

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

ПОГОДЖЕНО
Директор ННІ енергетики,
автоматики і енергозбереження

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри
інженерії енергосистем

_____ /Каплун В.В./
(підпис)

«_____» _____ 2026 р.

_____ /Антипов Є.О./
(підпис)

«_____» _____ 2026 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Дослідження структури та алгоритмів технології IoT-для
системи моніторингу енергоспоживання підприємства»

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(код і назва)

Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(назва)

Орієнтація освітньої програми: Освітньо-наукова
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Гарант освітньої програми

К.Т.Н., доцент
(науковий ступінь та вчене звання)

_____ (підпис)

Троханяк В. І.
(ПІБ)

**Керівник магістерської
кваліфікаційної роботи**

К.Т.Н., доцент
(науковий ступінь та вчене звання)

_____ (підпис)

Павленко В.М.
(ПІБ)

Виконав

_____ (підпис)

Кушнір Д.В
(ПІБ)

КИЇВ – 2026

ЗАВДАННЯ ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ЗДОБУВАЧУ

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи		<u>Павленко В.М.</u>
	(підпис)	(ПІБ)
Завдання прийняв до виконання		<u>Кушнір Д.В.</u>
	(підпис)	(ПІБ)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 79 с., 7 табл., 5 рис., 55 джерел.

Об'єкт дослідження – процес моніторингу та аналізу енергоспоживання на підприємстві ТОВ «Оптима Фарм».

Предмет дослідження – архітектурні рішення, апаратно-програмні засоби та алгоритми збору, передавання, обробки й візуалізації даних енергоспоживання з використанням IoT-технологій, інтелектуальних лічильників, мережевих протоколів і серверної платформи.

Мета роботи – підвищення енергоефективності та зниження витрат електроенергії на підприємстві шляхом проектування масштабованої, надійної та захищеної IoT-системи моніторингу енергоспоживання в режимі реального часу.

У роботі проведено аналіз сучасних IoT-платформ, протоколів передавання даних та технологій збору інформації про електроспоживання. Досліджено особливості енергоспоживання складських, виробничих і допоміжних приміщень ТОВ «Оптима Фарм». Обґрунтовано вибір сенсорних вузлів, мережевої інфраструктури та серверних компонентів системи.

Розроблено структурну архітектуру IoT-системи, що включає рівень збору даних, мережевий рівень передавання та прикладний рівень обробки й візуалізації інформації. Запроєктовано мережеву топологію з використанням інтелектуальних лічильників, шлюзів передачі даних і серверної платформи моніторингу. Реалізовано функції централізованого та децентралізованого збору даних, накопичення статистики та формування аналітичних звітів.

Ключові слова: інтернет речей, енергоспоживання, енергоефективність, автоматизований моніторинг, кібербезпека, децентралізовані системи, промислові підприємства.

ABSTRACT

Explanatory note: 79 pages, 7 tables, 5 figures, , 55 sources.

The object of development is the process of monitoring and analysing energy consumption at Optima Farm LLC.

The subject of development is architectural solutions, hardware and software tools, and algorithms for collecting, transmitting, processing, and visualising energy consumption data using IoT technologies, smart meters, network protocols, and a server platform.

The goal of the work is to increase energy efficiency and reduce electricity costs at the enterprise by designing a scalable, reliable, and secure IoT system for monitoring energy consumption in real time.

The work analyses modern IoT platforms, data transmission protocols and technologies for collecting information on electricity consumption. The energy consumption characteristics of the warehouse, production and auxiliary premises of Optima Farm LLC are investigated. The choice of sensor nodes, network infrastructure and server components of the system is justified.

The structural architecture of the IoT system has been developed, including the data collection level, the network transmission level, and the application level of information processing and visualisation. A network topology has been designed using smart meters, data transfer gateways and a server monitoring platform. Centralised and decentralised data collection, statistics accumulation and analytical report generation functions have been implemented.

Keywords: internet of things, energy consumption, energy efficiency, automated monitoring, cybersecurity, decentralised systems, industrial enterprises.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ІоТ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ПІДПРИЄМСТВ.....	8
1.1. Сучасний стан та проблеми енергоспоживання на підприємствах.....	8
1.2. Поняття та принципи функціонування технології Internet of Things.....	12
1.3. Аналіз існуючих ІоТ-рішень для моніторингу енергоспоживання.....	20
Висновки до розділу 1.....	25
РОЗДІЛ 2. ПРОЄКТУВАННЯ ІоТ-СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ НА ТОВ «Оптимі Фарм».....	26
2.1. Проєктування ІоТ-системи для умов підприємства.....	26
2.2. Розроблення програмного алгоритму функціонування системи.....	39
2.3. Моделювання та тестування роботи ІоТ-системи.....	45
Висновки до розділу 2.....	48
РОЗДІЛ 3. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ СИСТЕМИ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ НА ТОВ «Оптимі Фарм».....	50
3.1. Оцінка ефективності впровадження системи моніторингу енергоспоживання.....	50
3.2. Економічне обґрунтування доцільності впровадження ІоТ-системи.....	54
3.3 Рекомендації щодо впровадження та експлуатації ІоТ-системи моніторингу енергоспоживання.....	58
Висновки до розділу 3.....	61
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ.....	63
4.1 Аналіз умов праці на підприємстві і визначення категорій виробництв, приміщень та класів виробничих зон.....	63
4.2 Розрахунок індивідуальних засобів захисту.....	66
4.3 Блискавкозахист підприємства.....	69
4.4 Пожежна безпека.....	71
Висновки до розділу 4.....	73
ВИСНОВКИ.....	74
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	76

ВСТУП

Сьогодні до сфери Інтернету речей належать мільярди пристроїв по всьому світу, підключених до мережі Інтернет. Варто зазначити, що цей термін давно перестав означати просте з'єднання датчиків, які передають дані на екран приймального пристрою. На сучасному етапі розвитку датчики інтегруються в єдину систему, де здійснюється обмін інформацією, її обробка, аналітика, а також управління процесами. Таким чином формується автономна структура, яка потребує мінімального втручання людини або навіть здатна функціонувати повністю самостійно. Такі системи мають здатність самостійно приймати рішення та управляти окремими об'єктами чи їх комплексами залежно від мети створення конкретної мережі. На сучасному етапі розвитку промисловості спостерігається активне впровадження цифрових технологій, спрямованих на підвищення ефективності управління виробничими процесами та оптимізацію використання енергетичних ресурсів. Одним із найбільш перспективних напрямів у цій галузі є інтеграція технологій Інтернету речей (IoT), які дозволяють автоматизувати збір, передачу та аналітичну обробку даних у реальному часі. Зокрема, IoT-технології стають особливо актуальними в системах моніторингу енергоспоживання на підприємствах, оскільки забезпечують детальний аналіз енергетичних процесів та сприяють прийняттю науково обґрунтованих рішень для підвищення енергоефективності [1].

Актуальність цієї магістерської роботи зумовлена необхідністю теоретичного аналізу та наукового обґрунтування структур і алгоритмів IoT-технологій, які використовуються у системах моніторингу енергоспоживання. Незважаючи на існування значної кількості практичних реалізацій, питання систематизації архітектурних підходів, алгоритмів обробки даних та аналізу ефективності роботи IoT-систем все ще залишаються недостатньо висвітленими, що обмежує їхнє повноцінне й результативне впровадження.

Дана робота носить дослідно-теоретичний характер і спрямована на розробку теоретичних засад технології IoT для системи моніторингу

енергоспоживання підприємства. Вона також включає аналіз результатів випробувань технічних і програмних рішень, представлених у наукових і прикладних джерелах. Особливий акцент зроблено на дослідженні структурної організації IoT-систем, алгоритмів збору, передачі, зберігання та аналізу даних про енергоспоживання, а також на оцінці ефективності цих рішень на основі експериментальних і тестових випробувань.

Основна **мета** роботи полягає у вивченні теоретичних аспектів та розробці структури й алгоритмів використання технології Інтернету речей для моніторингу енергоспоживання підприємства. Ця діяльність ґрунтується на аналізі сучасних наукових підходів і результатів випробувань існуючих IoT-рішень.

Для досягнення поставленої мети визначено **такі завдання**:

- дослідити сучасний стан і тенденції розвитку IoT-технологій у галузі енергомоніторингу;
- вивчити структурні моделі IoT-систем для моніторингу енергоспоживання;
- систематизувати ключові алгоритми функціонування IoT-систем;
- проаналізувати результати випробувань IoT-рішень, висвітлених у наукових і технічних джерелах;
- ідентифікувати переваги та недоліки використання IoT-технологій у моніторингових системах підприємств.

Об’єктом дослідження виступають процеси моніторингу енергоспоживання на підприємствах.

Предметом дослідження є структура й алгоритмічна база технологій Інтернету речей, застосовуваних у системах енергетичного моніторингу.

Методологічною основою дослідження є використання методів теоретичного аналізу, синтезу й узагальнення, системного підходу, порівняльного аналізу, а також вивчення результатів експериментальних досліджень і тестувань IoT-систем. Наукова новизна роботи полягає у систематизації підходів до використання IoT-алгоритмів для моніторингу енергоспоживання.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ІоТ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ПІДПРИЄМСТВ

1.1. Сучасний стан та проблеми енергоспоживання на підприємствах

Споживання енергії виступає одним з ключових факторів, які визначають ефективність функціонування сучасних підприємств, незалежно від сфери їх діяльності. Зростання вартості енергоресурсів, обмеженість природних ресурсів та жорсткіші екологічні вимоги формують нагальну необхідність раціонального використання електричної та теплової енергії. У зв'язку з цим управління енергоспоживанням набуває стратегічного значення і вимагає застосування науково обґрунтованих підходів разом із впровадженням передових технологічних рішень. На сьогодні стан енергоспоживання на підприємствах вирізняється значною нерівномірністю у використанні енергетичних ресурсів, наявністю пікових навантажень, а також недостатнім контролем над енергетичними процесами. У багатьох випадках облік споживання енергії здійснюється за допомогою застарілих вимірювальних засобів або на агрегованому рівні, що не дозволяє вести детальний аналіз витрат окремими технологічними лініями, обладнанням чи підрозділами підприємства. Такий формат обліку знижує здатність своєчасно виявляти неефективні режими експлуатації та приховані втрати енергії.

Формування сучасного світу інноваційних технологій досліджувалося в працях багатьох науковців. У своїх роботах О.А. Баранов [4], С.В. Войтко [5] та В.Рябошлик [15] детально проаналізували вплив концепції Інтернету речей на сучасне життя людини. Вони пояснюють суть цього явища, принципи його функціонування й пропонують прогнози стосовно його подальшого розвитку. Тематику інтернетизації та глобальної інституціоналізації економічних систем досліджували О.В. Журавльов і О.А. Сімасов [11]. У їхніх роботах зазначено,

що сучасний світ перебуває в стані постійної трансформації, обумовленої глобальними процесами та викликами XXI століття. Науковці аргументували, що індустрія відома як четверта промислова революція, поступово інтегрується у світову економіку, спрямовуючи розвиток до створення розумного середовища, у якому всі об'єкти будуть взаємопов'язані через мережу. Також було запропоновано розширити концепцію глобалізації до поняття інтернетизації. В.В. Коваль і В.А. Замлинський [12] наголошують на тому, що розвиток ринку послуг Інтернету речей суттєво змінить основи конкуренції та приведе до трансформації бізнес-моделей у секторі телекомунікацій. Особливо це стосуватиметься реалій економіки України, яка потребує активнішого запровадження мереж нового покоління та забезпечення доступу населення до Інтернету. У зв'язку із цим важливим стає питання формування державної політики для розвитку ринку послуг Інтернету речей, оскільки відповідні додатки мають пройти процедуру затвердження регуляторними органами.

Сучасні технологічні прориви та перспективи переходу від інтернету людей до Інтернету речей проаналізував В. Рябошлик [15]. Питання Інтернету речей як технологічного феномену досліджували О.І. Смолин і В.П. Олексюк [16], які детально описали концепцію хмарних технологій у цій сфері, принципи формування бази даних та ролі датчиків у загальній системі. Щодо окремих напрямів застосування Інтернету речей слід згадати праці різних авторів. Г.В. Антонова, А.В. Кедич та О.В. Ковирьов [2] дослідили цей феномен із погляду землеробства. О.А. Баранов [3] розглянув його застосування в охороні здоров'я, сільському господарстві та транспорті. А.П. Гненний і Ю.Г. Гордієнко [6] зосередилися на промислових підприємствах, тоді як З. Дідич аналізував вплив IoT на сільське господарство. Про медичну сферу йдеться у працях В.І. Журавель, Т.Ю. Ткачука та Д.С. Борковського [9], а аспекти розумного міста висвітлено у роботах К. Коцюбівської, В. Прісич і О. Яворського [13].

Сьогоднішній період характеризується швидким збільшенням кількості пристроїв, підключених до мережі, а також масштабним розширенням сфер

застосування технологій Інтернету речей. IoT знаходить своє широке використання у таких галузях, як економіка, енергетика, промисловість, житлово-комунальне господарство, сільське господарство, транспорт та охорона здоров'я. Одним із найгостріших питань у сфері енергоспоживання є відсутність оперативної та достовірної інформації щодо фактичних витрат енергії. Дані з традиційних систем обліку часто надходять із запізненням і не підтримують аналіз у режимі реального часу. Відсутність актуальної інформації ускладнює прийняття управлінських рішень, спрямованих на оптимізацію споживання енергії, і знижує загальну ефективність системи управління енергоресурсами.

Суттєвий вплив на низьку ефективність споживання енергії здійснюють технічні фактори, зокрема зношеність виробничого обладнання та інженерних мереж, що спричиняє підвищені втрати електроенергії та теплової енергії. Крім цього, недостатня автоматизація процесів управління споживанням енергії негативно впливає на показники енергоефективності. На багатьох підприємствах відсутні інтегровані системи моніторингу, які забезпечували б комплексний контроль за усіма потоками енергії. Окрім технічних аспектів, проблематика енергоспоживання охоплює також організаційні та інформаційні чинники. Недостатня координація між структурними підрозділами компанії, відсутність єдиної бази даних та обмежене використання аналітичних методів утруднюють реалізацію програм з підвищення енергоефективності. Такі проблеми демонструють необхідність переходу від традиційних способів обліку до інтелектуальних систем моніторингу, які здатні здійснювати збір, оброблення та аналіз даних про споживання енергії у режимі реального часу [15]. Сучасний стан енергоспоживання на підприємствах визначається низкою технічних, організаційних та інформаційних проблем, що ставить перед компаніями завдання впровадження інноваційних технологій моніторингу та управління.

Використання Інтернету речей створює необхідну теоретичну та практичну основу для забезпечення прозорості енергетичних процесів,

зменшення втрат ресурсів та побудови ефективної системи управління енергоспоживанням підприємства. Попри значний прогрес у наукових дослідженнях, питання створення чіткої структури та принципів застосування технологій Інтернету речей у сучасному технічному середовищі все ще залишаються недостатньо опрацьованими. Сфера потребує глибшого теоретичного аналізу, оскільки в науковій літературі представлено багато підходів до впровадження IoT-рішень, але більшість із них зосереджуються на прикладних аспектах або описують конкретні технічні реалізації. Ці роботи переважно позбавлені узагальненого бачення і єдиної концептуальної основи використання даної технології.

Швидкий розвиток цифрових систем і інтелектуальних мереж обумовлює актуальність формування чітких принципів визначення структурних компонентів IoT-систем, їх функцій, а також механізмів взаємодії між елементами. Відсутність єдиних правил і концепцій побудови архітектури Інтернету речей ускладнює адаптацію цих технологій до різних галузей промисловості, таких як системи моніторингу енергоспоживання. Це створює потребу у ґрунтовному розгляді архітектурних моделей IoT та виробленні базових принципів їх використання стосовно характерних особливостей технічних об'єктів і процесів [4].

Наукові дослідження також активно фокусуються на алгоритмічному забезпеченні IoT-систем, особливо на методах збору, передачі, зберігання й обробки інформації. Проте такі дослідження часто подаються не в комплексному вигляді, а фрагментарно, що перешкоджає адекватному аналізу ефективності алгоритмів за різних умов експлуатації. Як наслідок, виникають труднощі із порівнянням існуючих методик і можливістю формулювання загальних рекомендацій щодо оптимального алгоритмічного супроводу систем моніторингу енергоспоживання. Більшість досліджень обмежуються технічними описами чи поданням експериментальних результатів без належного теоретичного обґрунтування отриманих даних. Це підкреслює важливість систематизації результатів тестувань IoT-рішень, щоб встановити

закономірності їх функціонування та визначити шляхи для подальшого вдосконалення.

1.2. Поняття та принципи функціонування технології Internet of Things

Інтернет речей – це система, яка об'єднує фізичні об'єкти, наділені інтегрованими технологіями, що дозволяють взаємодіяти з оточуючим середовищем, передавати дані про свій стан і приймати інформацію із зовнішніх джерел. Відділ ITU-D, який входить до складу Міжнародного союзу електрозв'язку та займається стандартами зв'язку, запропонував рекомендацію під назвою «Огляд Інтернету речей». У цьому документі сформульовані основні визначення, пов'язані зі складовими IoT. Згідно з ITU-D, Інтернет речей є глобальною інфраструктурою, що дозволяє надавати більш комплексні сервіси шляхом взаємодії фізичних і цифрових об'єктів за допомогою існуючих і новітніх інформаційно-комунікаційних технологій. При цьому ці технології мають бути сумісними. Під терміном «річ» у контексті IoT розуміють фізичний об'єкт реального світу або віртуальну сутність цифрового простору, яку можна ідентифікувати та інтегрувати в комунікаційні мережі. А поняття «пристрій» стосується апаратних засобів, що оснащені базовими функціями зв'язку та додатковими можливостями для збирання, запуску процесів, введення, зберігання і обробки даних.

На основі наукових джерел можна сформулювати власне визначення Інтернету речей. Це концепція взаємодії фізичних пристроїв, які мають у своєму складі вбудовані датчики, виконавчі механізми й програмне забезпечення. Ці пристрої активно працюють із навколишнім середовищем та є частиною мережевої системи. Така система дає змогу обмінюватися даними між компонентами за допомогою автоматизованих процесів із використанням стандартних мережевих протоколів. Головна ідея Інтернету речей полягає у здатності підключати різноманітні пристрої, якими користуються люди щодня.

