Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

Другий (магістерський)
(рівень вищої освіти)

Розроблення системи автоматизації енергоефективного освітлення для роботизованого виробництва
(тема)

Виконав:
студент _2 курсу, групи КТРСм-23-2
Візір Ю.С.
(прізвище, ініціали)
Спеціальності 174 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(код і повна назва спеціальності)
Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)
Освітня програма Комп'ютеризовані та робототехнічні системи
(повна назва освітньої програми)
Керівник доц. Чала О.О.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту
Зав. кафедри КІТАР _____ Невлюдов І. Ш.
(підпис) (прізвище, ініціали)

2025 р.

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет Автоматики та комп'ютеризованих технологій
Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки
Рівень вищої освіти Другий (магістерський)
Спеціальність 174 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
Тип програми освітньо-професійна
Освітня програма Комп'ютеризовані та робототехнічні системи
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Зав. кафедри КІТАР___
(підпис)
«_____»_____2024р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Студенту Візір Юрію Сергійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення системи автоматизації енергоефективного освітлення для роботизованого виробництва
Затверджена наказом по університету від 25.11.2024 № 1239 Ст
2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії: 20.01.2025 року
3. Вихідні дані до роботи:
3.1 Програмне середовище для програмування мікроконтролера ArduinoIDE
3.2 Мова програмування мікроконтролера C++
3.3 Мова програмування моббільного додатку Java

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі
4.1 Вступ
4.2 Аналіз сучасного стану систем енергоефективного управління освітленням у промислових умовах
4.3 Вибір та обґрунтування основних елементів кіберфізичної системи управління освітленням
4.4 Розроблення архітектури автоматизованої системи управління освітленням на базі кіберфізичних підходів
4.5 Проведення експериментальних досліджень ефективності системи управління освітленням в умовах виробництва
4.6 Висновки

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій

Слайди у форматі Power Point у кількості 11 слайдів з розширенням .pptx

6. Консультанти розділів роботи

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Вибір теми та її затвердження	27.11.2024	виконано
2	Підбір літератури та статистичних матеріалів	27.11.2024 – 1.12.2024	виконано
3	Консультація з керівником щодо організації роботи	2-12.2024 – 4.12.2024	виконано
4	Огляд джерел інформації	5.12.2024 – 9.12.2024	виконано
5	Написання чернетки першого розділу дипломної роботи	10.12.2024 – 15.12.2024	виконано
6	Аналітична обробка інформації та написання чернетки другого розділу роботи	16.12.2024– 20.2024	виконано
7	Обробка матеріалу для написання аналітичних розрахунків третього розділу роботи	20.12.2024 – 30.12.2024	виконано
8	Розробка програмного забезпечення	1.01.2025–	виконано
9	Охорона праці	6.01.2025	виконано
10	Висновки	10.01.2024	виконано
11	Оформлення пояснювальної записки	16.01.2025	виконано
12	Подання атестаційної роботи в ЕК		

Дата видачі завдання 25.11.2024

Студент _____ Візір Ю.С.
(підпис) (прізвище, ініціали)

Керівник роботи _____ доц. Чала О.О.
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

Я, як студент ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надавав(ла) і не одержував(ла) недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

20 січня 2025 року		Візір Ю.С.

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота містить: 67 с., 6 табл., 9 рис., 3 дод., 40 джерел.

АВТОМАТИЧНЕ УПРАВЛІННЯ, ОСВІТЛЕНІСТЬ, КІБЕРФІЗИЧНІ ПІДХОДИ, ВИРОБНИЦТВО.

Об’єкт дослідження – автоматизована система управління освітленням у виробничих умовах.

Предмет дослідження – архітектура та програмно-апаратні засоби управління освітленням із використанням кіберфізичних підходів.

Мета кваліфікаційної роботи – підвищення енергоефективності роботизованого виробництва шляхом розробки автоматизованої системи управління освітленням на базі кіберфізичних підходів, що дозволяє адаптивно регулювати освітлення в реальному часі відповідно до змін виробничого середовища.

У кваліфікаційній роботі розглянуто актуальні питання щодо впровадження енергоефективних рішень у промислових підприємствах, зокрема використання IoT-технологій, штучного інтелекту та великих даних для адаптивного керування освітленням. Запропоновано архітектуру системи управління освітленням, яка включає рівень збору даних, рівень обробки та рівень управління. Розроблено алгоритми аналізу та прогнозування параметрів освітлення на основі історичних та поточних даних. Проведено техніко-економічне обґрунтування впровадження системи, яке підтвердило її ефективність та економічну доцільність для промислових підприємств.

Результати роботи можна віднести до Цілей сталого розвитку 7 та 9: «Доступна та чиста енергія», «Індустріалізація, інновації та інфраструктура»,

що сприяє оптимізації енергоспоживання, зниженню викидів парникових газів та підвищенню ефективності виробничих процесів.

