.gov.ua)
7. Minerva, R., Lee, G.M. and Crespi, N. (2020), «Digital twin in the IoT context:A survey on technical features, scenarios, and architectural models», *Proceedings of the IEEE*, Vol. 108, No. 10, pp. 1785–1824, doi: 10.1109/JPROC.2020.2998530.
8. «Modbus TCP to MQTT for IoT/IIoT Data Interoperability» (2024), *HiveMQ*, [Online], available at: <https://www.hivemq.com/blog/modbus-tcp-to-mqtt-for-iiot-data-interoperability/>
9. Certa, «GSM Gate Manual», [Online], available at: [http://certa.com.ua/downloads/GSMGate\\_manual.pdf](http://certa.com.ua/downloads/GSMGate_manual.pdf)
10. «Danfoss ECL Portal», *Danfoss*, [Online], available at: <https://ecl.portal.danfoss.com/login/auth?lang=ua>
11. Eclipse Foundation, «Sparkplug Specification», [Online], available at: <https://sparkplug.eclipse.org/>

**Воротніков** Володимир Володимирович – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри комп’ютерної інженерії та кібербезпеки Державного університету «Житомирська політехніка».  
<https://orcid.org/0000-0001-8584-3901>.

Наукові інтереси:

- комп’ютерні мережі та мережні технології;
- мережна безпека;
- кібербезпека;
- керування складними інформаційними системами.

**Матвєєв** Костянтин Ігорович – старший викладач кафедри комп’ютерної інженерії та кібербезпеки Державного університету «Житомирська політехніка».  
<https://orcid.org/0009-0004-4594-6956>.

Наукові інтереси:

- індустріальний Інтернет речей (IIoT);
- автоматизація технологічних процесів;
- системи теплопостачання та насосного обладнання;
- відновлювані джерела енергії;
- аналіз даних та системи моніторингу;
- комп’ютерно-інтегровані технології, розумні будівлі, системна інженерія.

**Россінський** Юрій Михайлович – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри комп’ютерної інженерії та кібербезпеки Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0009-0009-6767-6666>.

Наукові інтереси:

- комп’ютерна графіка;
- програмування;
- кібербезпека програмного забезпечення.

**Vorotnikov V.V., Matvieiev K.I., Rossinskyi Yu.M.**

#### **Process management system using the IoT concept and artificial intelligence technologies**

To ensure the automated control process, programmable logic controllers (PLC) are traditionally used, whose operation is based on controlling equipment based on pre-set conditions and programs. This approach is based on strict configuration of all algorithms during system installation. Upgrading the PLC program is complicated by the need to overwrite the program code completely and causes the object to be disabled (for continuous systems and in the absence of redundancy of the entire system, this fact is critical). Automation of production by the classical approach on PLC has high connectivity and strict dependence of control algorithms, so changes lead to a chain reaction throughout the program, causing the need to make corrections or adaptations in many parts of it, which is an expensive and time-consuming process. In production environments, it is common practice to avoid upgrading software products, especially if existing automation systems work reliably.

The article highlights the process of developing and implementing a set of software and hardware tools for the functioning of the system, demonstrates the functioning of an independent product on the example of automation of sewage pumping stations (CNS) and additions to the ready-made solution of an individual heat point (ITP), which expands the boundaries of using a specialized PLC (Danfoss ECL310). Thanks to the implementation of the solution, this facility receives efficiency improvements, optimization of management processes and a new notification system. The Edge device settings are displayed remotely, with the ability to change parameters via the broker. Accordingly, the stability of the system is increased by quickly detecting and correcting problems with the equipment, which reduces its downtime.

The proposed solution allows us to use modern approaches to classical automation and expand its application boundaries.

**Keywords:** programmable logic controllers; PLC; automation; IoT; IioT; ML; AI; Modbus; MQTT; data processing; individual heat point; sewage pumping station; Industry 4.0.

Стаття надійшла до редакції 18.10.2024.