IoT забезпечує взаємозв'язок між об'єктами, передачу інформації й управління під'єднаними пристроями через мережу, наприклад за допомогою WiFi чи Ethernet-адаптерів. Це дозволяє контролювати їхню роботу дистанційно. Хоча оснащення пристроїв виконавчими органами не є обов'язковим аспектом системи, їх наявність значно розширює функціональні можливості, забезпечуючи зміну режимів роботи без необхідності втручання людини. На сьогоднішній день Інтернет являє собою складну систему численних комп'ютерних мереж, які охоплюють корпоративні, наукові, урядові та домашні середовища. Ці мережі інтегруються за допомогою протоколу IP, незалежно від відмінностей у їхній архітектурі чи топології. Кожному користувачу або групі користувачів у мережі призначається IP-адреса, яка може бути статичною або динамічною залежно від конфігурації.

Інтернет речей (IoT) охоплює широкий спектр пристроїв, що використовуються як у побуті, так і в професійній діяльності людини. До прикладів таких пристроїв можна віднести камери відеоспостереження, комп'ютери, годинники, автомобілі, холодильники, літаки та інші об'єкти повсякденного використання.

Ключовими компонентами системи IoT є [3]:

1. Фізичні об'єкти, оснащені сенсорами та пристроями зв'язку для передачі даних через мережу Інтернет.
2. Центральні або децентралізовані платформи, які виконують функції забезпечення безпеки, обробки інформації та управління підключеними пристроями.

Для розробки початкового компонента потрібно налаштувати датчики і мережеві адаптери на пристрої. Основними труднощами цього етапу є фізичне встановлення обладнання, забезпечення адаптерів живленням із відповідними функціями, визначення відстані до пристрою, а також необхідність його переміщення у процесі роботи, якщо це потрібно. Сьогодні індустрія активно розширює асортимент продуктів із вбудованими датчиками та мережевими

адаптерами, що істотно спрощує їх інтеграцію та використання в системах Інтернету речей (IoT).

Для створення другого компонента необхідно використовувати серверне обладнання, бази даних і програмне забезпечення, яке забезпечує передачу даних через різні протоколи, наприклад, HTTP, HTTPS, MQTT тощо. Конкретна платформа визначає перелік функцій, технічні параметри обладнання та склад програмного забезпечення, які потрібні для реалізації завдань.

Сьогодні одним із найпоширеніших способів управління екосистемою Інтернету речей є використання хмарних сервісів. Як правило, така архітектура схематично показана на рисунку 1.1. У рамках цієї структури IoT-пристрої, крім взаємодії одне з одним, підключаються до Інтернету через шлюз і можуть бути керовані віддалено. Така організація вже стала класичною, а її інтеграція з хмарними сервісами надає значно ширший спектр додаткових можливостей. Хмарний сервіс у такій мережі відіграє ключову роль. По-перше, він забезпечує надійне зберігання даних і налаштувань пристроїв. По-друге, виконує складні математичні обчислення. Збереження даних у хмарі також важливе тому, що вона слугує універсальною базою знань, доступною для всіх пристроїв певного типу. Завдяки цьому смарт-пристрої можуть оновлювати свої функції без втручання людини, забезпечуючи автоматичне оновлення програмного забезпечення та функціоналу.

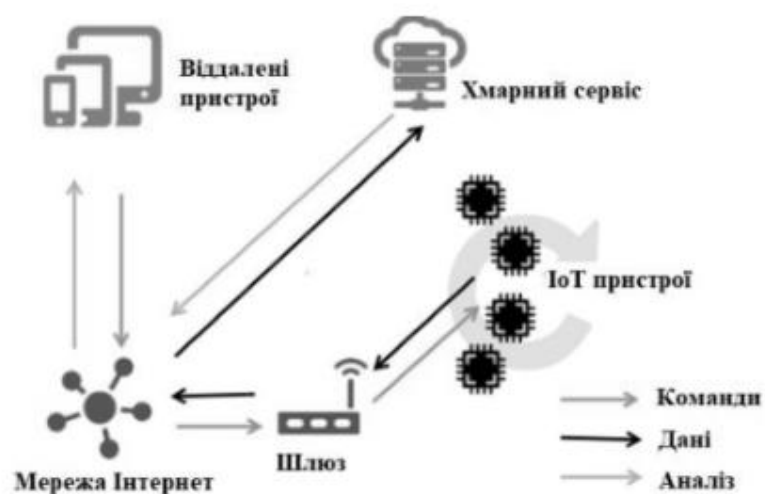


Рис. 1.1 IoT система з хмарним середовищем

Другий аспект, пов'язаний із обчисленнями, набуває значення через те, що розумні пристрої зазвичай орієнтовані на максимальну енергоефективність та обмежені у своїх технічних можливостях для виконання складної аналітики і математичних розрахунків. У таких випадках хмарний сервіс бере на себе функції обробки та аналізу даних, забезпечуючи необхідну продуктивність і ефективність системи.

У сучасному світі значна кількість компаній спеціалізується на наданні хмарних сервісів у сфері Інтернету речей, забезпечуючи взаємодію як із пристроями власного виробництва, так і з сторонніми пристроями, що підтримують функціонал хмарної комунікації. Серед провайдерів хмарних платформ IoT особливу увагу слід приділити таким системам [6]:

- Arduino IoT Cloud пропонує інтегроване рішення, яке включає веб-інтерфейс для реалізації функцій кодування, конфігурації, завантаження програмного забезпечення та візуалізації даних. Її ключові можливості охоплюють організацію моніторингу даних через інформаційні панелі, синхронізацію змінних між пристроями, встановлення задач із визначеними часовими параметрами, реалізацію функції «оновлення через повітря», що дозволяє оновлювати програмне забезпечення пристрою без фізичного підключення до комп'ютера. Крім того, платформа підтримує інтеграцію з іншими сервісами через веб-хуки та забезпечує гнучке управління правами доступу користувачів [5]:

- Google Cloud IoT є рішенням для Інтернету речей (IoT), побудованим на основі хмарної платформи Google. Воно забезпечує всебічний набір інструментів для підключення, обробки, зберігання та аналізу даних. Платформа постачається з інтегрованим набором обчислювальних технологій Google Cloud. Попри її потужність, рівень складності може створювати труднощі при швидкому створенні прототипів. Це рішення здебільшого використовується в таких сферах, як прогнозне технічне обслуговування, відстеження активів у реальному часі, логістика, управління ланцюгами поставок, а також розробка розумних будинків і міст.

- AWS IoT, платформа від Amazon, створена для керування та підключення значної кількості пристроїв. Її призначення полягає у зборі, зберіганні та аналізі даних IoT для підтримки споживчих, промислових і комерційних застосувань. Серед основних функцій платформи контроль доступу, шифрування даних, масштабованість і інтеграція з іншими хмарними сервісами Amazon.

- PTC ThingWorx це платформа, орієнтована на широкомасштабне впровадження промислового Інтернету речей. Вона пропонує спеціалізовані рішення, спрямовані на вдосконалення основних можливостей IoT, таких як інструменти доповненої реальності та управління життєвим циклом продуктів. Зазвичай платформа використовується для задач, пов'язаних із розповсюдженням продуктів як послуг, віддаленим моніторингом промислових об'єктів, створенням цифрових інструкцій для роботи та моніторингом параметрів у режимі реального часу.

- Платформа Каа IoT спрямована на те, щоб зробити процес впровадження Інтернету речей (IoT) максимально легким і швидким. Вона пропонує повний набір можливостей для IoT, включаючи аналітичні інструменти, і не вимагає додаткової інтеграції модулів чи сторонніх сервісів. Завдяки своїй універсальності Каа може бути застосована у різних сценаріях використання IoT. Платформа зосереджується на забезпеченні простоти використання та самообслуговування, що робить її привабливою як для невеликих стартапів, так і для великих компаній, які ще не готові до масштабного впровадження IoT. Каа знаходить застосування в таких секторах, як автомобільний транспорт, охорона здоров'я, промисловий Інтернет речей, логістика та розумна роздрібна торгівля.

- Платформа Azure IoT від Microsoft є частиною їхньої хмарної екосистеми та пропонує комплексне рішення для розвитку IoT-проектів. Вона охоплює пристрої, інструменти, аналітику даних і функції безпеки. Azure IoT складається з різноманітних компонентів і вимагає певного рівня технічної підготовки для налаштування відповідно до потреб компанії. Ця платформа

широко використовується в таких галузях, як автомобілебудування, енергетика, охорона здоров'я, роздрібна торгівля, транспорт і логістика.

Багато доступних платформ для IoT надають безкоштовні тарифи, але вони зазвичай мають обмеження щодо кількості пристроїв або обсягу зберігання даних. Для збільшення цих параметрів зазвичай потрібно перейти на платну версію. Водночас у деяких випадках можуть виникати обмеження стосовно безпеки при обробці даних сторонніми компаніями. Ефективна організація роботи системи IoT потребує обробки значних обсягів різноманітних даних та їх трансформації у зручний і практичний формат для подальшого застосування. Фільтрація та відбір ключових компонентів сприяють підвищенню швидкості виконання процесу. Загальний алгоритм функціонування IoT наведено на рисунку 1.2.

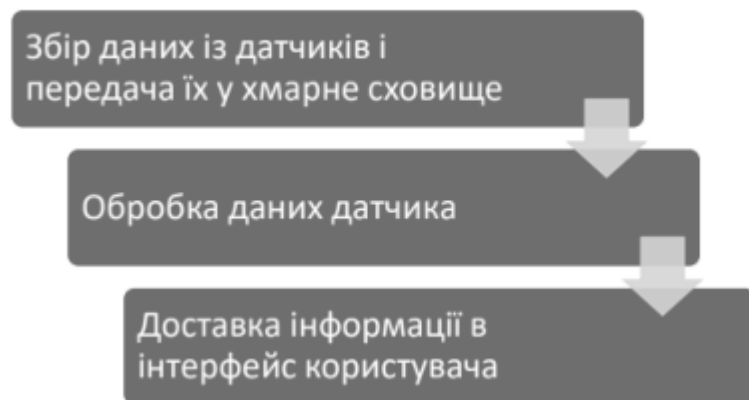


Рис. 1.2 Послідовність виконання операцій в IoT системах

Джерело: інтернет ресурси Google [30]

Платформа IoT здійснює аналіз даних у режимі реального часу, щоб визначити найбільш раціональні та ефективні підходи для розв'язання будь-яких проблем у діяльності компанії або запобігання потенційним ризикам. Система адаптується до специфічних технологічних особливостей кожного окремого підприємства, що суттєво впливає на економічні показники його функціонування протягом заданого періоду. А система постійно моніторить усі важливі показники, які безпосередньо впливають на виконання ключових етапів і процесів. Швидке виявлення проблемних чинників дає змогу забезпечити найкращі умови для їх оперативного усунення. Інтерфейс розробки

надає можливість наочно відображати процеси виконання завдань, що дозволяє обслуговуючому персоналу ефективно оцінювати стан технічних елементів [6].

Концепція Інтернету речей має чимало вагомих переваг, які сприяють її активному поширенню в різних галузях. Одна з основних переваг полягає у зручності, адже IoT-технології значно спрощують як повсякденні, так і виробничі процеси завдяки автоматизації. Розумні пристрої для дому та промисловості здатні самостійно виконувати поставлені завдання, адаптуватися до змін у навколишньому середовищі й взаємодіяти між собою без постійного втручання людей. Це прямим чином підвищує якість життя користувачів, дозволяючи оптимізувати рутинні процеси й краще контролювати використання ресурсів. Ще одним суттєвим плюсом IoT є підвищення ефективності та рівня безпеки. Завдяки використанню інтелектуальних датчиків і автоматизованих систем стає можливим своєчасне виявлення небезпечних або аварійних ситуацій, що особливо важливо для промислових і комерційних об'єктів. Автоматизація багатьох процесів дозволяє мінімізувати вплив людського фактора, що позитивно позначається на продуктивності праці та стабільності роботи підприємств. У результаті компанії знижують витрати та покращують загальну ефективність своєї діяльності.

Важливим аспектом є також сприяння прийняттю управлінських рішень. IoT-системи забезпечують збирання значних обсягів емпіричних даних, які можна використовувати для аналізу причинно-наслідкових зв'язків, прогнозування тенденцій і планування дій. Актуальна і достовірна інформація зменшує потребу в ручному аналізі даних, дозволяючи приймати обґрунтовані рішення навіть за умов невизначеності, що суттєво підвищує конкурентоспроможність підприємств. Однією з помітних переваг використання IoT-технологій є економія часу. Інтелектуальні пристрої швидко реагують на зміни параметрів довкілля або робочих процесів, що скорочує час виконання завдань і покращує оперативність управління. Завдяки відсутності необхідності постійного ручного контролю інформації трудові ресурси використовуються раціональніше, а загальна ефективність функціонування

систем зростає. Водночас, разом із перевагами, концепція Інтернету речей має низку обмежень і проблем. Однією з ключових складностей є тривалість і складність підготовчого етапу впровадження IoT-систем. Він вимагає не лише налаштування й навчання пристроїв розпізнавати об'єкти та події, але й налагодження взаємодії між пристроями різних виробників. На даний момент більшість IoT-рішень сумісні лише в межах екосистем одного бренду, що ускладнює інтеграцію обладнання й підвищує загальну вартість реалізації проектів [7].

Суттєвою проблемою залишається відсутність універсальних стандартів сумісності та інтеграції даних. Різноманіття протоколів і стандартів передачі та обробки інформації створює перешкоди для гармонійної взаємодії між різними IoT-платформами. Це породжує фрагментацію ринку та ускладнює вибір оптимальних технічних рішень, особливо для великих систем. Окрему увагу варто приділити питанням конфіденційності та захисту даних. IoT-пристрої здатні зберігати й обробляти значні обсяги персональної та службової інформації, включаючи дані про поведінку користувачів, режим роботи обладнання й місцезнаходження. У разі несанкціонованого доступу до таких даних виникають серйозні ризики для безпеки та конфіденційності. Тому забезпечення надійного захисту інформації й упровадження ефективних механізмів шифрування є критично важливими завданнями в процесі розробки та експлуатації IoT-систем.

Забезпечення надійного захисту інформації та впровадження дієвих методів шифрування є надзвичайно важливими завданнями під час розробки та функціонування IoT-систем. Це пояснюється тим, що такі системи працюють у розподіленому середовищі й оперують великими обсягами даних, які передаються між численними пристроями через відкриті або частково захищені мережі зв'язку. Без належних заходів захисту ці дані можуть піддаватися ризику несанкціонованого доступу, перехоплення чи змін.

1.3. Аналіз існуючих IoT-рішень для моніторингу енергоспоживання

IoT-рішення для моніторингу енергоспоживання це комплексні системи, які поєднують сучасні датчики, мережеві пристрої та програмне забезпечення для збору, передачі та аналізу даних про споживання електроенергії в режимі реального часу. Такі системи дозволяють отримувати точну та детальну інформацію про те, скільки енергії використовується на різних ділянках об'єкта, окремими пристроями чи групами обладнання. Основне призначення цих рішень полягає в тому, щоб надати користувачам повний контроль над енергоспоживанням, дозволяючи відстежувати поточне використання електроенергії система забезпечує постійний моніторинг та візуалізацію даних у зручному форматі (графіки, дашборди, таблиці), що допомагає відстежувати, які прилади або ділянки споживають найбільше енергії. Виявляти аномалії або перевитрати завдяки аналітичним алгоритмам IoT-система здатна виявляти надмірне споживання або неефективну роботу обладнання, наприклад, через несправності, неправильне налаштування чи небажані втрати енергії [8].

Оптимізувати витрати на електроенергію отримані дані дозволяють користувачам приймати обґрунтовані рішення щодо скорочення непотрібного споживання, переналаштування графіків роботи обладнання або впровадження автоматизованих механізмів енергозбереження. Підвищити енергоефективність будівель або обладнання завдяки комплексному аналізу енергоспоживання можна оптимізувати використання ресурсів, зменшити втрати енергії та створити більш стійкі та економічно вигідні процеси в промисловості, комерційних будівлях чи житлових приміщеннях. Крім того, такі системи часто інтегруються з хмарними платформами та мобільними додатками, що дозволяє віддалено контролювати енергоспоживання, отримувати сповіщення про перевитрати та швидко реагувати на потенційні проблеми. В результаті вони не лише знижують витрати, а й сприяють впровадженню принципів «розумного будинку» або «розумного підприємства». Такі системи допомагають:

- відстежувати поточне використання електроенергії,

- виявляти аномалії або перевитрати,
- оптимізувати витрати,
- підвищити енергоефективність будівель або обладнання.

Таблиця 1.1

Основні компоненти IoT-рішень

Компонент	Функція
Датчики та лічильники	Вимірюють споживання енергії (струм, напруга, потужність).
Шлюзи (Gateways)	Збирають дані з сенсорів і передають у хмару або локальний сервер.
Комунікації	Wi-Fi, LoRaWAN, NB-IoT, Zigbee, Ethernet способи передачі даних.
Хмарні платформи	Зберігання, обробка, аналітика.
Аналітика/додатки	Візуалізація, дашборди, звіти, оповіщення.

Сучасні системи Інтернету речей для моніторингу енергоспоживання суттєво розрізняються за своїм спектром застосування, функціональними можливостями та масштабами впровадження. Відповідно до специфічних потреб користувачів, їх можна умовно поділити на три ключові категорії: промислові рішення, комерційні (будівельні) системи та споживчі пристрої для домашнього використання. Промислові рішення де IoT-системи цього типу орієнтовані на задоволення потреб великих підприємств, виробничих комплексів та інфраструктурно значущих об'єктів, що вимагають ретельного моніторингу енергоспоживання. Такий контроль є визначальним для раціоналізації виробничих процесів та скорочення витрат матеріальних і енергетичних ресурсів. Характерні риси це висока точність планування та обліку, де промислові IoT-системи дозволяють фіксувати енергоспоживання на детальному рівні: аж до окремих виробничих ліній, машин чи цехів. Масштабованість де ці рішення здатні легко адаптуватися до великих

підприємств із сотнями та навіть тисячами вимірювальних вузлів, забезпечуючи централізований контроль у реальному часі. Поглиблена аналітика та прогнозування, тобто системи ефективно виявляють перевантаження у мережах, прогнозують пікові навантаження та формують прогнози щодо майбутніх обсягів енергоспоживання. Це сприяє уникненню простоїв обладнання та несподіваних витрат. Наприклад Schneider Electric EcoStruxure це інтегроване рішення для промислових об'єктів, яке включає набір сенсорів, шлюзового обладнання, аналітичних модулів і програмного забезпечення для удосконалення управління енергоспоживанням. Siemens Desigo це універсальна система, що поєднує функції енергетичного моніторингу, автоматизації управління будівлями та оптимізації промислових технологічних процесів[9].