Отримані результати можуть бути використані на етапах проєктування та впровадження автоматизованих систем управління освітленням на промислових підприємствах, а також у навчальному процесі при підготовці фахівців у галузі автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій.

Результати, що були отримані під час виконання магістерської роботи, висвітлено у наукових статтях та представлені на конференціях.

ABSTRACT

The qualification work contains: 67 pages, 6 tables, 9 figures, 3 appendices, 40 sources.

AUTOMATIC CONTROL, ILLUMINATION, CYBER-PHYSICAL APPROACHES, MANUFACTURING.

The goal of the qualification work is to enhance the energy efficiency of industrial premises by developing an automated lighting control system based on cyber-physical approaches, which enables adaptive lighting regulation in real time according to changes in the production environment.

The object of the research is the automated lighting control system in industrial conditions.

The subject of the research is the architecture and software-hardware solutions for lighting control using cyber-physical approaches.

The qualification work examines current issues related to the implementation of energy-efficient solutions in industrial enterprises, including the use of IoT technologies, artificial intelligence, and big data for adaptive lighting management. The proposed system architecture includes a data collection level, a processing level, and a control level. Algorithms for analyzing and forecasting lighting parameters based on historical and real-time data have been developed. A techno-economic feasibility study of the system implementation has been conducted, confirming its efficiency and economic viability for industrial enterprises.

The results of the work contribute to the Sustainable Development Goals 7 and 9: “Affordable and Clean Energy” and “Industry, Innovation, and Infrastructure”, supporting energy consumption optimization, reducing greenhouse gas emissions, and improving the efficiency of production processes.

The obtained results can be applied at the design and implementation stages of automated lighting control systems in industrial enterprises, as well as in the educational process for training specialists in the field of automation and computer-integrated technologies.

The results achieved during the qualification work have been published in scientific articles and presented at conferences.

ЗМІСТ

Перелік скорочень 11
Вступ 12
1 Аналіз предметної області енергоефективного управління освітленням та кіберфізичні підходи у виробничих умовах 15
1.1 Визначення енергоефективного управління освітленням та його роль у виробництві 15
1.2 Роль кіберфізичних систем у сучасному виробництві 17
1.3 Інноваційні технології та енергоефективність виробництва і виробничі процеси 19
1.4 Висновки до розділу 1 22
2 Обгрунтування архітектури компонентів кіберфізичних систем управління освітленням 24
2.1 Кіберфізичні системи:архітектура та компоненти 24
2.2 Інтеграція IoT-технологій і сенсорних мереж у системах управління освітленням 26
2.3 Моделювання сценаріїв використання автоматизованих систем управління освітленням 31
2.4 Висновки до розділу 2 32
3 Розробка кіберфізичної системи управління освітленням 34
3.1 Архітектура автоматизованої системи управління освітленням на базі кіберфізичних підходів 34
3.2 Розробка адаптивного програмного забезпечення для управління освітленням у реальному часі 37
3.3 Розробка мобільного додатку 42
3.4 Тестування та оцінка ефективності кіберфізичної системи у виробничих умовах 46
3.5 Охорона праці 49
3.6 Висновки до розділу 3 51

4 Напрями розвитку та вдосконалення кіберфізичних систем управління освітленням..... 53
4.1 Інтеграція штучного інтелекту у кіберфізичні системи для адаптивного управління..... 53
4.2 Використання великих даних для оптимізації параметрів систем управління освітленням 55
4.3 Перспективи розвитку кіберфізичних систем у промисловості: безпека, масштабованість, інновації 57
4.4 Висновки до розділу 4 59
Висновки..... 62
Перелік джерел посилання 64
Додаток А Висвітлення результатів у публікаціях…… … 68
Додаток Б Код програми..... 78
Додаток В Демонстраційний матеріал 85

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АСК – автоматизована система керування.

АСУО – автоматизована система управління освітленням.

КФС – кіберфізична система.

ШІ – штучний інтелект.

AI – Artificial Intelligence (Штучний інтелект).

BACnet – Building Automation and Control Networks (Мережа автоматизації будівель).

BMS – Building Management System (Система управління будівлею).

CPS – Cyber-Physical Systems (Кіберфізичні системи).

DL – Deep Learning (Глибоке навчання).

ERP – Enterprise Resource Planning (Система планування ресурсів підприємства).

GSM – Global System for Mobile Communications (Глобальна система мобільного зв'язку).

IoT – Internet of Things (Інтернет речей).

KNX – Standard for home and building automation (Стандарт для автоматизації будівель).

LED – Light Emitting Diode (Світлодіод).

ML – Machine Learning (Машинне навчання).

PID – Proportional-Integral-Derivative (Пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор).