Промислові IoT-рішення надають комплексний підхід шляхом інтеграції різноманітних компонентів від сенсорів і контролерів до хмарних платформ аналітики. Вони забезпечують не лише детальний моніторинг енерговитрат, але й створюють можливості для стратегічного планування з метою підвищення продуктивності підприємства та досягнення енергоефективності. Інтелектуальні системи для комерційного та будівельного використання призначені для впровадження в офісах, торгових центрах, готелях, навчальних закладах і багатоповерхових житлових комплексах, спрямовані на забезпечення раціонального управління енергоспоживанням на рівні поверхів, зон або окремих приміщень.

Моніторинг енергоспоживання за зонами і поверхами дозволяє оцінювати рівень активного використання ресурсів, зокрема електроенергії, для забезпечення оптимальної роботи систем освітлення, опалення та кондиціонування. Візуалізація даних у режимі реального часу, доступність даних забезпечується через інтерактивні графіки, інтегровані дашборди та звітність, що значно спрощує аналіз та прийняття управлінських рішень. учкість доступу через веб-інтерфейс або мобільний додаток. Такий підхід значно полегшує контроль над енергоспоживанням, включно з можливістю

дистанційного управління. Energomonitor - інноваційна система моніторингу, яка дозволяє детально аналізувати тенденції використання ресурсів і оперативно реагувати на перевитрати через автоматизовані сповіщення. Наприклад Smarpee - модульна платформа для розумних будівель, що забезпечує розпізнавання окремих пристроїв і детальний аналіз їхнього енергоспоживання. Efergy Engage - комерційне рішення для управління енергоспоживанням із інтерактивними панелями керування та функціями прогнозування споживання (табл. 1.2). Системи для комерційного використання демонструють перевагу у простоті інсталяції порівняно з промисловими аналогами, водночас залишаючись економічно більш доступними. Вони представляють оптимальне рішення для будівель середніх і великих розмірів, де важливо досягти балансу між точністю вимірювань енергоспоживання та витратами на інтеграцію та експлуатацію системи [10].

Таблиця 1.2

Порівняння популярних рішень

Рішення	Сфера	Ключові можливості
Schneider EcoStruxure	Промислова	Детальна аналітика, інтеграція з PLC/SCADA, прогнозування
Siemens Desigo CC	Будівельна автоматизація	Об'єднання енергетики + HVAC + безпека
Energomonitor	Комерція/житло	Візуалізація, аналіз трендів, оповіщення SMS/Email
Smarpee Infinity	Комерція/дом	Модульна система, розпізнавання пристроїв
TP-Link Kasa Smart Plug	Домашні	Легке налаштування, базовий моніторинг

Споживчі пристрої для дому призначені для приватних користувачів та невеликих осель, таких як квартири чи будинки. Їхнє основне завдання полягає у забезпеченні базового контролю та зниженні витрат на електроенергію на рівні окремих приладів.

Ключові функції [11]:

- розумні розетки із функцією вимірювання споживаної потужності: дають змогу відстежувати, скільки електроенергії використовує кожен окремий пристрій;

- плагін-датчики і монітори: легкі у використанні, не потребують складної інсталяції або спеціальних знань;

Наприклад розетка TP-Link Kasa Smart Plug забезпечує моніторинг енергоспоживання та управління через мобільний додаток. Енергомонітор Shelly EM дозволяє вести віддалений контроль, а також інтегруватися з системами домашньої автоматизації. Домашні IoT-рішення зазвичай характеризуються низькою вартістю та обмеженим функціоналом. Водночас вони надають можливість ефективно контролювати електровитрати, ідентифікувати енергоємні пристрої та отримувати прості рекомендації для оптимізації споживання енергії.

Розгляд трьох ключових типів IoT-систем промислових, комерційних (будівельних) і споживчих стало зрозуміло, що вибір конкретного рішення залежить від таких факторів, як розмір об'єкта, потреби в аналізі даних, точність вимірювань та доступний бюджет. Промислові системи відзначаються високим рівнем точності, масштабованістю та глибокою аналітикою. Вони забезпечують всебічний контроль над великими підприємствами та критично важливими об'єктами, сприяючи прогнозуванню пікових навантажень, зменшенню витрат і оптимізації виробничих процесів. Головним недоліком таких рішень є висока вартість і складність впровадження.

Комерційні та будівельні IoT-рішення орієнтовані на моніторинг енерговитрат у межах офісних будівель, торгових центрів або житлових комплексів. Вони пропонують інструменти для зручної візуалізації даних, доступу через веб-платформи чи мобільні додатки, а також дозволяють проводити аналіз енергоспоживання для окремих зон чи поверхів. Основною перевагою цієї категорії є вдале поєднання функціональності й відносної доступності. Споживчі пристрої створені для базового контролю

енергоспоживання на рівні окремих побутових приладів. Вони вирізняються доступністю, простотою у використанні та ідеально підходять для широкого кола приватних користувачів. Однак їхній функціонал обмежений, а потенціал для масштабного аналізу суттєво знижений.

Висновки до розділу 1

У першому розділі здійснено аналіз поточного стану енергоспоживання підприємств, а також основних проблем, які виникають через неефективне використання електроенергії, перевитрати та відсутність точного контролю за її споживанням. З'ясовано, що традиційні підходи до обліку і моніторингу енергоспоживання часто не дозволяють своєчасно виявляти аномалії і оптимізувати витрати, що веде до економічних і екологічних втрат. У тексті розглянуто основні концепції та принципи функціонування технології Internet of Things, яка створює можливість інтеграції датчиків, мережевих пристроїв і програмних платформ для збору, передачі та аналітики даних у режимі реального часу. Дана технологія забезпечує ефективний моніторинг, прогнозування та управління енергоспоживанням на підприємствах, що сприяє точнішому плануванню та раціональнішому використанню ресурсів.

Аналіз наявних IoT-рішень показав їх класифікацію на промислові, комерційні (для будівель) та побутові системи. Кожен тип вирізняється своїми особливостями: промислові системи характеризуються широкими аналітичними можливостями та високою масштабованістю, комерційні оптимально розраховані на будівлі середнього і великого розміру, а побутові забезпечують простий контроль споживання на рівні окремих електроприладів. Тому впровадження IoT-технологій у сферу енергоменеджменту підприємств демонструє високу ефективність у мінімізації витрат на електроенергію, покращенні енергоефективності та забезпеченні стійких виробничих процесів. Це робить даний напрямок перспективним для адаптації в сучасних промислових і комерційних об'єктах.

РОЗДІЛ 2

ПРОЄКТУВАННЯ ІОТ-СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ НА ТОВ «ОПТИМА ФАРМ»

2.1. Проєктування ІоТ-системи для умов підприємства

Сучасні фармацевтичні підприємства, як-от ТОВ «Оптимі Фарм», характеризуються значним рівнем енергоспоживання. Це пов'язано з безперебійною роботою складських комплексів, холодильного та вентиляційного обладнання, кліматичних систем, автоматизованих виробничих ліній, серверної інфраструктури та систем освітлення. У таких умовах все більш актуальним стає впровадження інтелектуальних ІоТ-систем для моніторингу споживання енергії. Такі системи забезпечують збір, аналіз та візуалізацію даних про енергоспоживання в реальному часі. Розробка ІоТ-системи для моніторингу енергоспоживання у ТОВ «Оптимі Фарм» передбачає створення багаторівневої інформаційно-вимірювальної структури, здатної:

- підтримувати безперервний контроль енергоспоживання;
- виявляти неефективну експлуатацію обладнання;
- скорочувати витрати на електроенергію;
- покращувати загальний рівень енергоефективності підприємства

Інфраструктура ТОВ «Оптимі Фарм» включає наступні об'єкти [36]:

- склади з контрольованим мікрокліматом;
- холодильні та морозильні установки;
- адміністративні офіси;
- технічні приміщення;
- сервери та автоматизовані логістичні системи.

Особлива увага приділяється забезпеченню стабільного електропостачання через високий ризик втрати якості лікарських засобів у разі навіть короткочасного відключення електроенергії. Отже, система моніторингу повинна бути максимально надійною, масштабованою й захищеною.

Проектована IoT-система матиме класичну трирівневу архітектуру:

1. Збір даних (сенсорний рівень)

На цьому рівні використовуються сучасні лічильники електроенергії та датчики для моніторингу таких показників:

- активна та реактивна електроенергія;
- струм і напруга;
- миттєва потужність;
- коефіцієнт потужності.

Лічильники встановлюються на входах електроживлення, у розподільчих щитах окремих зон (склади, цехи) та на енергоємному обладнанні, такому як вентиляційні системи й холодильники.

2. Передача і обробка даних (мережевий рівень)

Дані передаються за допомогою дротових (Ethernet, RS-485, Modbus) і бездротових протоколів (Wi-Fi, LoRaWAN, NB-IoT). Для великогабаритних складських приміщень доцільно використовувати гібридну мережу, що поєднує дротові й бездротові технології для забезпечення стабільності передачі даних.

3. Аналіз і візуалізація (прикладний рівень)

На цьому рівні функціонуватимуть:

- сервер збору та зберігання даних;
- база даних із показниками енергоспоживання;
- аналітичні модулі;
- веб-інтерфейс і мобільний додаток для користувачів.

Користувачі системи, серед яких інженери, енергоменеджери та керівництво, матимуть можливість переглядати статистику в режимі реального часу, аналізувати показники за різні періоди (добові, місячні, річні) та отримувати автоматизовані сповіщення про потенційні перевищення встановлених лімітів. Основні вимоги до IoT-системи моніторингу енергоспоживання для ТОВ «Оптимі Фарм» включають забезпечення надійної та безперервної роботи системи; можливість масштабування для підключення додаткових вузлів; високий рівень інформаційної безпеки та надійний захист

даних; інтеграцію з уже існуючими системами компанії; енергоефективність та мінімальну потребу в обслуговуванні.

Реалізація IoT-системи моніторингу енергоспоживання сприятиме зниженню витрат електроенергії на 10-20%; покращенню управління енергетичними ресурсами; підвищенню прозорості енергетичних процесів; створенню бази для подальшої автоматизації та розвитку концепції Smart Enterprise. Поняття Internet of Things спочатку стосувалося лише підключення різноманітних об'єктів сенсорів, актуаторів і контролерів до мережі з метою автоматичного збору та обміну даними. Проте сьогодні дедалі частіше використовується ширше поняття Internet of Everything, що охоплює не лише пристрої, але й людей, процеси та інформацію. Це призводить до зростання вимог щодо індивідуалізації сервісів, аналізу великих обсягів даних і забезпечення кібербезпеки. У контексті автоматизації це означає перехід від окремих «розумних» пристроїв, як-от лампи чи термостати, до комплексних екосистем, здатних адаптуватися до поведінки робітників і оптимізувати роботу у реальному часі. Перед детальним аналізом розглянемо узагальнені відмінності двох підходів, які слугуватимуть методологічною основою для проєкту (табл. 2.1).

Таблиця 2.1

**Порівняння традиційних систем енергомоніторингу та IoT-систем
моніторингу енергоспоживання**

Критерій	Традиційні системи моніторингу	IoT-системи моніторингу енергоспоживання
1	2	3
Об'єкт контролю	Загальне енергоспоживання підприємства	Окремі ділянки, обладнання, приміщення
Збір даних	Періодичний, ручний або напівавтоматичний	Безперервний, автоматизований, у реальному часі
Тип взаємодії	Людина – система	Пристрій – пристрій (M2M), пристрій – платформа

Закінчення таблиці 2.1

1	2	3
Архітектура системи	Централізована	Розподілена (децентралізована)
Масштабованість	Обмежена, потребує значних змін	Висока, просте додавання нових вузлів
Аналітичні можливості	Базова статистика	Розширена аналітика, прогнозування, звіти
Реакція на відхилення	Запізніла	Оперативна, з автоматичними сповіщеннями
Енергоефективність	Контроль без оптимізації	Активна оптимізація енергоспоживання
Інформаційна безпека	Мінімальні засоби захисту	Шифрування, автентифікація, контроль доступу
Додана цінність	Облік витрат електроенергії	Зниження витрат, оптимізація процесів, управлінські рішення

У таблиці 1.1 представлено порівняльний аналіз традиційних систем моніторингу енергоспоживання та IoT-систем, що допомагає наочно продемонструвати переваги використання IoT-технологій для потреб підприємства ТОВ «Оптима Фарм». Традиційні системи моніторингу зазвичай зосереджені на контролі загального рівня споживання електроенергії підприємством без детального поділу на окремі зони чи типи обладнання. Збір даних здійснюється періодично, часто з залученням ручного введення або напівавтоматичних рішень. Це значно уповільнює процес прийняття управлінських рішень через недостатню оперативність одержання інформації. Натомість IoT-системи забезпечують автоматизований і безперервний моніторинг енергоспоживання в режимі реального часу. Вони дозволяють аналізувати не лише загальний рівень споживання підприємства, а й одержувати детальні дані з окремих приміщень, зон виробництва чи

високоспоживального обладнання, як-от холодильні установки й системи вентиляції [12].

Фундаментальною різницею між технологіями є їх архітектурна побудова. Традиційні системи здебільшого мають централізовану структуру, що ускладнює їх масштабування. Водночас IoT-системи використовують розподілену архітектуру, яка дає змогу легко нарощувати функціонал, додаючи нові сенсорні модулі без значного втручання у вже налаштовану систему. Аналітичний потенціал також істотно відрізняється. Якщо традиційні системи пропонують лише базові звіти, то IoT-рішення дозволяють виконувати глибший аналіз даних, накопичувати історичну інформацію, будувати графіки та оперативно виявляти аномалії у споживанні електроенергії. Завдяки таким можливостям значно підвищується швидкість і точність реагування на перевищення допустимих параметрів, що сприяє впровадженню ефективних заходів для оптимізації енергоспоживання.

Особливої уваги заслуговує питання інформаційної безпеки, у той час як традиційні системи обмежуються мінімальними засобами захисту, IoT-платформи передбачають застосування сучасних методів шифрування даних, автентифікації пристроїв та контролю доступу користувачів, що забезпечує високий рівень захищеності. Отже, проведене порівняння чітко демонструє, що використання IoT-систем для моніторингу енергоспоживання є більш ефективним і перспективним підходом, особливо для підприємств із підвищеними вимогами до енергоефективності і надійності, як у випадку ТОВ «Оптима Фарм» [36].

Ефективність системи моніторингу енергоспоживання на підприємстві значною мірою визначається способами обміну даними між її компонентами, а також оперативністю реагування на зміни режимів роботи електрообладнання. У сучасних системах Інтернету речей (IoT) виділяють три основні моделі взаємодії: машина - машина (M2M), людина - машина (P2M) та вузол- вузол (P2P). Кожна з цих моделей виконує унікальну роль у багаторівневій

архітектурі системи моніторингу, формуючи специфічні вимоги до вибору мережевих протоколів та механізмів забезпечення безпеки.

Модель M2M охоплює автоматизований обмін даними між інтелектуальними лічильниками, датчиками параметрів електромережі та шлюзами збору інформації без участі людини. Для передачі даних всередині підприємства доцільно застосовувати протоколи типу MQTT або Modbus TCP, які гарантують мінімальні затримки, високу надійність передачі та можливість функціонування у локальній мережі. Основні переваги цього підходу полягають у швидкій реакції системи та постійному контролі за її роботою. Водночас головними викликами залишаються забезпечення безпеки каналів зв'язку та контроль доступу до даних вимірювань.

Модель P2M розроблена для спрощення взаємодії персоналу підприємства з IoT-системою моніторингу. Її реалізація передбачає використання веб-інтерфейсів, диспетчерських панелей або аналітичних звітів, що дозволяють енергоменеджерам та адміністрації отримати інформацію про поточний стан і динаміку енергоспоживання. Така модель потребує інтуїтивно зрозумілого інтерфейсу, наочної візуалізації даних, а також надійних механізмів автентифікації користувачів і обмеження їх доступу.

Модель P2P спрямована на автономну взаємодію між компонентами системи, як-от лічильниками або сенсорами та локальними контролерами, без використання центрального сервера або брокера повідомлень. У промислових умовах така модель може бути реалізована із застосуванням локальних протоколів для швидкого обміну даними. Використання цього підходу сприяє підвищенню стійкості системи до збоїв і забезпечує виконання ключових функцій моніторингу навіть за відсутності зв'язку з сервером. Однак це ускладнює централізоване управління безпекою мережі та журналювання подій. Для узагальнення ключових особливостей моделей взаємодії в IoT-системах моніторингу енергоспоживання на підприємствах розроблено таблицю 2.2.

Таблиця 2.2

Порівняння моделей M2M, P2M та P2P в IoT-системі моніторингу енергоспоживання підприємства

Параметр	M2M	P2M	P2P
Типовий канал зв'язку	MQTT, Modbus TCP	HTTPS, WebSocket	Локальні протоколи прямого обміну
Затримка, мс	50–200	200–400 (з урахуванням інтерфейсу користувача)	10–100
Потреба у брокері	Висока	Помірна	Відсутня
Ключові переваги	Безперервний автоматизований збір даних, висока швидкість реакції	Зручність аналізу та управління для персоналу	Підвищена відмовостійкість, автономна робота вузлів
Основні ризики	Підміна даних, атаки типу DoS	Несанкціонований доступ користувачів	Ускладнене централізоване журналювання подій

Таблиця 2.2 містить порівняльний аналіз моделей взаємодії M2M, P2M та P2P, що застосовуються в IoT-системі моніторингу енергоспоживання підприємства ТОВ «Оптима Фарм», і висвітлює їх функціональні особливості, переваги та обмеження в контексті інтегрованої архітектури системи.

Модель M2M (машина-машина) виступає основою системи моніторингу енергоспоживання, оскільки забезпечує автоматизований обмін інформацією між інтелектуальними лічильниками, сенсорними вузлами та серверною платформою без втручання людини. Її ключова перевага полягає у використанні протоколів передачі даних, таких як MQTT або Modbus TCP, які забезпечують низьку затримку у передачі інформації та сприяють безперервній роботі системи в межах локальної мережі підприємства. Проте M2M-взаємодія потребує високого рівня захисту каналів зв'язку, адже вона є потенційно вразливою до атак типу DoS чи підміни даних.

Модель P2M (людина-машина) спрямована на забезпечення взаємодії між користувачами та IoT-системою через веб-інтерфейси, панелі моніторингу чи аналітичні інструменти. Ця модель забезпечує доступ до даних про енергоспоживання, можливість створення звітів та підтримку управлінських рішень. Однак час відгуку для P2M є тривалішим порівняно з M2M через необхідність обробки даних і їх подальшої візуалізації у зручному форматі. Основним викликом є запобігання несанкціонованому доступу до системи, що підкреслює важливість впровадження надійних механізмів автентифікації та розподілу прав доступу.

Модель P2P (вузол-вузол) базується на прямому обміні даними між елементами IoT-системи без залучення центрального брокера повідомлень. Цей підхід характеризується мінімальною затримкою передачі інформації та значно підвищує стійкість системи до відмов, оскільки окремі вузли здатні продовжувати функціонування навіть за відсутності зв'язку із серверною частиною. Проте відсутність центрального посередника ускладнює задачі журналювання подій і організації безпеки, через що використання P2P-моделі найдоречніше в якості вторинного рішення.

Як бачимо результати аналізу в межах таблиці 2.2 доводять, що оптимальна IoT-система моніторингу енергоспоживання повинна інтегрувати всі три моделі взаємодії: M2M для ефективного збору даних, P2M для їх аналізу і прийняття рішень, а також P2P для забезпечення автономності та надійності всієї системи. Комунікаційний стек є фундаментальною складовою системи моніторингу енергоспоживання в Інтернеті речей (IoT), оскільки саме вибір відповідних мережевих протоколів визначає ефективність і надійність отримання даних. Це впливає на здатність системи витримувати умови виробничого середовища, оперативність передачі вимірювань, а також забезпечує автономну функціональність у разі проблем із зовнішньою мережею. Від обраного протоколу залежать такі характеристики, як затримки передачі даних від інтелектуальних лічильників, ефективність

енергоспоживання сенсорних вузлів, а також можливості масштабування для інтеграції додаткового обладнання в майбутньому [13].

Для підприємства ТОВ «Оптима Фарм», діяльність якого супроводжується використанням великих складських площ та енергоємного устаткування, особливе значення мають такі характеристики комунікаційного стека: надійність обміну даними, оптимізація енергоспоживання, здатність до автономної роботи та сумісність із платформами енергомоніторингу. Наприклад, протоколи з низьким рівнем енергоспоживання варто застосовувати для автономних сенсорних вузлів, тоді як для стаціонарних лічильників доцільною є інтеграція дротових або швидкісних бездротових технологій, які забезпечують стабільну передачу інформації. Особливий акцент робиться на аспектах інформаційної безпеки, здатності до масштабування системи та її інтеграції з існуючими серверними платформами енергетичного моніторингу. Використання стандартних протоколів для обміну повідомленнями, адаптованих до промислових умов експлуатації, є визначальним фактором під час проєктування системи.

Подальший аналіз розглядає п'ять ключових технологій передачі даних, які могли б знайти своє застосування в контексті IoT-системи для моніторингу енергоспоживання. У тексті буде наведено обґрунтування вибору їхньої комбінації в межах кваліфікаційної роботи. Спочатку важливо зупинитися на розгляді базових характеристик цих технологій. У таблиці 1.3 представлений порівняльний аналіз основних мережевих протоколів за такими критеріями, як затримки передачі даних, переваги та обмеження, що їх слід враховувати при побудові відповідної IoT-системи. У таблиці 2.3 представлено порівняльну характеристику комунікаційних протоколів, які можуть бути використані в IoT-системі моніторингу енергоспоживання підприємства ТОВ «Оптима Фарм». Аналіз охоплює доступні канали зв'язку, середній час затримки передачі даних, а також ключові переваги та обмеження кожного з протоколів, що дозволяє обґрунтовано обрати відповідний протокол для розроблюваної системи.

Таблиця 2.3

Характеристика комунікаційних протоколів для IoT-системи моніторингу енергоспоживання підприємства

Протокол	Канал зв'язку	Середня затримка, мс	Переваги	Обмеження
MQTT	Wi-Fi або Ethernet	50–250	мінімальні накладні витрати; модель publish/subscribe; підтримка трьох рівнів QoS; зручна інтеграція з серверними платформами	залежність від брокера повідомлень; необхідність налаштування TLS
CoAP	Wi-Fi або Ethernet (UDP)	40–120	полегшений протокольний стек; підтримка multicast-запитів; низьке споживання ресурсів	ненадійний транспорт; потребує окремого механізму захисту (DTLS)
Matter	IPv6 поверх Wi-Fi, Thread, Ethernet	100–300	стандартизована взаємодія; автоматичне виявлення пристроїв; перспективна міжплатформна сумісність	обмежена кількість промислових пристроїв; складніша сертифікація
Zigbee	Радіоканал 2,4 ГГц (mesh-мережа)	30–150	сіткова топологія; ультранизьке енергоспоживання; висока надійність для сенсорних вузлів	потребує шлюзу для інтеграції з IP-мережею
ESP-Now	Радіоканал 2,4 ГГц (P2P)	10–80	прямий обмін між вузлами ESP32; автономна робота без маршрутизатора; мінімальна затримка	обмежений розмір пакетів; відсутність централізованого журналювання

Протокол MQTT вважається оптимальним для централізованого збору й передачі вимірювальних даних від інтелектуальних лічильників і сенсорних пристроїв на серверну платформу. Серед основних переваг протоколу варто виділити низькі накладні витрати та модель publish/subscribe, яка сприяє

масштабованості системи та забезпечує стабільне функціонування в межах локальної мережі підприємства. Проте MQTT вимагає налаштування брокера повідомлень і впровадження TLS для гарантії безпеки даних, що ускладнює конфігурацію системи.

Протокол CoAP орієнтований на пристрої з обмеженими обчислювальними ресурсами та забезпечує низький рівень затримок під час передачі даних. Це робить його придатним для роботи з локальними сенсорними вузлами. Однак використання UDP як транспортного рівня зменшує надійність передачі інформації, що потребує додаткових механізмів захисту, таких як DTLS.

Протокол Matter розглядається як перспективна технологія завдяки стандартизованій сумісності та функції автоматичного виявлення пристроїв у мережі. Попри це, його впровадження в промислових системах моніторингу енергоспоживання наразі обмежено через малу кількість сумісних пристроїв і складність процесів сертифікації.

Протокол Zigbee є ефективним рішенням для застосування в автономних сенсорних вузлах, розташованих у складських чи технічних приміщеннях підприємств, завдяки енергозберігаючій сітковій (mesh) топології. Його недоліком є необхідність встановлення шлюзу для інтеграції з IP-мережею та серверною частиною системи моніторингу.

Протокол ESP-Now дозволяє напряму передавати дані між вузлами, що базуються на ESP32, без використання маршрутизаторів або брокерів повідомлень. Це зменшує затримки передачі й підвищує автономність системи. Водночас обмежений розмір передаваних пакетів і відсутність функції централізованого журналювання подій звужують сферу його застосування до допоміжних або резервних сценаріїв. Результати аналізу в таблиці 2.3 свідчать на користь використання комбінованого комунікаційного стека. Зокрема, MQTT можна застосовувати як основний протокол централізованої передачі даних; Zigbee або ESP-Now для забезпечення енергоефективності сенсорних

вузлів; Ethernet чи Wi-Fi для стаціонарних лічильників і серверної інфраструктури системи моніторингу.

Таблиця 2.4

**Типові пристрої та канали зв'язку в IoT-системі моніторингу
енергоспоживання підприємства**

Клас пристрою	Приклад	Основний протокол	Резервний канал
Інтелектуальний лічильник	Shelly EM, Sonoff Pow R2	MQTT через Wi-Fi	CoAP або ESP-Now
Сенсор струму	ACS712 на ESP32	MQTT	Zigbee
Сенсор температури та вологості приміщення	DHT22 або BME280 на ESP32	MQTT	ESP-Now

Таблиця 2.4 ілюструє типові сценарії застосування протоколів у проєкті IoT-моніторингу енергоспоживання підприємства. Основний протокол MQTT використовується для централізованого збору даних і їх передачі на серверну платформу. Резервні канали, такі як ESP-Now, CoAP або Zigbee, забезпечують автономну роботу сенсорів і лічильників у разі відключення основної мережі. Таке поєднання дозволяє гарантувати надійність, масштабованість і оперативність моніторингу.

Таблиця 2.5

**Ключові характеристики апаратних модулів IoT-системи моніторингу
енергоспоживання підприємства**

Модуль	Тип підключення	Споживана потужність	Роль у системі	Примітки
1	2	3	4	5
ESP32 (контролер)	Wi-Fi, Bluetooth, GPIO	Deep-sleep: 10–150 μ A; активний режим: ~60–240 мА	Централізоване приймання даних від сенсорів, керування актуаторами	Двоядерний CPU до 240 МГц; універсальний вузол для прототипу

Закінчення таблиці 2.5

1	2	3	4	5
Фотометр BH1750	I ² C	~0,12 мА	Моніторинг освітленості приміщень	16-бітна роздільність, 1–65 000 lx
Датчик температури та вологості DHT22	Цифровий	1–1,5 мА	Вимір температури та вологості	±0,5 °C, ±2 % RH
Газовий сенсор MQ-2	Аналоговий / ADC	150 мА (піковий)	Виявлення витоків газу	SnO ₂ -матриця для LPG, пропану, водню, метану
WS2812B-матриця	Цифровий GPIO	60–150 мА (залежно від анімації)	Візуальна індикація стану системи	Зелений – норма; синій – втрата зв'язку; червоний – тривога
Лампа TP-Link Tapo L530E	Wi-Fi (MQTT)	8,3 Вт	Керування освітленням	800 лм, 16 млн кольорів; підтримка Matter після оновлення FW
Потенційні сенсори (не впроваджено)	—	—	Розширення функцій моніторингу	Можливе підключення додаткових вузлів у майбутньому

Таблиця демонструє апаратну базу проєктованої IoT-системи та відображає ключові характеристики модулів: способи підключення, споживану потужність і роль у системі моніторингу. ESP32 виступає універсальним контролером, що забезпечує приймання даних від сенсорів, передачу команд актуаторам і інтеграцію з платформою Home Assistant. Сенсори BH1750, DHT22 та MQ-2 забезпечують контроль параметрів енергоспоживання, температури, вологості та безпеки середовища. WS2812B-матриця дає візуальний зворотний зв'язок для оперативного спостереження стану системи. Лампи TP-Link Tapo L530E використовуються для автоматизованого керування освітленням із можливістю масштабування та інтеграції з різними протоколами.

Таке представлення дозволяє наочно оцінити енергоефективність вузлів, сумісність із протоколами та можливості масштабування систем. Для створення прототипу було обрано апаратну платформу, яка забезпечує енергоефективний збір даних, зручне бездротове керування та наочну індикацію стану системи.

2.2. Розроблення програмного алгоритму функціонування системи

Архітектура прототипу IoT-системи моніторингу енергоспоживання передбачає центральний сервер-шлюз на базі Raspberry Pi, що включає Home Assistant, MQTT-брокер і Grafana, кілька вузлів ESP32 та смарт-лампи TP-Link Taro, які підключаються безпосередньо до домашнього маршрутизатора Wi-Fi. Дані від сенсора BH1750 надходять на MQTT-брокер у вигляді повідомлень теми `home/livingroom/lux`, тоді як автоматизація Home Assistant публікує команду `home/livingroom/light/command` для керування освітленням. У разі втрати з'єднання з маршрутизатором контролери ESP32 переходять у peer-to-peer режим через ESP-Now та передають один одному мінімальний набір аварійних подій, зокрема сигнал тривоги для LED-матриці WS2812B [15].

У складі мережі виділено два логічні сегменти:

-IoT-VLAN 20 (адреси 192.168.20.0/24) для всіх вузлів ESP32 і ламп Taro;

-Core-VLAN 10 (адреси 192.168.10.0/24) для сервера Home Assistant.

Між сегментами дозволено лише порт 8883/TCP (MQTT over TLS), що мінімізує поверхню атаки та підвищує безпеку системи. Схема потоку даних у системі представлена на рисунку 2.1.

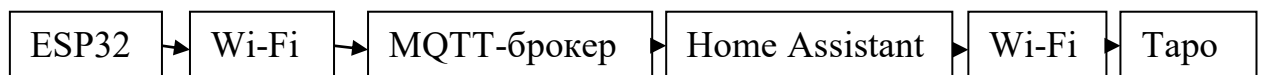


Рис. 2.1. Поток даних у системі

А резервний канал ESP-Now дозволяє обмінюватися критичними повідомленнями автономно, минаючи брокер і маршрутизатор. Перед описом програмних модулів наведено блок-діаграму топології мережі (рис. 2.1), що

наочно ілюструє підключення вузлів, логічну сегментацію та маршрути обміну даними. Програмна архітектура вузлів ESP32 реалізована на основі модульної структури, що дозволяє забезпечити ефективний збір, обробку та передавання даних, а також автономне резервне функціонування за допомогою протоколу ESP-Now.

Структура кожного вузла складається з наступних функціональних модулів [15]:

- Модуль сенсорного зчитування виконує періодичний опит сенсорів (BH1750, DHT22, MQ-2), підключених через шини I²C, а також цифрові чи аналогові виводи GPIO. Отримані дані організовуються у структуровані пакети, які включають тип сенсора, отримане значення, часову мітку та унікальний ідентифікатор вузла.
- Модуль обробки даних та автоматизації аналізує зібрані показники, перевіряючи їх на відповідність встановленим пороговим значенням (наприклад, рівні освітленості, температури або концентрації газу). У разі виявлення аварійних ситуацій формуються сигнали тривоги для виводу на WS2812B-матрицю та готується повідомлення для відправлення через MQTT або ESP-Now. Крім того, підтримується механізм переходу в енергоощадний режим deep-sleep, що суттєво знижує споживання енергії у стані простою.
- Модуль комунікації у штатному режимі передає дані на центральний MQTT-брокер через Wi-Fi-з'єднання. Публікація здійснюється у відповідні топіки, наприклад `home/livingroom/lux` для сенсора BH1750 або `home/livingroom/gas` для MQ-2. У разі втрати зв'язку з маршрутизатором автоматично активується резервний комунікаційний канал через ESP-Now, що забезпечує peer-to-peer обмін критично важливими повідомленнями між вузлами.
- Модуль керування виконавчими пристроями це компонент відповідає за приймання команд від системи Home Assistant та їх перетворення у сигнали для керування пристроями, такими як лампи TP-Link Таро, через MQTT-протокол.

Окрім цього, забезпечується синхронізація стану освітлення із сигналізацією, представленою на WS2812B-матриці.

Безпеку передачі даних забезпечує використання протоколу TLS для MQTT-повідомлень та базового механізму автентифікації в протоколі ESP-Now. Крім того, локально ведеться обмежена історія подій для здійснення резервного моніторингу у випадках відсутності зв'язку з центральним сервером. Логіка функціонування вузла ESP32 побудована на циклічному опитуванні сенсорів, обробці даних, їх публікації через MQTT та веденні резервного обміну повідомленнями за допомогою ESP-Now. У разі відсутності критичних подій протягом визначеного інтервалу часу вузол автоматично входить у режим енергоощадного глибокого сну (deep-sleep). Така організація програмних модулів забезпечує високоефективне збирання даних, оперативне реагування на аварійні ситуації та інтеграцію з платформою Home Assistant задля створення гнучкої та надійної системи автоматизації.

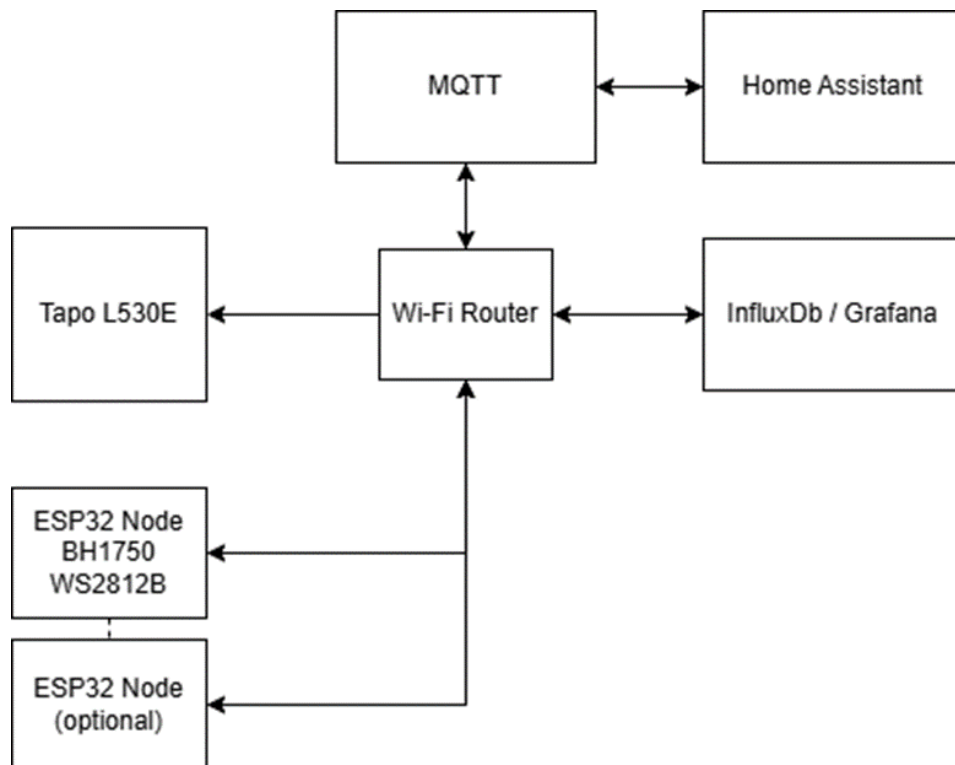


Рис. 2.2 Діаграма топології мережі

Вузол включає в себе плату ESP32 DevKitC, сенсор освітленості BH1750 і світлодіодну матрицю WS2812B розміром 8×8 . У таблиці 2.1 вказано контакти, що використовуються контролером, лінії живлення, а також відповідні кольори дротів. Таблиця відображає призначення всіх ключових виводів ESP32 у прототипі, включаючи сенсори освітленості, температури, газу та індикатори стану. Використання спільного GND і I²C для BH1750 забезпечує компактність і зручність підключення, а окремі GPIO призначені для WS2812B і інших цифрових сигналів. Серійні резистори на лініях DIN і підтягувальні резистори I²C підвищують стабільність роботи системи та захищають від електричних шумів.