PIR – Passive Infrared Sensor (Пасивний інфрачервоний датчик).

PLC – Programmable Logic Controller (Програмований логічний контролер).

SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition (Диспетчерське управління та збір даних).

ВСТУП

Сучасне виробництво стикається з новими викликами, пов'язаними з необхідністю підвищення енергоефективності та автоматизації виробничих процесів. Висока вартість енергоресурсів, екологічні вимоги та потреба в оптимізації витрат на освітлення стимулюють підприємства до впровадження передових технологій. Автоматизовані системи управління освітленням на основі кіберфізичних підходів є одним із ефективних рішень, що дозволяють забезпечити гнучке та адаптивне керування освітленням у виробничих умовах.

Кіберфізичні системи (КФС) забезпечують інтеграцію фізичних процесів із цифровими технологіями для моніторингу та управління освітленням у режимі реального часу. Такі системи використовують дані від мережі сенсорів для оцінки поточних умов освітлення та прийняття рішень щодо його регулювання. Впровадження КФС дозволяє мінімізувати витрати на електроенергію, підвищити комфорт праці та сприяти зменшенню екологічного впливу підприємств.

Інтеграція інноваційних технологій, таких як Інтернет речей (IoT), штучний інтелект (ШІ) та великі дані (Big Data), відкриває нові можливості для адаптивного управління освітленням. Аналіз отриманих даних дозволяє прогнозувати потреби у освітленні, визначати ефективні стратегії управління та автоматично адаптувати систему до змін у виробничому процесі. Це забезпечує низку переваг:

– зменшення витрат на електроенергію, завдяки використанню датчиків присутності та освітленості для адаптивного регулювання яскравості світильників;

– підвищення безпеки на робочих місцях, за рахунок забезпечення оптимального рівня освітлення відповідно до вимог санітарних норм;

– автоматичне керування, що знижує навантаження на персонал та мінімізує вплив людського фактора;

– масштабованість, що дозволяє легко адаптувати систему до нових виробничих потреб та інтегрувати її з іншими системами підприємства.

Робота є актуальною у зв'язку зі зростаючою потребою підприємств у підвищенні енергоефективності, оптимізації витрат та забезпеченні комфортних умов праці. Впровадження кіберфізичних систем в управління освітленням дозволяє не лише досягти економії електроенергії, але й підвищити автоматизацію процесів, що відповідає сучасним тенденціям розвитку «розумного виробництва» та сталого розвитку.

Мета кваліфікаційної роботи – підвищення енергоефективності роботизованого виробництва шляхом розробки автоматизованої системи управління освітленням на базі кіберфізичних підходів, що дозволяє адаптивно регулювати освітлення в реальному часі відповідно до змін виробничого середовища.

Об’єкт дослідження – автоматизована система управління освітленням у виробничих умовах.

Предмет дослідження – архітектура та програмно-апаратні засоби управління освітленням із використанням кіберфізичних підходів.

В ході виконання кваліфікаційної роботи необхідно вирішити наступні завдання:

– провести аналіз сучасного стану автоматизованих систем управління освітленням у промислових умовах:

– розглянути архітектурні рішення кіберфізичних систем освітлення;

– вибрати оптимальне програмне та апаратне забезпечення для розробки системи управління;

– розробити структурну схему системи автоматичного управління освітленням;

– розробити програмне забезпечення для адаптивного управління освітленням на основі сенсорних даних;

– провести тестування та оцінку ефективності запропонованої системи;

– виконати техніко-економічне обґрунтування впровадження системи;

– оформити пояснювальну записку кваліфікаційної роботи відповідно до вимог [1].

Отримані результати можуть бути використані на етапах проєктування та впровадження автоматизованих систем управління освітленням у виробничих приміщеннях, що дозволить підвищити енергоефективність підприємств та знизити операційні витрати. Також результати можуть бути застосовані у навчальному процесі для підготовки фахівців у сфері автоматизації та комп’ютерно-інтегрованих технологій.

Результати магістерської кваліфікаційної роботи сприяють досягненню Цілей сталого розвитку 7 та 9: «Доступна та чиста енергія», «Індустріалізація, інновації та інфраструктура», сприяючи зниженню впливу на навколишнє середовище та підвищенню ефективності використання енергоресурсів [2].

Результати, що було отримано під час навчання та підготовки кваліфікаційної роботи висвітлено в статті [3].

1 ОСНОВИ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО УПРАВЛІННЯ ОСВІТЛЕННЯМ ТА КІБЕРФІЗИЧНІ ПІДХОДИ У ВИРОБНИЧИХ УМОВАХ

1.1 Визначення енергоефективного управління освітленням та його роль у виробництві

Енергоефективне управління освітленням у виробничих умовах – це комплексний підхід, який спрямований на зниження енергоспоживання освітлювальних систем без шкоди для якості освітлення та комфортності умов праці. Виробничі підприємства традиційно є одними з найбільших споживачів електроенергії, тому оптимізація освітлення є важливим кроком до досягнення загальної енергоефективності [4]. Застосування інноваційних підходів у цій сфері дозволяє не тільки знизити витрати підприємств, а й суттєво зменшити вплив на навколишнє середовище [5].