Таблиця 2.6

Призначення виводів ESP32 у прототипі

Вивід ESP32	Підключений модуль	Колір дроту	Сигнал	Примітка
3 V3	BH1750	Синій	живлення 3,3 В	окремий стабілізатор не потрібен
5 V	WS2812B	Чорний	живлення 5 В	окремий стабілізатор не потрібен
GND	BH1750, WS2812B, DHT22, MQ-2	Рожевий	загальна земля	спільна шина
GPIO 32	BH1750	Помаранчевий	SCL (I ² C)	стандартна частота 400 кГц
GPIO 33	BH1750	Червоний	SDA (I ² C)	підтягувальні резистори 4,7 кОм
GPIO 25	WS2812B	Білий	DIN	рекомендовано серійний резистор 330 Ом
GPIO 26	DHT22	Зелений	Data (цифровий)	підключення до 3,3 В
GPIO 27	MQ-2	Жовтий	Analog ADC	вимір напруги газового сенсора
GPIO 14	LED індикація аварій	Синьо-зелений	Цифровий	додатковий вихід для сигналізації
EN	—	—	Живлення ESP32	підключення кнопки ресету (опціонально)

Вузол ESP32 (рис. 2.3) у прототипі працює у двох основних режимах: активний та глибокий сон (deep sleep). У активному режимі контролер тримає увімкненим Wi-Fi, опитує сенсор освітленості BH1750 по шині I²C (SCL - GPIO 32, SDA - GPIO 33) і, за потреби, оновлює кадр на WS2812B-матриці, яка підключена до GPIO 25. У цьому стані струм споживання коливається в межах 70-90 мА. Після передачі значень освітленості на MQTT-брокер вузол переходить у режим deep sleep із вимкненим радіомодулем; при цьому струм знижується до 120-150 μ А, що забезпечує тривалу роботу від батареї.

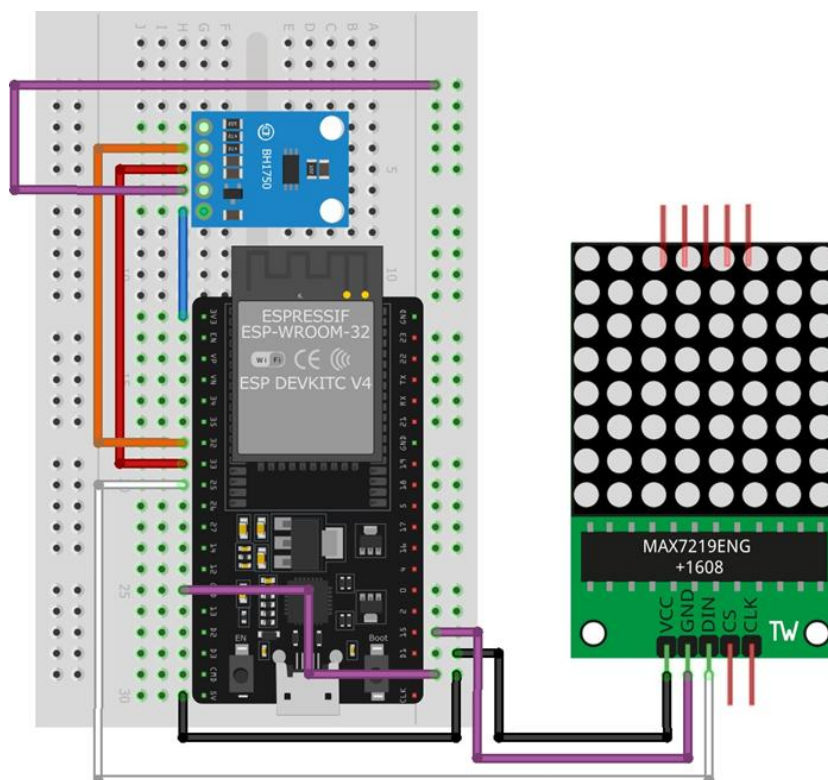


Рис. 2.3. Схема підключення ESP32

Живлення сенсора BH1750 здійснюється з лінії 3V3 (синій дріт), а матриця WS2812B підключена до лінії 5 В (чорний дріт). Спільна земля (рожевий дріт) об'єднує всі модулі, що забезпечує коректні рівні логіки без використання окремого конвертера. Для зменшення пікового струму та економії енергії матриця WS2812B працює на 20 % яскравості, що обмежує споживання багатокольорового індикатора приблизно 120 мА навіть у режимі повного засвічення.

Розрахунок енергоспоживання вузла ESP32

Інтервал вимірювань, с	Тривалість активної частини, мс	Струм активний, мА	Струм deep sleep, μ А	Середньодобове споживання, Вт·год/добу	Висновок щодо вимоги $\leq 0,5$ Вт·год
10	250	80	150	1,34	Перевищує вимогу
20	250	80	150	0,67	Перевищує вимогу
30	250	80	150	0,45	Відповідає вимозі
60	250	80	150	0,23	Відповідає вимозі
120	250	80	150	0,12	Відповідає вимозі

Середньодобове споживання обчислюється за формулою:

$$E_{\text{добове}} = I_{\text{active}} \cdot t_{\text{active}} + I_{\text{sleep}} \cdot t_{\text{sleep}}, \quad (2.1)$$

де I_{active} – струм у активному режимі;

t_{active} – час активної роботи;

I_{sleep} – струм у режимі deep sleep;

t_{sleep} – час у режимі сну (24 години – активний час).

Вихідні дані (для інтервалу 30 с):

Інтервал вимірювань:

$$T = 30 \text{ с}$$

Тривалість активної фази:

$$t_{\text{active}} = 0,25 \text{ с}$$

Струм у активному режимі:

$$I_{\text{active}} = 0,08 \text{ А}$$

Струм у режимі deep sleep:

$$I_{\text{sleep}} = 0,00015 \text{ А}$$

Напруга живлення ESP32:

$$U = 3,3 \text{ В}$$

Кількість вимірювань за добу:

$$N=86400/30=2880$$

Активний час за добу

$$t_{active_day}=N \cdot 0,25=2880 \cdot 0,25=720 \text{ с}$$

Час у режимі deep sleep за добу

$$t_{sleep_day}=86400-720=85680 \text{ с}$$

Добове споживання енергії в активному режимі

$$E_{active}=U \cdot I_{active} \cdot t_{active_day} \quad (2.2)$$

$$E_{active}=3,3 \cdot 0,08 \cdot 720=190,08 \text{ Дж}$$

Добове споживання енергії в режимі deep sleep

$$E_{sleep}=U \cdot I_{sleep} \cdot t_{sleep_day} \quad (2.3)$$

$$E_{sleep}=3,3 \cdot 0,00015 \cdot 85680=42,41 \text{ Дж}$$

Загальне добове енергоспоживання

$$E_{day}=E_{active}+E_{sleep} \quad (2.4)$$

$$E_{day}=190,08+42,41=232,49 \text{ Дж}$$

Переведення у Вт·год

$$E_{day}=232,49/3600 \approx 0,45 \text{ год/добу}$$

За інтервалу вимірювань 30 с середньодобове споживання становить приблизно 0,45 Вт·год, що відповідає вимозі енергоефективності для вузлів системи. Тому обрана апаратна конфігурація та режим роботи ESP32 забезпечують енергоефективний збір даних та надійну індикацію стану системи в умовах ТОВ «Оптима Фарм», дозволяючи одночасно підтримувати резервний обмін даними через ESP-Now та централізоване керування освітленням через MQTT.

2.3. Моделювання та тестування роботи IoT-системи

Центром IoT-системи моніторингу енергоспоживання на ТОВ «Оптима Фарм» є локальний шлюз, який об'єднує логіку автоматизацій, зберігання телеметрії та візуалізацію даних. Навіть якщо вузли ESP32 і лампи TP-Link

Таро працюють автономно, саме цей вузол виконує роль «мозку» системи, формуючи правила, які визначають, коли та з якою інтенсивністю має ввімкнутися освітлення або подати індикацію аварійного стану.

Усі основні серверні підсистеми розміщуються у Docker-контейнерах, що забезпечує [19]:

- швидке розгортання без участі користувача;
- ізоляцію залежностей оновлення однієї служби не впливає на інші;
- просте резервне копіювання через експорт томів;

Можливість перенести всі сервіси на інше обладнання однією командою.

Склад контейнерів та їх базові порти:

1. Home Assistant (порт 8123, HTTP/WS) - рушій автоматизацій;
2. Mosquitto (порт 1883, MQTT) - шина обміну повідомленнями;
3. InfluxDB v2 (порт 8086, HTTP API) - база часових рядів для зберігання телеметрії;
4. Grafana (порт 3000, HTTP/WS) - дашборди та візуалізація даних у реальному часі.

Контейнери об'єднані у віртуальну мережу docker-bridge з підмережею 172.18.0.0/16, тоді як фізично шлюз під'єднаний до Core-VLAN 10 маршрутизатора. Вузли ESP32 і лампи Таро підключаються з IoT-VLAN 20 лише на порт 1883 (MQTT), що мінімізує поверхню атаки та обмежує доступ до інших служб.

Розглянемо послідовність обміну даними та механізм роботи системи, де кожні 30 с вузол ESP32 вимірює освітленість і публікує пакет home/lux; Mosquitto розповсюджує повідомлення підписникам, зокрема Home Assistant; Home Assistant порівнює отримане значення з порогом, заданим користувачем у панелі Lovelace. Дубль пакета телеметрії записується у bucket iot бази InfluxDB, Grafana опитує InfluxDB і формує графік «Lux History» з кроком 1 хв. Завдяки такій архітектурі затримка між сенсором і світильником у лабораторних умовах не перевищує 180 мс, а всі процеси працюють локально без доступу до

інтернету, що гарантує стабільність і надійність системи в умовах підприємства.

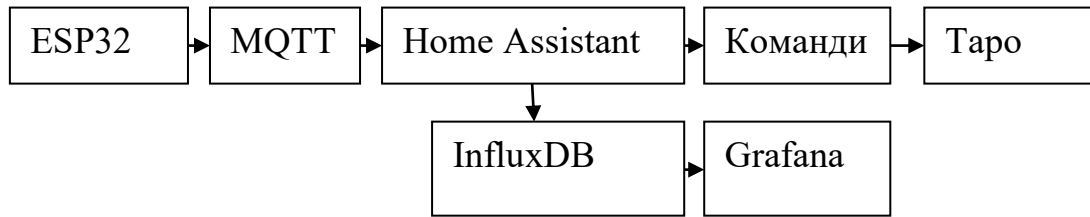


Рис. 2.4 Послідовність обміну даними та механізм роботи системи

Усі процеси відбуваються локально, що забезпечує низьку затримку (близько 180 м/с) та безперервну роботу навіть без інтернету. ESP32 (IoT-VLAN 20) вимірює параметри освітленості, температури та газу; публікує дані через MQTT (порт 1883); використовує резервний канал ESP-Now для P2P обміну у разі втрати Wi-Fi. Лампи TP-Link Таро (IoT-VLAN 20) приймають команди від Home Assistant через MQTT або локальний API; виконують зміни стану освітлення та яскравості. Локальний шлюз / сервер (Core-VLAN 10), де Home Assistant (порт 8123) рушій автоматизацій, формує правила включення/виключення світла. Mosquitto (порт 1883) - брокер MQTT для публікації/підписки даних; InfluxDB v2 (порт 8086)- база часових рядів для зберігання телеметрії; Grafana (порт 3000) - дашборди для візуалізації показників освітленості та енергоспоживання. Docker-мережа (docker-bridge 172.18.0.0/16) має контейнери ізольовані один від одного. Забезпечує швидке розгортання та резервне копіювання та фізично шлюз під'єднаний до Core-VLAN 10 маршрутизатора. Міжмережевий доступ де ESP32 і Таро можуть виходити лише на порт 1883/TCP для MQTT, інші порти закриті, що мінімізує ризики компрометації системи.

У логічній моделі лампа класифікується як «актуатор освітлення» і здійснює двосторонню взаємодію із системою Home Assistan [21]t:

1. Отримання команд-JSON-пакет надходить через топик `home/livingroom/light/command`.

2. Публікація стану-після виконання команди лампа передає MQTT-повідомлення через топик `home/livingroom/light/state`, включаючи актуальні параметри яскравості та кольору, це забезпечує синхронізацію інтерфейсу і графіків у Grafana. Після впровадження цього дизайну всі пристрої здійснюють обмін даними виключно в межах локальної мережі, що забезпечує високий рівень безпеки та ізоляції. Кожен клас вузлів має строго обмежені привілеї, які відповідають лише необхідному функціоналу, а їхні ролі чітко визначені та розмежовані. Передача управлінських та телеметричних пакетів здійснюється виключно у зашифрованому форматі, що гарантує захист інформації від несанкціонованого доступу. Центральну роль системи виконує Home Assistant, який взаємодіє тільки з тими темами, що необхідні для реалізації сценаріїв автоматизації. Це забезпечує ефективний моніторинг, оперативне відновлення функціональності у разі збоїв та ведення логів доступу для проведення аудиту.

Плавне регулювання світлового середовища є ключовою функцією IoT-системи. У даному розділі детально розглянуто та проаналізовано алгоритм прийняття рішень, що забезпечує визначення оптимальних моментів активації та деактивації лампи Таро L530E. Окрім цього, описано механізм «ручного» втручання, який дозволяє перевизначити автоматичний режим роботи пристрою. Числові параметри для алгоритму базуються як на теоретичних розрахунках, представлених у підрозділі, так і на результатах експериментальних спостережень реакцій користувачів.

Висновки до розділу 2

Другий розділ кваліфікаційної роботи присвячений проектуванню IoT-системи моніторингу енергоспоживання для підприємства ТОВ «Оптіма Фарм». Обґрунтовано вибір розподіленої архітектури на базі мікроконтролерів ESP32, що забезпечують системі масштабованість, гнучкість налаштувань і сумісність з існуючою інфраструктурою підприємства. У рамках проектування визначено склад апаратних компонентів системи, описано принципи взаємодії

між вузлами збору даних і центральним сервером, а також обрано протоколи передачі даних. Для підвищення надійності роботи в промислових умовах використано MQTT для централізованого управління та резервний обмін через ESP-Now.

Розроблений програмний алгоритм забезпечує збір, обробку та передачу даних про енергоспоживання з урахуванням режимів енергозбереження. Застосування режиму *deep sleep* істотно знизило середньодобове енергоспоживання вузлів, що підтверджено проведеними розрахунками та відповідає вимогам енергоефективності. Під час моделювання і тестування системи перевірено коректність реалізації алгоритмів, стійкість обміну даними та адекватність реакції системи на зміну параметрів енергоспоживання. Результати підтвердили функціональність запропонованих рішень і їх практичну придатність до впровадження на підприємстві. Зрозуміло, що це є надійна основа для подальшого аналізу ефективності впровадження IoT-системи та оцінки її економічної доцільності в умовах ТОВ «Оптима Фарм».

РОЗДІЛ 3

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ СИСТЕМИ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ НА ТОВ «ОПТИМА ФАРМ»

3.1. Оцінка ефективності впровадження системи моніторингу енергоспоживання

Інтеграція IoT-системи для моніторингу енергоспоживання забезпечує безперервний збір та аналіз інформації про використання електроенергії в окремих підрозділах, технологічному обладнанні та об'єктах інфраструктури підприємства. Це допомагає оперативно виявляти надмірне споживання, аномальні навантаження чи недоцільні режими роботи, які складно виявити за допомогою традиційних методів обліку. Оцінювання впровадження системи моніторингу енергоспоживання на підприємстві ТОВ «Оптима Фарм» є важливим кроком у визначенні ефективності застосування сучасних технологій IoT у господарській діяльності. З огляду на зростання цін на енергоресурси та потребу в посиленні енергоефективності, автоматизовані системи контролю дозволяють не лише оптимізувати витрати, а й забезпечити покращення загальної продуктивності бізнес-процесів.

Технічна вигода впровадженої системи проявляється в підвищенні точності вимірювань, автоматизації контрольних процесів та можливості прогнозування споживання енергії. Завдяки встановленню датчиків, мережевих шлюзів та аналітичного програмного забезпечення забезпечується доступ до актуальних даних у режимі реального часу, це сприяє прийняттю зважених управлінських рішень щодо оптимізації роботи обладнання та енергетичних процесів. Економічна результативність системи моніторингу полягає у скороченні витрат на електроенергію завдяки зменшенню непродуктивних втрат, раціоналізації графіків роботи енергоємного обладнання та посиленню дисципліни енергоспоживання. Додатково використання технологій IoT дає

змогу мінімізувати ризики аварійних ситуацій через перевантаження мережі, тим самим знижуючи витрати на ремонт оснащення та усунення простоїв [22].

Отже, впровадження системи моніторингу енергоспоживання на основі IoT-технологій є як технічно, так і економічно вигідним рішенням для ТОВ «Оптима Фарм». Це сприяє підвищенню рівня енергоефективності, скороченню витрат на експлуатацію та створенню сучасної системи управління енергоресурсами на підприємстві.

Для обґрунтування доцільності впровадження системи моніторингу енергоспоживання на ТОВ «Оптима Фарм» проведемо оцінку її техніко-економічної ефективності, яка включає визначення рівня економії електроенергії, річного економічного ефекту та строку окупності інвестицій.

Для проведення орієнтовних розрахунків приймемо такі умовні показники, характерні для підприємств логістично-складського типу:

-річне споживання електроенергії підприємства $E_0 = 1\,200\,000$ кВт·год

-середній тариф на електроенергію $T = 5,0$ грн/кВт·год

-річні витрати на електроенергію до впровадження системи:

$$C_0 = E_0 \cdot T \quad (3.1)$$

$$C_0 = 1\,200\,000 \cdot 5 = 6\,000\,000 \text{ грн}$$

За даними практики впровадження IoT-систем моніторингу енергоспоживання, очікувана економія становить 8–15 %, тоді для розрахунків приймемо 10 %.

1) Річна економія електроенергії визначається за формулою:

$$\Delta E = E_0 \cdot \eta \quad (3.2)$$

η - відсоток зниження споживання електроенергії.

$$\Delta E = 1\,200\,000 \cdot 0,10 = 120\,000 \text{ кВт}$$

2) Річний економічний ефект від зменшення споживання електроенергії:

$$\Delta C = \Delta E \cdot T \quad (3.3)$$

$$\Delta C = 120\,000 \cdot 5 = 600\,000 \text{ грн/рік}$$

Впровадження системи моніторингу дозволяє скоротити витрати підприємства на електроенергію на 600 тис. грн щорічно.

3) Витрати на впровадження системи

датчики та лічильники - 180 000 грн

мережеве обладнання та шлюзи - 70 000 грн

програмне забезпечення та налаштування - 100 000 грн

монтажні та пусконаладжувальні роботи - 50 000 грн

Загальні капітальні витрати:

$$K=400\,000 \text{ грн}$$

4) Розрахунок строку окупності

$$T_{ок}=K/\Delta C$$

$$T_{ок}=400\,000/600\,000=0,67 \text{ року}$$

Як бачите строк окупності системи становить менше одного року, що свідчить про її високу економічну доцільність.

Основні показники ефективності

Очікуване зниження енергоспоживання $\approx 10\%$

Річна економія коштів 600 000 грн

Строк окупності 0,67 року

Підвищення енергоефективності та надійності роботи обладнання

Таблиця 3.1

Основні показники техніко-економічної ефективності впровадження системи моніторингу енергоспоживання на ТОВ «ОПТИМА ФАРМ»

№	Показник	Позначення	Значення	Одиниця виміру
1	2	3	4	5
1	Річне споживання електроенергії до впровадження	E_0	1 200 000	кВт·год
2	Середній тариф на електроенергію	T	5,0	грн/кВт·год
3	Річні витрати на електроенергію до впровадження	$C_0=E_0 \cdot T$	6 000 000	грн
4	Очікуваний рівень економії електроенергії	η	10	%

Закінчення таблиці 3.1

1	2	3	4	5
5	Річна економія електроенергії	$\Delta E = E_0 \cdot \eta$	120 000	кВт·год
6	Річний економічний ефект	$\Delta C = \Delta E \cdot T$	600 000	грн
7	Вартість датчиків і лічильників	-	180 000	грн
8	Вартість мережевого обладнання та шлюзів	-	70 000	грн
9	Вартість програмного забезпечення та налаштування	-	100 000	грн
10	Монтажні та пусконаладжувальні роботи	-	50 000	грн
11	Загальні капітальні витрати	K	400 000	грн
12	Строк окупності системи	$T_{ок} = K / \Delta C$	0,67	року

Розглядаючи таблицю 3.1 розрахунки демонструють, що впровадження IoT-системи моніторингу енергоспоживання забезпечує істотне скорочення витрат на електроенергію. При очікуваному зниженні споживання на 10 % річний економічний ефект становить 600 тис. грн, а строк окупності інвестицій менше одного року, що свідчить про високу економічну ефективність запропонованого рішення. Отримані розрахунки підтверджують, що впровадження системи моніторингу енергоспоживання на ТОВ «Оптима Фарм» є економічно ефективним та технічно обґрунтованим рішенням. Використання IoT-технологій дозволяє не лише скоротити витрати на електроенергію, але й створити основу для подальшого розвитку системи енергоменеджменту підприємства.

3.2. Економічне обґрунтування доцільності впровадження IoT-системи

IoT-системи моніторингу споживання енергії дозволяють здійснювати постійний автоматизований збір, передачу, обробку та аналіз даних щодо використання електроенергії в реальному часі. Це створює можливість об'єктивно контролювати енергетичні процеси, виявляти неефективні режими роботи обладнання, енергетичні втрати, пікові навантаження та нераціональні технологічні процедури. В умовах сучасного розвитку цифрової економіки та трансформації виробничих процесів особливу роль відіграє раціональне використання енергетичних ресурсів. Зростання цін на електроенергію, посилення вимог до енергоефективності підприємств, а також прагнення до сталого розвитку та екологічної відповідальності обумовлюють актуальність впровадження інноваційних технологій для управління енергоспоживанням.

Запровадження IoT-рішень у сфері енергоменеджменту сприяє переходу від реактивного підходу до управління, заснованого на усуненні наслідків перевитрат, до проактивної моделі, яка передбачає попередження втрат і оптимізацію споживання енергії. Таким чином, економічне обґрунтування необхідності інтеграції IoT-систем для моніторингу енергоспоживання є важливим фактором у прийнятті управлінських рішень з цифрової модернізації підприємств. Економічна вигода від впровадження IoT-системи моніторингу енергоспоживання забезпечується завдяки поєднанню кількох взаємозалежних чинників [21]:

- скорочення витрат на електроенергію через оптимізацію режимів роботи обладнання;
- зменшення втрат електроенергії, викликаних неефективними технологічними процесами чи несанкціонованим використанням;
- підвищення точності обліку енергоресурсів;
- зниження витрат на обслуговування та ремонт обладнання шляхом своєчасного виявлення перевантажень і аварійних режимів;

покращення загальної енергоефективності виробничих процесів.

На відміну від традиційних систем обліку, IoT-рішення дозволяє не лише реєструвати показники споживання, але й здійснювати інтелектуальний аналіз даних, що слугує фундаментом для ухвалення обґрунтованих управлінських рішень у галузі енергоменеджменту. Згідно з розрахунками, поданими в таблиці 3.1, очікується, що впровадження IoT-системи моніторингу дозволить знизити обсяги споживання електроенергії приблизно на 10% щороку. Це досягається завдяки оптимізації режимів роботи обладнання, автоматизованому управлінню навантаженнями, виключенню неефективного споживання ресурсів та посиленню дисципліни енергоспоживання. У фінансовому аспекті таке зменшення забезпечує економічний ефект у розмірі близько 600 тисяч гривень на рік. Ця сума розрахована як різниця між витратами на електроенергію до і після інтеграції системи, враховуючи оптимізовані режими використання енергії. Інвестиційні витрати на впровадження IoT-системи включають наступні пункти [22]:

- придбання сенсорів і вимірювальних модулів;
- закупівлю контролерів і мережевого обладнання;
- розроблення програмного забезпечення;
- інтеграцію системи в існуючу інфраструктуру підприємства;
- виконання монтажних і пусконаладжувальних робіт;
- підготовку та навчання персоналу.

Аналіз співвідношення інвестиційних витрат і прогнозованого економічного ефекту показує, що термін окупності інвестицій у впровадження IoT-системи становить менше одного року. Такий результат свідчить про високу інвестиційну привабливість та економічну доцільність реалізації проєкту. Впровадження IoT-систем моніторингу енергоспоживання приносить не лише прямий економічний ефект, а й створює широкий спектр довгострокових переваг для підприємства. Зокрема, це сприяє підвищенню надійності енергозабезпечення завдяки систематичному контролю за роботою

електрообладнання та оперативному вирішенню відхилень від нормативних параметрів. Таким чином, зменшується ризик перевантажень та аварійних ситуацій, що забезпечує безперебійність виробничих процесів і підвищує рівень безпеки експлуатації обладнання.

Застосування інтелектуальних алгоритмів аналізу дозволяє ефективніше планувати використання енергоресурсів, точніше прогнозувати навантаження і забезпечувати їх оптимальний розподіл. Це сприяє підвищенню ефективності управління енергетичними та виробничими ресурсами підприємства, знижує втрати та підвищує загальну продуктивність. Інтеграція передових цифрових рішень у систему енергоменеджменту сприятливо впливає на інвестиційну привабливість підприємства, демонструючи його сучасний підхід, орієнтацію на сталі технології й відповідальність у використанні ресурсів. До того ж, впровадження IoT-рішень сприяє формуванню позитивного іміджу енергоефективної та інноваційної організації, що допомагає зміцнювати ділову репутацію та конкурентну позицію на ринку. У довгостроковому періоді усі ці вигоди дозволяють суттєво скоротити операційні витрати, підвищити ефективність виробництва й конкурентоспроможність продукції, а також укріпити ринкові позиції підприємства.

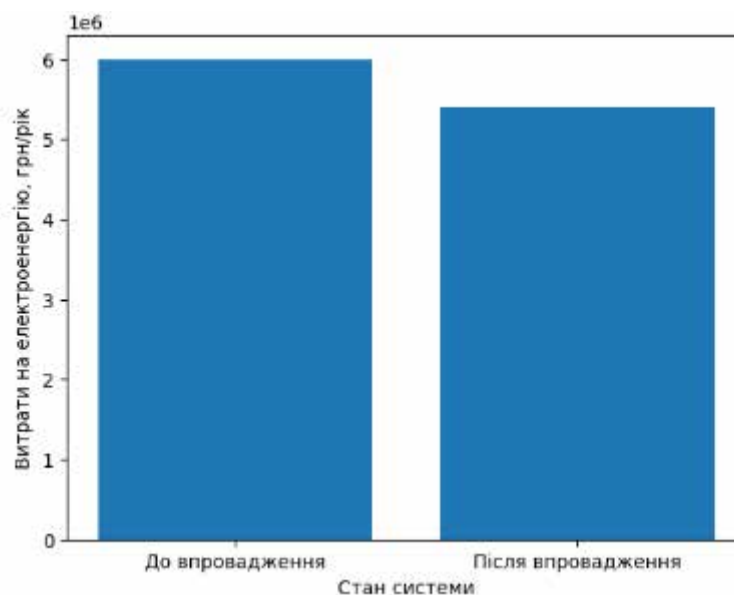


Рис. 3.1. Діаграма економічного ефекту від упровадження IoT-системи моніторингу енергоспоживання

Економічний аналіз довів раціональність упровадження IoT-системи моніторингу енергоспоживання як ефективного інструменту зниження витрат на електроенергію та підвищення загальної енергоефективності підприємства. В умовах зростання цін на енергоресурси, посилення екологічних вимог і акценту на принципи сталого розвитку актуальність раціонального використання енергії набуває особливої ваги. У зв'язку з цим впровадження цифрових технологій в управління енергоресурсами постає як стратегічний напрям модернізації виробничих і управлінських процесів. Як зазначалось вище проведені розрахунки свідчать про можливість зниження споживання електроенергії на 10 %, що забезпечує річний економічний ефект на рівні близько 600 тис. грн. Цей результат досягається завдяки автоматизованому збору та аналізу даних, оптимізації режимів роботи силового обладнання, зменшенню пікових навантажень і своєчасному виявленню неефективних сценаріїв споживання. Застосування IoT-технологій дозволяє оперативно реагувати на відхилення операційних параметрів від нормативних значень, зменшуючи втрати електроенергії та підвищуючи стабільність енергопостачання.

Запропоноване рішення не лише економічно виправдане, а й відповідає основним глобальним тенденціям цифровізації, концепції Індустрії 4.0 і принципам сталого розвитку економіки. Упровадження IoT-системи моніторингу енергоспоживання сприятиме формуванню репутації підприємства як інноваційної, екологічно відповідальної організації, що здатна до адаптації в умовах сучасного ринку. Така стратегія не лише підвищує конкурентоспроможність компанії на поточному етапі, а й створює базу для її довгострокового сталого розвитку. Таким чином, реалізація проєкту є доцільною, обґрунтованою та перспективною з економічної, технологічної та стратегічної точок зору.

3.3 Рекомендації щодо впровадження та експлуатації IoT-системи моніторингу енергоспоживання

Перед запуском проєкту доцільним є проведення попереднього енергетичного аудиту підприємства. Це допоможе визначити ключові точки споживання енергії, виявити області зі значними втратами, встановити пріоритетні об'єкти для моніторингу й сформувавши технічні вимоги до IoT-системи. Виходячи з результатів аудиту, розробляється технічне завдання, яке включає опис функціональних можливостей системи, необхідного обладнання, вимог до програмного забезпечення, параметрів точності вимірювань і методів інтеграції з існуючою інфраструктурою. Впровадження IoT-системи для моніторингу енергоспоживання являє собою складний багатокomпонентний процес, що вимагає системного підходу, ретельного планування й тісної координації між технічними, управлінськими та економічними підрозділами підприємства. Головною метою такого проєкту є створення ефективної платформи для збору, обробки та аналізу даних про споживання електроенергії, спрямованої на оптимізацію витрат, підвищення енергоефективності та покращення управління ресурсами.

Особливу увагу потрібно приділити вибору апаратних компонентів системи IoT. Це стосується сенсорів струму й напруги, лічильників електроенергії, контролерів збору даних і мережевого обладнання. Вибір повинен ґрунтуватися на таких критеріях, як точність вимірювань, надійність, сумісність із іншими компонентами та здатність до масштабування за необхідності розширення системи. Важливо врахувати відповідність обладнання нормативним вимогам і стандартам електробезпеки. Не менш значущим є підбір програмної платформи для обробки та візуалізації даних. Програмне забезпечення має забезпечувати інтуїтивно зрозумілий інтерфейс користувача, можливість створення аналітичних звітів, підтримувати інтеграцію з корпоративними інформаційними системами й передбачати функції прогнозування споживання енергії. Особливо ефективним може стати

використання хмарних технологій, що дозволяють організувати віддалений доступ до даних, забезпечити їх надійне зберігання та зменшити витрати на підтримку серверної інфраструктури.

Процес впровадження IoT-системи моніторингу енергоспоживання бажано здійснювати поетапно, такий підхід дає змогу мінімізувати ризики, пов'язані з технічними збоями та організаційними перепонами, а також забезпечити належний контроль якості виконуваних робіт [25]:

1. На першому, підготовчому етапі проводиться енергетичний аудит, аналіз чинної системи електропостачання, розробка технічного завдання та відбір постачальників обладнання та програмного забезпечення. На цьому ж етапі виконуються економічні розрахунки проєкту, визначаються необхідні обсяги інвестицій і прогнозуються очікувані економічні вигоди .

2. Другий етап включає монтаж і налаштування апаратної частини IoT-системи. Це передбачає встановлення сенсорів і лічильників у ключових точках енергоспоживання, підключення контролерів збору даних, налаштування мережових підключень та забезпечення надійного передачі інформації до центрального серверу або хмарної платформи. Важливо подбати про точність монтажу та дотримання вимог електробезпеки для всіх елементів системи.

3. На третьому етапі відбувається інсталяція програмного забезпечення, інтеграція IoT-рішення з існуючими інформаційними системами підприємства та здійснюється тестування. В процесі перевіряється правильність збору даних, точність вимірювань, стабільність роботи каналів зв'язку і функціональність аналітичних модулів. За результатами тестування проводяться необхідні корегування налаштувань.

4. Четвертий етап націлений на запуск системи у промислову експлуатацію та навчання персоналу. Працівники, відповідальні за енергоменеджмент і технічне обслуговування, повинні засвоїти навички роботи з програмним інтерфейсом, аналізу звітності та оперативного реагування на аварійні ситуації. Це сприятиме ефективному використанню системи та досягненню запланованих цілей щодо підвищення енергоефективності.

Ефективне функціонування IoT-системи моніторингу енергоспоживання вимагає не тільки належного технічного обслуговування обладнання, але і систематичного аналізу зібраних даних для прийняття обґрунтованих управлінських рішень. Основною метою експлуатації є забезпечення безперервної, надійної та високоточності роботи системи протягом усього періоду її використання. Одним із ключових підходів до ефективної експлуатації є організація регулярного моніторингу показників енергоспоживання з їх подальшим співставленням із запланованими значеннями. Такий підхід дозволяє оперативно ідентифікувати відхилення від заданих параметрів, вивчати фактори, що обумовлюють перевитрати, та розробляти корегувальні заходи. Доцільним є впровадження автоматизованої системи сповіщень, яка інформуватиме відповідальних осіб про перевищення допустимих рівнів споживання енергії або про виникнення аварійних ситуацій.

Не менш важливим аспектом експлуатації IoT-системи є забезпечення її кібербезпеки. Оскільки функціонування таких систем передбачає передавання значних обсягів даних через мережу, необхідно запровадити комплексний підхід до захисту інформації. Це включає використання захищених протоколів зв'язку, багаторівневу аутентифікацію користувачів, регулярне оновлення програмного забезпечення, а також організацію резервного копіювання даних. Упровадження цих заходів дозволяє мінімізувати ризик несанкціонованого доступу та забезпечити захист цілісності інформації. Для підтримки стабільного функціонування апаратних компонентів IoT-системи необхідно здійснювати планове технічне обслуговування сенсорів, контролерів та мережевого устаткування. Регулярна перевірка стану контактних з'єднань, калібрування вимірювальних приладів і діагностика працездатності технічних пристроїв сприятимуть збільшенню надійності функціонування системи, зниженню ймовірності виникнення збоїв та підвищенню точності отримуваної інформації [33].

Для досягнення максимальної ефективності впровадження та використання IoT-системи важливо створити на підприємстві спеціалізовану

робочу групу або призначити відповідальних фахівців, які будуть координувати процеси енергоменеджменту. Їх ключовими завданнями мають стати аналіз отриманих даних, підготовка звітів, розробка заходів з енергозбереження та контроль їх реалізації. Також необхідно інтегрувати результати моніторингу енергоспоживання в загальну систему стратегічного планування підприємства. Це дозволить враховувати енергетичні показники при розробці інвестиційних проєктів, оновленні обладнання та оптимізації виробничих процесів. З огляду на стрімкий розвиток цифрових технологій, доцільно поступово розширювати функціональні можливості системи Інтернету речей. Серед перспективних напрямів розвитку можна виокремити впровадження алгоритмів машинного навчання для прогнозування енергоспоживання, автоматизоване керування навантаженнями, інтеграцію з платформами «розумного підприємства» та застосування цифрових двійників для моделювання енергетичних процесів [31].