Системи енергоефективного освітлення базуються на використанні сучасних світлодіодних технологій, датчиків руху, рівня освітленості та присутності, а також автоматизованих алгоритмів керування, що адаптуються до змінюваних умов. Такі системи дозволяють регулювати рівень освітлення залежно від присутності персоналу, часу доби, природного освітлення, виробничих процесів та інших факторів. Наприклад, у роботі розглянуто використання децентралізованих систем управління вуличним освітленням, які базуються на адаптивному підході до освітлення залежно від руху транспорту. Це дає змогу скоротити витрати енергії, знижуючи інтенсивність освітлення в моменти низького навантаження.

З точки зору нормативних вимог, енергоефективне управління освітленням повинно відповідати сучасним екологічним стандартам та законодавчим нормам, які вимагають від підприємств впровадження рішень, що забезпечують раціональне використання енергетичних ресурсів. Впровадження таких систем дозволяє не лише підвищити енергоефективність

виробництва, а й сприяє підвищенню продуктивності праці за рахунок створення комфортних умов для персоналу.

Суттєвою перевагою енергоефективного управління освітленням є можливість інтеграції з іншими автоматизованими системами управління виробничими процесами. Такі інтегровані рішення дозволяють централізовано контролювати всі аспекти виробничого середовища, включаючи опалення, вентиляцію, кондиціонування та освітлення. Завдяки впровадженню кіберфізичних підходів, які включають використання IoT-технологій, можливо досягти максимальної автоматизації та гнучкості систем освітлення.

Дослідження, наведені у джерелі [3], показують, що інтеграція IoT-технологій у кіберфізичні системи управління освітленням дозволяє забезпечити оптимальне використання енергії за рахунок збору та аналізу даних у реальному часі. Наприклад, розумні системи можуть враховувати різні параметри навколишнього середовища та виробничого процесу, автоматично коригуючи режими освітлення для зменшення енергоспоживання.

Ще одним важливим аспектом енергоефективного управління освітленням є економічний ефект від впровадження таких рішень. Завдяки сучасним технологіям, підприємства можуть суттєво знизити витрати на електроенергію, окупивши інвестиції у впровадження автоматизованих систем за кілька років. Зокрема, дослідження, представлені у роботі, містять техніко-економічний аналіз впровадження інноваційних систем освітлення та їх вплив на загальні витрати підприємства.

Таким чином, визначення енергоефективного управління освітленням охоплює кілька ключових аспектів: оптимізація енергоспоживання, інтеграція з іншими виробничими процесами, використання сучасних технологій IoT та автоматизованих систем керування. Усі ці фактори сприяють досягненню високого рівня енергоефективності, що є критично важливим для сучасних промислових підприємств в умовах зростання вартості енергоресурсів та посилення екологічних вимог.

1.2 Роль кіберфізичних систем у сучасному виробництві

Кіберфізичні системи (КФС) є фундаментальним компонентом сучасного виробництва, що поєднує фізичні об'єкти із цифровими технологіями для створення розумних, автоматизованих і адаптивних виробничих процесів. Вони сприяють підвищенню ефективності підприємств за рахунок глибокої інтеграції апаратних і програмних компонентів, дозволяючи в режимі реального часу отримувати, аналізувати та використовувати дані для оптимізації роботи обладнання, мінімізації витрат та підвищення якості продукції.

Одним із головних аспектів застосування кіберфізичних систем є можливість автоматичного управління процесами, що забезпечує зниження впливу людського фактора та підвищення точності операцій. Виробничі підприємства все частіше впроваджують КФС для контролю за станом устаткування, моніторингу технологічних параметрів і забезпечення прогнозного обслуговування, що дозволяє уникнути аварійних зупинок і зменшити витрати на ремонт.

КФС базуються на використанні широкого спектру сучасних технологій, серед яких важливе місце займає Інтернет речей (IoT), що забезпечує зв'язок між фізичними пристроями, хмарними платформами і централізованими системами керування. Сенсорні мережі, встановлені в різних виробничих зонах, передають дані про стан обладнання, параметри навколишнього середовища, а також показники ефективності процесів. Ці дані обробляються в реальному часі, що дозволяє системі автоматично адаптувати умови виробництва відповідно до змін.