Запровадження цих рішень сприятиме не лише підвищенню точності прогнозування та ефективності управління енергоресурсами, але й формуванню інтелектуальної платформи, яка підтримає стратегічні та оперативні управлінські рішення. У довгостроковій перспективі це допоможе забезпечити сталий рівень зниження витрат, підвищення конкурентоспроможності підприємства та його успішну адаптацію до вимог цифрової економіки. Запропоновані рекомендації щодо впровадження та експлуатації IoT-системи моніторингу енергоспоживання створюють цілісний підхід для ефективної реалізації проєкту. Це дозволить досягти необхідних економічних результатів і забезпечити сталий розвиток підприємства.

Висновки до розділу 3

У розділі розглянуто питання ефективності застосування IoT-системи моніторингу енергоспоживання. Зокрема, було встановлено, що використання технологій Інтернету речей сприяє підвищенню точності обліку витрат електроенергії, забезпечує оперативність у зборі та обробці даних, а також

дозволяє ідентифікувати нераціональні режими використання енергії. Запропоновані технічні удосконалення спрямовані на оптимізацію енергетичних процесів, зменшення втрат електроенергії та підвищення рівня стабільності енергозабезпечення підприємства. Присвячено економічним аспектам доцільності впровадження IoT-системи. Згідно з отриманими результатами, очікуване зниження споживання електроенергії на 10 % здатне забезпечити річний економічний ефект у розмірі 600 тисяч гривень. Додатково розраховано строк окупності інвестицій, який не перевищує одного року, що свідчить про високу інвестиційну привабливість розглянутого проєкту та його ефективність з економічної точки зору.

Розділ містить практичні рекомендації щодо впровадження та подальшої експлуатації IoT-системи моніторингу енергоспоживання. У ньому детально розкрито етапи реалізації проєкту, запропоновано організаційні та технічні заходи, а також охоплено питання кібербезпеки й можливості подальшого розвитку системи. Комплексність запропонованих заходів сприяє забезпеченню ефективного функціонування IoT-системи, досягненню запланованих показників енергоефективності та стабільному розвитку підприємства. Проєкт позиціонується як ефективний інструмент для скорочення енергетичних витрат, підвищення якості управління ресурсами та сприяння цифровій трансформації підприємства. Реалізація таких рішень дозволить покращити конкурентоспроможність компанії, зміцнити її інвестиційну привабливість і сприятиме формуванню позитивного іміджу сучасної, інноваційної та енергоефективної організації.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Аналіз умов праці на підприємстві і визначення категорій виробництв, приміщень та класів виробничих зон

Охорона праці становить органічну складову системи управління підприємством і має на меті забезпечення збереження життя, здоров'я та працездатності працівників у процесі їхньої трудової діяльності. Аналіз умов праці підприємства слугує базисом для оцінки рівня безпеки виробничого середовища, ідентифікації потенційно небезпечних та шкідливих чинників, а також формування комплексу заходів для їхньої мінімізації. Умови праці в будь-якій організації визначаються комплексом чинників виробничого середовища та трудового процесу, що впливають на здоров'я і працездатність працівників. До основних таких чинників належать мікроклімат робочих приміщень, рівень шуму, якість освітлення, запиленість повітряного середовища, рівень електромагнітного випромінювання, ергономіка робочих місць, а також психофізіологічні навантаження на персонал.

На ТОВ «Оптима Фарм» більшість персоналу здійснює свої функції у складських, адміністративно-офісних і технічних приміщеннях. Робочий процес здебільшого характеризується середнім рівнем фізичного навантаження зі значною участю розумової діяльності. Це визначає підвищені вимоги до створення ергономічних робочих місць, систем освітлення, мікроклімату, а також до раціональної організації режиму роботи та відпочинку. Мікроклімат у виробничих та складських приміщеннях забезпечується завдяки впровадженню сучасних систем вентиляції та кондиціонування повітря, які підтримують нормативні параметри температури, вологості та повітряного потоку відповідно до державних санітарно-гігієнічних вимог. Система освітлення включає поєднання природного і штучного світла, що сприяє створенню комфортних умов для виконання робіт різної складності [36].

Рівень шуму формується переважно через функціонування вентиляційного обладнання, складської техніки та електротехнічних пристроїв. Значення рівнів шуму перебувають у межах гранично допустимих норм, визначених чинними законодавчими актами. Проте контроль цих параметрів повинен здійснюватися регулярно задля забезпечення постійного дотримання стандартів. Запиленість повітря в більшості приміщень підприємства незначна, хоча у складських зонах може тимчасово збільшуватись під час виконання вантажно-розвантажувальних операцій. Це вимагає впровадження ефективних заходів щодо підтримання чистоти повітря у робочих зонах.

У процесі виробничої діяльності на підприємстві можуть проявлятися такі основні шкідливі та небезпечні фактори [19]:

- електричний струм при експлуатації електрообладнання та IoT-пристроїв;
- рухомі частини механізмів складської техніки;
- підвищений рівень шуму;
- напруження зору при роботі з комп'ютерною технікою;
- психоемоційні навантаження, пов'язані з відповідальністю та інтенсивністю трудового процесу.

Особливу увагу необхідно приділити питанням електробезпеки, оскільки функціонування IoT-системи передбачає використання значної кількості електронних пристроїв, датчиків, контролерів та мережевого обладнання. Недотримання правил експлуатації може призвести до ураження електричним струмом, коротких замикань або пожежонебезпечних ситуацій. Для зменшення ризиків передбачено використання захисного заземлення, автоматичних вимикачів, пристроїв захисного відключення, а також регулярний технічний огляд електрообладнання. Працівники проходять обов'язкові інструктажі з охорони праці та електробезпеки, що сприяє формуванню навичок безпечної поведінки на робочому місці.

Згідно з вимогами чинних нормативних документів, виробничі та складські приміщення підприємства класифікуються за вибухо- та

пожежонебезпечністю з урахуванням характеру технологічних процесів і властивостей використовуваних матеріалів. Складські приміщення, у яких зберігається фармацевтична продукція та пакувальні матеріали, належать до категорії В за пожежною безпекою, оскільки містять горючі тверді матеріали в упаковці. Адміністративно-офісні приміщення відносяться до категорії Д, оскільки в них відсутні горючі та вибухонебезпечні речовини у значних кількостях. Технічні приміщення, у яких розміщене електротехнічне та серверне обладнання, також класифікуються як приміщення категорії В через наявність електропроводки, кабельних трас і електронних компонентів, що можуть бути джерелом займання. Для цих приміщень передбачені системи пожежної сигналізації, автоматичного відключення електроживлення та первинні засоби пожежогасіння.

Виробничі зони підприємства класифікуються залежно від рівня впливу небезпечних і шкідливих факторів на персонал. Робочі місця адміністративного персоналу, операторів IoT-систем та інженерно-технічних працівників належать до зон із допустимими умовами праці, що відповідають 2 класу згідно з гігієнічною класифікацією. Складські зони та технічні приміщення можуть відноситися до 3 класу умов праці (шкідливі умови праці 1 ступеня) через можливу наявність підвищеного шуму, запиленості та фізичних навантажень. Однак за умов дотримання санітарно-гігієнічних норм і впровадження комплексу заходів з охорони праці вплив зазначених факторів зводиться до мінімального рівня. Проведений аналіз умов праці на ТОВ «Оптима Фарм» свідчить про відповідність виробничого середовища чинним нормативним вимогам. Визначені категорії виробництв, приміщень і класи виробничих зон дозволяють обґрунтувати необхідність застосування відповідних організаційних, технічних та санітарно-гігієнічних заходів, спрямованих на забезпечення безпечних та комфортних умов праці персоналу.

4.2 Розрахунок індивідуальних засобів захисту

Забезпечення працівників індивідуальними засобами захисту є одним із ключових напрямів у системі охорони праці підприємства. Використання таких засобів значно знижує вплив небезпечних і шкідливих факторів виробництва, які можуть виникати в процесі трудової діяльності, підвищує рівень безпеки на робочих місцях та сприяє дотриманню вимог діючого законодавства у сфері охорони праці. Грамотний вибір засобів захисту та їх належне планування дають змогу ефективно знизити виробничі ризики, а також створити комфортні умови роботи для всіх категорій персоналу. Індивідуальні засоби захисту виступають як основний бар'єр між працівниками та потенційно шкідливими факторами виробничого середовища. Вони забезпечують захист від впливу електричного струму, механічних травм, впливу посиленого шуму, пилу та несприятливих кліматичних умов. Сучасні ІЗЗ також спрямовані на убезпечення праці з комп'ютерними технологіями та пристроями IoT-систем, які активно використовуються для моніторингу енергоспоживання в підприємстві. Потреба в індивідуальних засобах захисту визначається через ретельний аналіз умов праці та специфіки виконуваних обов'язків. При цьому враховується час перебування працівників у виробничих зонах, рівень впливу потенційно шкідливих чинників, а також вимоги чинних нормативно-правових актів стосовно охорони праці.

Працівників підприємства можна розподілити на кілька основних груп, кожна з яких потребує свого специфічного набору засобів захисту. До таких груп належать [22]:

- інженерно-технічний персонал для обслуговування електротехнічного та IoT-обладнання;
- оператори систем моніторингу для контролю та обробки даних;
- складські працівники для виконання робіт з вантажними операціями;
- адміністративний персонал, зайнятий на тривалій роботі з комп'ютером.

Для кожної із цих категорій працівників передбачено надання відповідного набору індивідуальних засобів захисту залежно від виконуваних завдань. Серед таких засобів захисний спецодяг (халати, куртки, комбінезони), взуття з неслизькою підошвою, діелектричні рукавички, захисні окуляри, каски або шоломи, засоби захисту від шуму (наприклад, навушники чи беруші), респіратори, а також дерматологічні засоби та захисні креми для шкіри. Кількість необхідних засобів захисту прораховується з урахуванням числа працівників й термінів експлуатації кожного окремого виробу. Для всіх працівників передбачається повний комплект ІЗЗ із регулярною заміною при його зношенні чи досягненні кінця строку служби. Цей підхід гарантує стабільну готовність персоналу до безпечної роботи та мінімізацію ризиків отримання виробничих травм чи професійних захворювань. Тому організація процесу забезпечення індивідуальними засобами захисту є невіддільною частиною системи охорони праці на підприємстві. Це сприяє створенню безпечних та комфортних умов для роботи кожного працівника, незалежно від його професійної позиції.

1.Захисний одяг - норма забезпечення 1 комплект на рік.

$$N_{од} = n \cdot k = 20 \cdot 1 = 20 \text{ комплектів/рік.}$$

2.Захисне взуття

Норма забезпечення 1 пара на 1,5–2 роки.

Для розрахунку на рік приймаємо коефіцієнт 0,5.

$$N_{вз} = 20 \cdot 0,5 = 10 \text{ пар/рік.}$$

3.Діелектричні рукавиці

Норма забезпечення 1 пара на 6 місяців для технічного персоналу.

$$N_p = 6 \cdot 2 = 12 \text{ пар/рік.}$$

4.Захисні окуляри

Норма забезпечення 1 пара на рік.

$$N_{ок} = 20 \cdot 1 = 20 \text{ пар/рік.}$$

5.Захисні каски

Норма забезпечення 1 шт. на 3 роки.

Річна потреба:

$$N_k = 20 \cdot 0,33 = 7 \text{ шт/рік.}$$

6.Протишумові навушники - норма забезпечення 1 комплект на 2 роки

$$N_H = 20 \cdot 0,5 = 10 \text{ комплектів/рік.}$$

7.Респіратори - норма забезпечення 2 шт. на одного працівника на рік.

$$N_{\text{респ}} = 20 \cdot 2 = 40 \text{ шт/рік.}$$

Таблиця 4.1

Зведена таблиця розрахунку індивідуальних засобів захисту

Назва ІЗЗ	Норма забезпечення	Кількість працівників	Річна потреба
Захисний одяг	1 компл./рік	20	20
Захисне взуття	1 пара / 2 роки	20	10
Діелектричні рукавиці	2 пари / рік	6	12
Захисні окуляри	1 пара / рік	20	20
Захисні каски	1 шт. / 3 роки	20	7
Протишумові навушники	1 компл. / 2 роки	20	10
Респіратори	2 шт. / рік	20	40

Проведений розрахунок індивідуальних засобів захисту свідчить, що для забезпечення безпечних умов праці персоналу підприємства необхідно щорічно забезпечувати працівників повним комплектом засобів індивідуального захисту відповідно до встановлених норм. Раціональний підбір та своєчасне оновлення ІЗЗ дозволяють суттєво знизити ризик виробничого травматизму, підвищити рівень безпеки праці та забезпечити відповідність умов праці чинним нормативним вимогам.

4.3 Блискавкозахист підприємства

Захист підприємства від атмосферних електричних розрядів, таких як блискавки, є важливим компонентом забезпечення безпеки виробничих і технічних процесів, а також охорони життя і здоров'я співробітників. Ці природні явища можуть завдати значних ушкоджень будівлям, електротехнічному обладнанню та інформаційним системам, а в окремих випадках призвести до пожеж і травмування персоналу. З цієї причини створення ефективної системи блискавкозахисту стає необхідною частиною комплексного підходу до охорони праці та промислової безпеки.

Оцінка ризиків ураження блискавкою передбачає врахування низки чинників, які впливають на ймовірність виникнення і масштаби наслідків атмосферних розрядів. Серед них: географічне розташування підприємства, висота і конфігурація будівель, наявність металевих конструкцій та електромереж, а також кліматичні особливості регіону. На підприємстві ТОВ «Оптимі Фарм» виробничі та складські приміщення знаходяться в місцевості з помірною частотою грозових явищ. Водночас висока архітектурна забудова та наявність металевих покрівель і конструкцій збільшують ризик ураження блискавкою, що робить необхідним впровадження комплексної системи захисту, здатної гарантувати безпеку як матеріальних об'єктів підприємства, так і його персоналу. Запровадження такого захисту дозволяє не лише зменшити можливі фінансові втрати через дії атмосферних явищ, але й підтримувати стабільність виробничих процесів, створювати безпечні умови праці та знижувати небезпеку виникнення аварійних ситуацій.

Система блискавкозахисту на промисловому підприємстві являє собою інтегровану конструкцію, яка включає три основні компоненти, кожний з яких виконує специфічну функцію для забезпечення ефективного відведення електричних розрядів у ґрунт, а також захисту будівель, обладнання та персоналу від потенційних наслідків блискавкових ударів [28].

Таблиця 4.2

Основні елементи блискавкозахисту підприємства

Елемент системи	Призначення	Основні характеристики	Місце встановлення
Приймач (блискавковідвід)	Прийом атмосферного розряду та його перенаправлення	Металеві стрижні або троси, стійкі до корозії	Дахи виробничих, складських і адміністративних приміщень
Система відводу струму	Безпечний відвід струму блискавки до заземлення	Мідні або сталеві провідники, прокладені вздовж стін та конструкцій	Уздовж несучих конструкцій і стін будівель
Заземлювальна система	Розсіювання струму в ґрунт, зниження ризику ураження	Заземлювачі з корозійностійких металів, встановлені з дотриманням нормативних глибин і відстаней	У ґрунті біля будівель підприємства

Першим елементом системи виступає приймач, або блискавковідвід, призначений для перехоплення атмосферних електричних розрядів і подальшого спрямування їх до заземлювальної системи. На прикладі підприємства ТОВ «Оптіма Фарм» можна зазначити, що даний компонент реалізований у вигляді металевих стрижневих і тросових блискавковідводів, розміщених на дахах виробничих, складських і адміністративних будівель. Другим ключовим елементом системи є система відводу струму, яка складається з металевих провідників, що з'єднують приймач із заземлювальною системою. Даний компонент гарантує безпечне і контрольоване спрямування струму блискавки у ґрунт, мінімізуючи ризик пошкодження елементів інфраструктури та забезпечуючи безпеку персоналу. Завершальний етап системи представлений заземлювальною системою, яка складається з заземлювачів, призначених для розсіювання електричного струму в ґрунті. Це сприяє зменшенню ризику ураження електричним розрядом і запобігає пошкодженню споруд та обладнання.

4.4. Пожежна безпека

Пожежна безпека є одним із найважливіших аспектів забезпечення охорони праці та промислової безпеки на підприємствах. Вона передбачає реалізацію комплексу заходів, спрямованих на запобігання виникненню пожеж, обмеження їх поширення, а також мінімізацію можливих наслідків, які можуть вплинути на життя і здоров'я працівників, стан матеріальних активів підприємства та екологічне середовище. Для ТОВ «Оптима Фарм», що здійснює виробничу діяльність і володіє складськими приміщеннями з численним електрообладнанням і матеріальною базою, дотримання вимог пожежної безпеки набуває особливого значення. Система пожежної безпеки на підприємстві створюється на основі всебічної оцінки можливих джерел займання, класифікації приміщень за рівнем пожежної небезпеки, а також розробки й впровадження сучасних систем протипожежного захисту. До найбільш імовірних джерел виникнення пожеж належать електричні мережі та обладнання, системи опалення і вентиляції, нагрівальні прилади, присутність горючих речовин чи легкозаймистих матеріалів, хімічні реагенти, а також людський фактор, який часто проявляється у вигляді порушень правил безпеки під час виконання професійних обов'язків [30].

Ефективна система пожежної безпеки базується на поєднанні організаційних, технічних та інженерно-технічних заходів. Організаційна складова охоплює навчання персоналу діям у разі пожежі, проведення регулярних інструктажів, тренувань, розробку планів евакуації та визначення відповідальних за безпеку співробітників. Також здійснюється систематичний контроль за дотриманням правил пожежної безпеки у виробничих і адміністративних приміщеннях. Технічні заходи включають забезпечення належного стану первинних засобів пожежогасіння, зокрема вогнегасників різних типів, пожежних кранів, систем спринклерного пожежогасіння й іншого обладнання. На підприємстві ТОВ «Оптима Фарм» вогнегасники розміщені у

виробничих, складських та адміністративних приміщеннях, враховуючи різні типи можливих займань: від електроустаткування до легкозаймистих рідин. Значна увага приділяється своєчасному огляду та обслуговуванню цих засобів з метою забезпечення їхньої готовності до застосування [36].