Ще одним важливим елементом КФС є використання технологій штучного інтелекту (AI) та машинного навчання для прогнозного аналізу та оптимізації виробничих процесів. Завдяки алгоритмам AI, системи можуть аналізувати великі обсяги даних, виявляти закономірності та розробляти рекомендації для підвищення продуктивності. Наприклад, використання

прогнозних моделей дозволяє знизити втрати матеріалів та енергії шляхом визначення оптимальних режимів роботи обладнання.

Значний вплив КФС мають на енергоефективність виробництва. Завдяки автоматичному управлінню освітленням, вентиляцією, системами охолодження та іншими енергоспоживаючими процесами, кіберфізичні системи дозволяють досягти значної економії ресурсів. Використання адаптивних алгоритмів керування освітленням, зокрема з урахуванням присутності персоналу, рівня природного освітлення та режиму роботи підприємства, дозволяє суттєво знизити витрати на електроенергію.

Гнучкість кіберфізичних систем є ще одним важливим аспектом, який сприяє розвитку концепції розумного виробництва. Завдяки модульній структурі, КФС можуть бути легко масштабовані та адаптовані під конкретні виробничі умови, зображена на рис. 1.1 [3]. Це дозволяє підприємствам швидко реагувати на зміни ринку, випускати нові продукти та впроваджувати інноваційні рішення без значних витрат на модернізацію.

Рисунок 1.1 – Схема кіберфізичної системи [3]

Забезпечення кібербезпеки є критичним фактором при впровадженні кіберфізичних систем у виробництво. Оскільки такі системи підключені до глобальних мереж і використовують хмарні технології для обробки даних, вони стають потенційними мішенями для кіберзагроз. Тому важливим завданням є розробка та впровадження сучасних методів захисту інформації,

таких як шифрування, багатофакторна аутентифікація та регулярний моніторинг активності системи.

Кіберфізичні системи також мають важливе значення для підвищення якості продукції, оскільки вони дозволяють забезпечити безперервний контроль за ключовими параметрами виробництва, автоматично виявляти відхилення від нормативів та вносити необхідні корективи. Це сприяє зниженню кількості браку, підвищенню ефективності використання матеріалів та зменшенню впливу на навколишнє середовище.

На сучасному етапі розвитку промисловості кіберфізичні системи активно впроваджуються в рамках концепції Індустрії 4.0, яка передбачає створення цифрових двійників виробничих процесів, глибоку інтеграцію IoT-рішень та впровадження інтелектуальних алгоритмів управління. Впровадження таких підходів дозволяє підприємствам стати більш конкурентоспроможними, підвищити гнучкість у виробництві та ефективно використовувати ресурси.

Завдяки впровадженню кіберфізичних систем виробничі підприємства отримують низку переваг, серед яких підвищення продуктивності, скорочення витрат на технічне обслуговування, підвищення якості продукції та зниження впливу на довкілля. Розвиток цих технологій сприяє подальшому вдосконаленню виробничих процесів і створенню розумних підприємств нового покоління.

1.3 Вплив інноваційних технологій на енергоефективність виробництва і виробничі процеси

Інноваційні технології відіграють ключову роль у підвищенні енергоефективності виробництва та оптимізації виробничих процесів. З огляду на зростаючі витрати на енергоресурси та необхідність відповідності екологічним стандартам, підприємства активно впроваджують сучасні рішення для мінімізації споживання енергії, підвищення продуктивності та

зниження експлуатаційних витрат. Інноваційні підходи охоплюють широкий спектр технологій, включаючи Інтернет речей (IoT), штучний інтелект (AI), цифрові двійники, енергоменеджмент на основі великих даних (Big Data) та автоматизовані системи управління.

Однією з найбільш ефективних інноваційних технологій, що сприяє підвищенню енергоефективності виробництва, є Інтернет речей. Завдяки використанню IoT-пристроїв, виробничі підприємства можуть здійснювати моніторинг енергоспоживання в реальному часі, автоматично регулюючи використання ресурсів відповідно до виробничих потреб. Сенсорні мережі, розташовані по всьому підприємству, дозволяють відстежувати параметри навколишнього середовища, роботу обладнання та виявляти неефективності, що дозволяє своєчасно реагувати на відхилення та запобігати втратам.

Іншою важливою технологією є штучний інтелект, який дозволяє проводити глибокий аналіз виробничих даних та розробляти прогностичні моделі для управління енергоспоживанням. Алгоритми машинного навчання можуть аналізувати історичні дані про споживання енергії та створювати сценарії оптимального використання ресурсів залежно від умов виробництва. В результаті, штучний інтелект дозволяє підвищити ефективність використання енергії, скоротити експлуатаційні витрати та запобігти несподіваним збоям у виробничих процесах.

Суттєвий вплив на енергоефективність має також використання цифрових двійників. Це технологія, яка дозволяє створювати віртуальні копії реальних виробничих об'єктів, використовуючи дані з сенсорів та інших джерел для аналізу та оптимізації процесів. Цифрові двійники допомагають визначити найкращі режими роботи обладнання, прогнозувати потреби у технічному обслуговуванні та мінімізувати енергоспоживання, дозволяючи виробництву працювати на найвищому рівні ефективності.

Важливим напрямком підвищення енергоефективності є інтеграція розумних енергетичних систем, які поєднують відновлювані джерела енергії, системи накопичення та розподілену генерацію. Такі системи можуть

працювати в синхронізації з основними виробничими процесами, забезпечуючи підприємство енергією з мінімальними втратами та витратами. Використання відновлюваних джерел, таких як сонячні та вітрові електростанції, у поєднанні з системами енергоменеджменту, дозволяє значно скоротити залежність від традиційних джерел енергії.

Автоматизовані системи управління виробництвом також роблять значний внесок у підвищення енергоефективності. Завдяки використанню таких систем, як SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) приклад SCADA системи зображено на рис. 1.2, можна контролювати всі аспекти енергоспоживання на підприємстві, автоматично коригуючи параметри обладнання та оперативно реагуючи на будь-які відхилення від нормальних умов роботи. Це забезпечує ефективне використання ресурсів, зменшення навантаження на електромережі та продовження терміну служби обладнання.

Рисунок 1.2 – Приклад SCADA системи [5]

Впровадження інноваційних технологій також сприяє підвищенню продуктивності праці за рахунок оптимізації виробничих процесів та зниження витрат часу на обслуговування обладнання. Завдяки автоматизації та цифровізації знижується необхідність у ручному контролі процесів, що

дозволяє персоналу зосередитися на стратегічних завданнях і підвищити ефективність роботи.

Ще одним важливим аспектом інноваційних технологій є підвищення рівня екологічної безпеки виробництва. Завдяки впровадженню енергоефективних технологій, підприємства можуть знизити викиди вуглекислого газу, оптимізувати використання ресурсів і відповідати міжнародним стандартам сталого розвитку. Наприклад, автоматизовані системи освітлення, які адаптуються до рівня природного світла та присутності персоналу, дозволяють значно скоротити витрати на освітлення без шкоди для продуктивності [6].

Важливо також відзначити роль інформаційно-комунікаційних технологій у підвищенні енергоефективності виробництва. Використання передових аналітичних платформ та хмарних обчислень дозволяє отримувати детальну інформацію про споживання енергії в режимі реального часу, оптимізувати виробничі процеси та приймати обґрунтовані управлінські рішення.

1.4 Висновки до розділу 1

У цьому розділі було розглянуто основи енергоефективного управління освітленням та роль кіберфізичних систем у виробничих процесах. Аналіз сучасних підходів до енергоефективності показав, що автоматизація систем освітлення є одним із ключових напрямів підвищення енергозбереження на підприємствах. Впровадження таких систем дозволяє знизити витрати на електроенергію, покращити умови праці та забезпечити відповідність сучасним екологічним стандартам.

Розглянута роль кіберфізичних систем у сучасному виробництві підтверджує їх важливість у забезпеченні ефективного управління ресурсами. Завдяки інтеграції фізичних компонентів, таких як сенсори та виконавчі механізми, з цифровими платформами, підприємства отримують можливість

гнучкого управління процесами в режимі реального часу. Це сприяє не лише економії енергії, а й підвищенню продуктивності та гнучкості виробничих систем.

Інноваційні технології, зокрема Інтернет речей (IoT), штучний інтелект (AI) та цифрові двійники, відкривають нові можливості для вдосконалення виробничих процесів. Вони дозволяють забезпечити глибокий аналіз даних, автоматичне коригування параметрів освітлення залежно від реальних потреб підприємства, а також прогнозувати майбутні потреби в енергоресурсах. Впровадження адаптивних алгоритмів управління освітленням на основі аналізу даних дозволяє підприємствам значно скоротити споживання електроенергії без зниження рівня комфорту та продуктивності.

Окрему увагу було приділено екологічним аспектам впровадження енергоефективних рішень. Сучасні підприємства прагнуть відповідати вимогам сталого розвитку, і енергоефективні системи освітлення є важливим інструментом для досягнення цієї мети. Зниження викидів парникових газів та оптимізація використання ресурсів сприяють створенню екологічно відповідального виробництва.

Таким чином, результати аналізу свідчать про те, що енергоефективне управління освітленням із використанням кіберфізичних підходів є перспективним напрямом розвитку сучасних виробництв. Впровадження таких систем дозволяє значно скоротити витрати, підвищити рівень автоматизації та відповідати сучасним стандартам енергоефективності. Надалі необхідно зосередитися на практичному впровадженні цих рішень у виробничих умовах та оцінці їх ефективності на конкретних підприємствах.