Інженерно-технічні заходи передбачають проектування та встановлення систем раннього виявлення пожежі й автоматичного оповіщення. Системи включають датчики диму, температури та газу, які інтегровані з сигналізацією для моментального сповіщення про небезпеку й активації гасіння. На підприємстві додатково передбачено аварійне освітлення для забезпечення безпечної евакуації навіть за умов відсутності електропостачання. Важливим аспектом підтримання безпеки є зонування приміщень відповідно до категорій пожежної небезпеки. Це допомагає виділити зони з найвищим ризиком та визначити пріоритетні заходи для їхнього захисту. У цехах із потужним електрообладнанням чи використанням легкозаймистих матеріалів встановлюються додаткові засоби пожежогасіння, включаючи системи локального гасіння і протипожежні бар'єри. Складські приміщення обладнані з урахуванням властивостей матеріалів, що там зберігаються, аби запобігти швидкому поширенню вогню у разі займання.

Ще одним суттєвим елементом є обов'язковий контроль за технічним станом електрообладнання та мереж. Значну кількість пожеж на підприємствах викликають короткі замикання чи перевантаження енергосистем. Регулярний огляд проводки, заміна пошкоджених кабелів, а також використання автоматичних вимикачів і пристроїв захисту від перенапруги дають змогу мінімізувати ці ризики та уникати аварій. Не менш пріоритетною є культура безпеки серед персоналу. Працівники повинні володіти знаннями щодо правил пожежної безпеки, вміти користуватися засобами гасіння, знати маршрути й порядок евакуації та бути готовими до адекватних дій у надзвичайних ситуаціях. Постійні навчання та тренінги підвищують готовність до дій під час небезпеки й допомагають запобігти паніці у кризових обставинах.

Висновки до розділу 4

Проведений аналіз умов праці на підприємстві ТОВ «Оптима Фарм» дозволив ідентифікувати основні виробничі категорії, приміщення та класи виробничих зон, що характеризують рівень впливу шкідливих і небезпечних чинників на співробітників. Встановлено, що умови праці на підприємстві відповідають нормативним вимогам, однак необхідно регулярно здійснювати контроль за дотриманням правил безпеки та забезпечувати підвищення рівня захисту працівників. Розрахунки щодо забезпечення індивідуальними засобами захисту вказали на потребу у комплексному підході, який охоплює захисний одяг, взуття, рукавички, окуляри, каски, протишумові навушники та респіратори. Такий набір засобів формує надійну перепону перед небезпечними факторами, зменшуючи ризики виробничих травм і професійних захворювань. Регулярне оновлення та перевірка технічного стану ІЗЗ є ключовим елементом підтримання високого рівня безпеки праці.

Установка системи блискавкозахисту спрямована на всебічний захист виробничих і складських приміщень, електричного обладнання та інформаційних систем від дії атмосферних електричних розрядів. Завдяки інтеграції таких елементів, як приймачі блискавки, системи відводу струму та заземлювальні пристрої, значно знижується ймовірність аварійних ситуацій, пошкодження обладнання і потенційних загроз для життя та здоров'я працівників. Організація пожежної безпеки реалізується через впровадження систем раннього виявлення пожеж, автоматичного оповіщення, забезпечення первинними засобами пожежогасіння, зонування приміщень за категоріями пожежної небезпеки та проведення регулярного навчання персоналу. Цей комплекс заходів спрямований на попередження виникнення пожеж, мінімізацію можливих збитків і забезпечення ефективної евакуації у разі надзвичайної події.

ВИСНОВКИ

У процесі виконання роботи вдалося досягти основної мети: проведено всебічне вивчення теоретичних засад технології Інтернету речей (IoT) та розроблено структуру і алгоритми її впровадження для моніторингу енергоспоживання на підприємстві. Дослідження базувалося на аналізі сучасних наукових підходів, результатах практичного тестування існуючих IoT-рішень, а також на нормативно-правових та методичних документах у сфері енергоменеджменту і промислових систем. У ході роботи було вирішено низку важливих завдань, що дозволило сформулювати цілісне уявлення про функціонування IoT-систем та їхній вплив на підвищення ефективності управління енергоспоживанням. Проведений детальний аналіз сучасного стану та тенденцій розвитку IoT-технологій у напрямку енергомоніторингу допоміг виділити ключові напрямки інновацій і можливості їх впровадження на підприємствах різних масштабів. Детально розглянуто структурні моделі IoT-систем, які забезпечують збір, передачу та обробку даних про використання енергії, з урахуванням специфіки їх інтеграції у виробничі процеси та інформаційні системи підприємства.

Систематизація основних алгоритмів функціонування IoT-систем дала можливість виокремити ключові принципи їхньої роботи, серед яких автоматизований збір та аналіз даних, прогнозування енергоспоживання, виявлення зон підвищених навантажень та оптимізація використання енергетичних ресурсів. Результати аналізу тестувань існуючих IoT-рішень підтвердили їхню високу ефективність у реальних умовах виробництва. Це зокрема стосується зниження витрат на електроенергію, підвищення стабільності енергопостачання та зменшення ризиків аварійних ситуацій. У ході дослідження оцінено переваги та недоліки впровадження IoT-технологій у системи енергомоніторингу. Основними перевагами визначено можливість точнішого контролю енергоспоживання, оптимізацію управління ресурсами, зниження операційних витрат та підтримку стратегічних рішень у напрямку

підвищення енергоефективності. Серед недоліків виділено потребу у значних початкових інвестиціях, необхідність регулярного технічного обслуговування пристроїв, а також можливі ризики кібербезпеки, які потребують додаткового управління.

Дослідження підтвердило перспективність використання IoT-технологій у системах моніторингу енергоспоживання підприємств. Запропонована структура системи та алгоритми її функціонування забезпечують інтегрований підхід до збору, обробки й аналізу даних, що сприяє підвищенню ефективності енергоменеджменту, прозорості робочих процесів, кращому контролю й економічній доцільності. Здобуті результати мають практичне значення їх можна впроваджувати у реальні підприємства для підвищення енергоефективності, зменшення витрат та розвитку сучасної моделі цифрового управління енергоресурсами. Крім цього, дослідження формує наукове підґрунтя для майбутніх розробок і вдосконалення IoT-рішень у сфері енергоменеджменту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Алексіна Л. Т., Шевченко О. О. Дослідження технологій Інтернету речей. Зв'язок. 2019.
2. Павленко В. М., Воляник О. Ю., Пономаренко І. В., Данильченко Д. О. Дослідження перспектив розвитку технології «розумних енергосистем» із застосуванням розподілених баз даних // Енергетика і автоматика. – 2024. – № 5 (75). – С. 66–76.
3. Антипов І., Кривоносов В., Петренко А., Іванченко А. Оцінка достовірності технічного обліку електроенергії підприємства // Енергетика і автоматика. – 2025. – № 5. – С. 40–52.
4. Антонова Г.В., Кедич А.В., Ковирьова О.В. Інтернет речей та бездротові смарт-мережі в точному землеробстві. *Комп'ютерні засоби, мережі та системи*. 2019. № 18. С. 119-127. URL: <https://zounb.zp.ua/resource/pokazhchyky/sr/internet-rechej>
5. Баранов О.А. Інтернет речей і охорона здоров'я. Інтернет речей: теоретико-методологічні основи правового регулювання : монографія. 2-ге вид. Харків, 2018. Т. 1: Сфери застосування, ризики і бар'єри, проблеми правового регулювання. С. 24-36. URL: <https://surl.lt/naslev>
6. Войтко С. В. Проблематика енергоефективності систем на основі штучного інтелекту Інтернету речей (AIoT). *Економічний вісник НТУУ «КПІ»*. 2024.
7. Гненний А.П., Гордієнко Ю.Г. Інтернет речей як головний чинник впровадження ІТ-технологій на сучасному підприємстві. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технол. процесах*. 2018. № 1. С. 94–98.
8. Гужва В.М. Інтернет речей: сучасний стан і перспективи розвитку. ДВНЗ «Київський національний університет імені Вадима Гетьмана», 2016. URL: <https://ir.kneu.edu.ua/items/4b4743d1-5c7a-4fa3-8d87-5a161337f03d>

9. Дідич З. «Інтернет речей»: можливості та перспективи його використання у сільському господарстві України. *Аграрна економіка*. 2018. Т. 11, № 1/2. С.88–93. URL: http://agrarianeconomy.lnau.edu.ua/images/docs/ae_2018_11_1-2/13.pdf
10. Журавель В.І., Ткачук Т.Ю., Борковський Д.С. Інтернет речей у системі медичної допомоги: можливості та безпека. *Актуальні проблеми клініч. та профілакт. медицини*. 2019. Т. 3, № 1/2. С. 5–12.
11. Журавльов О.В., Сімасов О.А. Інтернетизація та глобальна інституціоналізація економічних систем. *Статистика України*. 2017. № 4. С. 39. URL: <https://surl.lu/zecvml>
12. Журавська І.М. IoT-мережа на базі Bluetooth-модулів для автоматизованого керування споживанням енергоресурсів. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, вир-во*. 2018. № 30/31. С. 37–44. URL: <https://scholar.google.com/citations?user=ThrEJlgAAAAJ&hl=uk>
13. Зеленський Д. В., Павленко В. М. Автоматизована система контролю якості електропостачання на базі Arduino з виявленням аномалій та віддаленим моніторингом // Матеріали конференції. – Київ: КНУТД, 2025. – С. 91.
14. Іванченко А. М., Павленко В. М. Оптимізація розподілу енергії в мікромережах з інтеграцією відновлюваних джерел енергії // Матеріали конференції. – Київ: КНУТД, 2025. – С. 29.
15. Коцюбівська К., Прісич В., Яворський О. Впровадження технологій інтернету речей під час створення системи «Розумний дім». Цифрова платформа. Інформаційні технології в соціокультурній сфері, 2019. Т. 2, № 2. С. 136–143. URL: <https://doi.org/10.31866/2617-796x.2.2.2019.187725>
16. Капелюшна Т.В. Динаміка розвитку інтернет речей та їх вплив на управління підприємствами. Державний університет телекомунікацій, м. Київ, 2018. URL: <https://journals.dut.edu.ua/index.php/emb/article/view/1943>

17. Кураченко В. Д., Павленко В. М. Комплексний підхід до енергозбереження у внутрішньогосподарських електромережах через оптимізацію параметрів та компенсацію реактивної потужності // Матеріали конференції. – Київ: КНУТД, 2025. – С. 39.

18. Кушнір Д.В. Підвищення надійності та ефективності управління енергоспоживанням підприємства на основі технологій IoT / Кушнір Д.В., наук. кер. Павленко В.М. // Тези доповідей 78-ї науково-практичної конференції студентів «Енергозабезпечення, електротехнології, електротехніка та інтелектуальні управляючі системи в АПК», 24 квітня 2025 р. – Київ: НУБіП України, 2025. – С. 114

19. Лось І. В., Павленко В. М. Підвищення надійності розподільчих мереж на основі мультисенсорного злиття даних у Smart Grid // Матеріали конференції. – Київ: КНУТД, 2025. – С. 167.

20. Одокієнко А. О., Павленко В. М. Інтелектуальна система BMS для гібридних енергосистем з предиктивним керуванням на основі ML-прогнозів // Матеріали конференції. – Київ: КНУТД, 2025. – С. 46.

21. Петренко А., Кругляк Г., Ликтей В., Іванченко А. Лабораторний зразок для дослідження режимних параметрів установок з акумуляторними батареями, інвертором напруги та фотоелектричними перетворювачами // Енергетика і автоматика. – 2025. – № 6. – С. 5–14.

22. Плешков П. Г., Зінзура В. В., Петрова К. Г., Солдатенко В. П., Павленко В. М. Синтез адаптивної системи керування зовнішнім освітленням муніципальних систем на основі багатокритеріальної оптимізації // Енергетика і автоматика. – 2026. – № 1. – С. 91–100.

23. Рябошлик В. Огляд сучасних технологічних проривів і нових перспектив (від інтернету людей до інтернету речей) Економіст. 2017. № 6. С. 17-22. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/econ_2017_6_6/

24. Шавелькін О., Марченко Р., Становський Ю., Підгайний М., Кругляк Г. Моделювання енергетичних процесів в гібридній фотоелектричній

системі з акумулятором для потреб локального об'єкта // *Technologies and Engineering*. – 2021. – № 3. – С. 28–38.

25. Смолин О.І., Олексюк В.П. Інтернет речей як технологічний феномен ХХІ століття. Сучасні інформаційні технології та інноваційні методики навчання: досвід, тенденції, перспективи : матеріали IV міжнар. наук.-практ. інтернет-конф. (м. Тернопіль, 30 квітня 2020 року). Тернопіль, 2020. С. 147

26. Сапожник Д. О., Плечистий Д. Д. Використання Інтернету речей для економії енергетичних ресурсів. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2023. № 4. С. 39-45.

27. Самойленко М.Ю. Київський національний університет імені Тараса Шевченка Принципи застосування технології інтернет речей у сучасному світі. https://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2020/6_2020/part_1/26.pdf

28. Сапожник Д. О., Плечистий Д. Д. Використання Інтернету речей для економії енергетичних ресурсів. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2023. № 4. С. 39-45.

<https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/2906>

29. Сverdлюк Б. І., Каграманова Ю. К., Сеньков О. В. Енергоефективні технології в Інтернеті речей (IoT) .Зв'язок. - 2022. <https://doi.org/10.31673/2412-9070.2022.053033>

30. Смолій О. В., Микитишин А. Г., Корольок Р. І. Застосування технологій IoT для управління енергоспоживанням у харчовій промисловості // Матеріали МНТК «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій». Тернопіль, 2025

31. Чекотун Я. О., Павленко В. М. Проектування багаторівневої системи електропостачання побутових об'єктів з інтеграцією ВДЕ та накопичувачів енергії // Матеріали конференції. – Київ: КНУТД, 2025. – С. 71.

32. Яцків Н. Г. Перспективи використання технології блокчейн у мережі інтернет речей. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2016. Вип. 26.8. С. 381-387.

33. Erzhanuly A. Enhancing Enterprise Energy Management with IoT-Based Monitoring Systems // Eurasian Science Review. 2024 <https://doi.org/10.63034/esr-16>
34. Kaplun V., Kruhliak H., Makarevych S., Kulibaba Y. Dynamic energy management system with real-time component control to increase efficiency of local microgrid // Przegląd Elektrotechniczny. – 2023.
35. Pan J., Jain R., Paul S. et al. An Internet of Things Framework for Smart Energy in Buildings: Designs, Prototype, and Experiments. arXiv, 2016. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2016arXiv160308025P/abstract>
36. Perera C., Liu H., Jayawardena S. The Emerging Internet of Things Marketplace From an Industrial Perspective: A Survey. arXiv, 2015. <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2101679>
37. O'Dwyer E., Pan I., Charlesworth R. et al. Integration of an Energy Management Tool and Digital Twin for Coordination. arXiv, 2020.
38. «Energy management based on Internet of Things: practices and framework for adoption in production management» // Journal of Cleaner Production. – Vol. 100, 2015. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652615002760>
39. Manzoor N. A., Johnson P. N., Mark A. P. Energy Management for IoT-Based Smart Buildings Using Deep Learning / Int. J. Intell. Syst. Appl. Eng., 2023. <https://khazna.ku.ac.ae/en/publications/energy-management-for-internet-of-things-based-smart-buildings-us/>
40. Nikitin Y., Pavlenko V. Comparison of the performance of the different types of Stirling engines in power generation systems // Матеріали конференції. – Київ: КНУТД, 2025. – С. 13–14.
41. Latif L. A., Hambali R., Hidayat R. Monitoring and Controlling Electric Energy Usage Based on IoT / J. Ind. Automat. Elect. Eng. - 2023.
42. Zhou Z., Chang Z., Liao H. Green Internet of Things (IoT): Energy Efficiency Perspective. Springer, 2021.

43. Padmanaban S., Dhanaraj R., Sathyamoorthy M. et al. Smart Grids and Internet of Things. Wiley, 2023.
44. Pavlenko V., Ponomarenko I., Morhulets O., Ponomarenko D., Danylchenko D. Synergy of Blockchain and Artificial Intelligence for Decentralized Smart Energy Management // Smart Innovations in Energy and Mechanical Systems. – Cham: Springer, 2025. – P. 211–223.
45. Skidan V. V., Nikonov O. Ya., Volivach A. P., Pavlenko V. M. Дослідження хмарних мікросервісів на базі технології ASP.NET Core // Технології та інжиніринг. – 2023. – № 5(16). – С. 50–59.
46. Pavlenko V., Volianyk O. Research of technical solutions for cybersecurity of power systems with integrated renewable energy sources // Технічна творчість: збірник наукових праць. – 2024. – № 8. – С. 93–94.
47. Atzori L., Iera A., Morabito G. The Internet of Things: A Survey // Computer Networks. - 2010. <https://ru.scribd.com/document/354326648/The-Internet-of-Things-a-Survey-iINTERNET-DAS-COISAS>
48. Miorandi D., Sicari S. Internet of Things: Vision, Applications and Research Challenges. Ad Hoc Networks. – 2012. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1570870512000674>
49. Nikitin Y., Pavlenko V., Volianyk O. The role of smart technologies in improving the reliability and efficiency of power grids // Технічна творчість: збірник наукових праць. – 2024. – № 8. – С. 91–92.
50. Borgia E. The Internet of Things Vision: Key Features, Applications and Open Issues // Computer Communications. – 2014.
51. Perera C., Zaslavsky A., Christen P., Georgakopoulos D. Context Aware Computing for the Internet of Things: A Survey . IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2014. <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2864815>
52. Shvedchykova I., Trykhlieb A., Trykhlieb S., Demishonkova S., Pavlenko V. Determining the efficiency of restored photovoltaic modules under

natural lighting conditions // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2024. – Vol. 132, № 8. – P. 16–24.

53. Shavolkin O., Shvedchykova I., Demishonkova S., Pavlenko V. Increasing the efficiency of hybrid photoelectric system equipped with a storage battery // Przegląd Elektrotechniczny. – 2021. – Vol. 97, № 11.

54. Shavelkin A. A., Kruhliak H. V. Energy management of a grid-connected photovoltaic system with battery storage // Electrical Engineering & Electromechanics. – 2021. – № 2. – P. 36–42.

55. ТОВ «Оптіма Фарм»: веб-сайт: URL <https://optimapharm.ua/uk/> (дата звернення 0.1.05.2026).