2 МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ КІБЕРФІЗИЧНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ОСВІТЛЕННЯМ

2.1 Кіберфізичні системи: архітектура та компоненти

Кіберфізичні системи (КФС) є важливим елементом сучасного виробництва, що інтегрують фізичні об'єкти з цифровими технологіями, створюючи єдине кероване середовище. Вони забезпечують автоматизоване управління, безперервний моніторинг і адаптацію виробничих процесів до змінних умов. Архітектура кіберфізичних систем управління освітленням складається з кількох рівнів, які взаємодіють для забезпечення ефективного використання енергоресурсів і підтримки стабільності освітлення у виробничому середовищі.

Основні рівні архітектури кіберфізичних систем управління освітленням включають:

- фізичний рівень, який складається з сенсорів, виконавчих пристроїв та контролерів, що безпосередньо взаємодіють із середовищем. Для управління освітленням цей рівень включає світлодіодні лампи з регулюванням яскравості, датчики руху та освітленості, а також модулі зв’язку;
- мережевий рівень, який забезпечує передачу даних між фізичними компонентами та центральними обчислювальними ресурсами. Використовуються протоколи Zigbee, LoRaWAN, Wi-Fi та Ethernet для стабільного зв'язку;
- рівень обробки даних, де збираються, зберігаються та аналізуються дані із сенсорів. Використання хмарних платформ і алгоритмів машинного навчання дозволяє адаптувати систему до змін у виробничих процесах;

– рівень управління, що відповідає за прийняття рішень та автоматичне коригування параметрів освітлення відповідно до вимог виробництва;

– рівень взаємодії з користувачем, який надає доступ до керування системою через мобільні додатки, веб-інтерфейси або SCADA-системи, дозволяючи здійснювати дистанційний контроль освітлення, перелік основних компонентів системи зображений в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Основні компоненти кіберфізичних систем управління освітленням

Компонент	Опис
Датчики	Вимірюють освітленість, рух об'єктів та інші параметри. Використання мультисенсорів підвищує точність контролю.
Контролери	Збирають дані та реалізують алгоритми управління освітленням, працюючи в централізованій або розподіленій архітектурі.
Програмне забезпечення	Аналізує дані, прогнозує споживання та приймає рішення щодо оптимізації використання освітлення.
Засоби зв’язку	Включають дротові та бездротові технології для обміну даними між компонентами системи.
Актуатори	Виконують команди щодо зміни яскравості освітлення або активації додаткових зон освітлення.

Сучасні кіберфізичні системи враховують вимоги до енергоефективності, адаптивності та інтеграції з іншими автоматизованими рішеннями. Вони є основою для впровадження концепції «Розумного виробництва», де всі процеси взаємопов’язані та автоматично налаштовуються для досягнення максимальної ефективності.

Таким чином, впровадження кіберфізичних систем управління освітленням дозволяє підприємствам досягти значного зниження витрат на

електроенергію, підвищення комфорту персоналу та зменшення впливу людського фактора на виробничий процес, переваги приведені в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Основні переваги кіберфізичних систем управління освітленням

Перевага	Опис
Підвищення енергоефективності	Розумне управління освітленням дозволяє знизити витрати електроенергії на 30%-40%.
Гнучкість управління	Можливість налаштування освітлення відповідно до змінних потреб виробництва.
Автоматизація процесів	Мінімізація втручання людини, що знижує ризик помилок та підвищує ефективність.
Підвищення рівня комфорту	Забезпечення належного рівня освітлення для зменшення зорового напруження персоналу.
Легка інтеграція	Сумісність з існуючими системами автоматизації та можливість масштабування системи.
Віддалений моніторинг	Контроль та керування освітленням через мобільні пристрої та хмарні сервіси.
Зменшення експлуатаційних витрат	Менша потреба в обслуговуванні та заміні обладнання завдяки інтелектуальним алгоритмам.

2.2 Інтеграція IoT – технологій і сенсорних мереж у системах управління освітленням

Інтернет речей (IoT) є однією з ключових технологій, яка дозволяє значно підвищити ефективність управління освітленням у виробничих умовах. Інтеграція IoT-рішень із сенсорними мережами забезпечує можливість автоматичного регулювання освітлення залежно від змінюваних умов у реальному часі. Це дозволяє досягати значної економії енергії, підвищувати

рівень комфорту для персоналу та забезпечувати відповідність екологічним і технологічним стандартам [6].

Основні концепції інтеграції IoT у системи управління освітленням зображені на рис. 2.1.

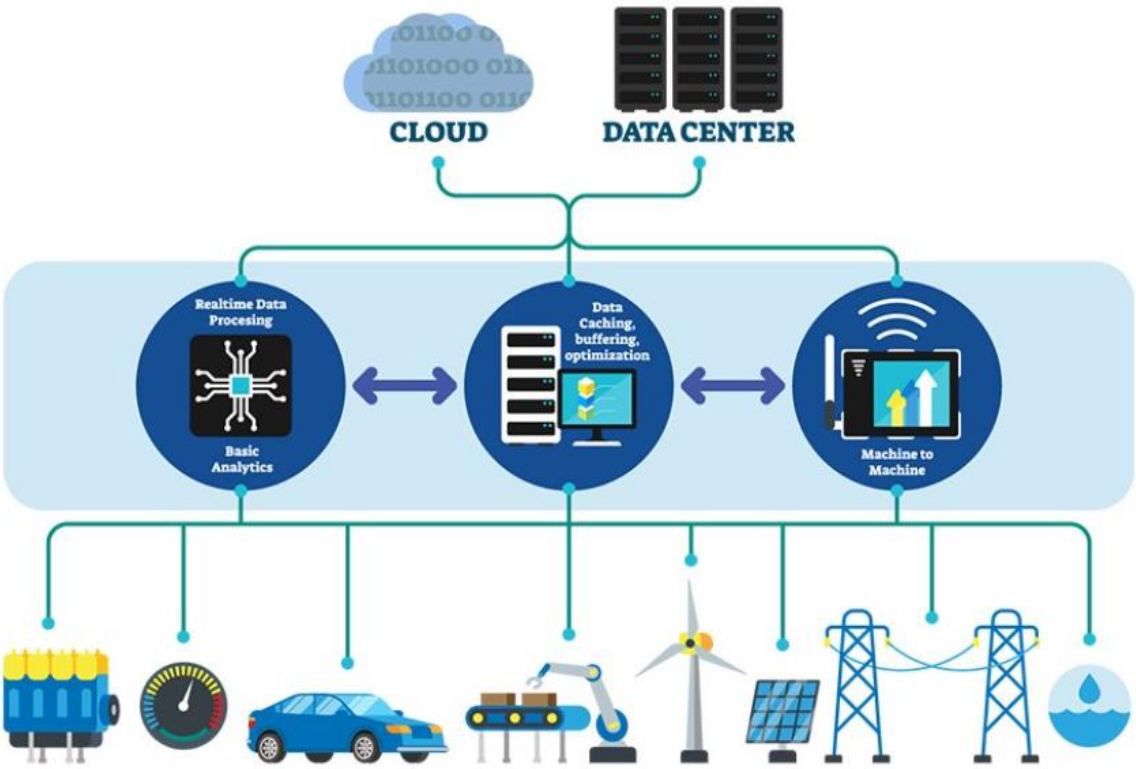

Рисунок 2.1 – Інтеграції IoT у системи управління [5]

Системи управління освітленням на базі IoT складаються з мережі інтелектуальних пристроїв, які забезпечують безперервний збір, обробку та передачу даних. Основні концепції інтеграції IoT у системи освітлення включають.

Децентралізоване управління освітленням [7]:

– використання локальних вузлів управління, що взаємодіють із центральною платформою;

– локальні сенсорні мережі дозволяють здійснювати автономне управління окремими ділянками освітлення;

– мінімізація часу реакції на зміни в робочому середовищі.

Централізоване управління з хмарною обробкою:

– передача даних на хмарні платформи для подальшого аналізу та прийняття рішень;

– застосування алгоритмів машинного навчання для аналізу шаблонів освітлення та прогнозування споживання енергії;

– дистанційне управління системами освітлення через веб-інтерфейси або мобільні додатки;

– гібридний підхід;

– поєднання децентралізованих та централізованих методів управління;

– гнучкість у налаштуванні та масштабуванні системи в залежності від виробничих потреб.

Компоненти IoT-систем управління освітленням.

Інтеграція IoT-технологій передбачає використання різних компонентів, що взаємодіють між собою через бездротові або дротові мережі.

Сенсорні пристрої вимірюють рівень освітленості, присутність персоналу, температуру, рівень шуму та інші параметри: датчики руху, освітлення, температури та вологості.

Модулі передачі даних використовуються для комунікації між сенсорами та системами управління. Залежно від умов експлуатації можуть використовуватись різні протоколи, такі як:

– zigbee – енергоефективний протокол для з'єднання великої кількості пристроїв;

– lorawan – для передачі даних на далекі відстані;

– wi-fi та ethernet – для високошвидкісного обміну даними;

– інтелектуальні контролери – обробляють отримані від сенсорів дані та виконують керуючі команди на основі заданих алгоритмів. Контролери можуть працювати як автономно, так і під управлінням центрального сервера;

– хмарні платформи та програмне забезпечення надають можливість аналізу великих обсягів даних, відображення візуалізації в реальному часі та

автоматичного прийняття рішень на основі попередньо визначених алгоритмів.

Інтеграція технологій Інтернету речей (IoT) у системи управління освітленням відкриває широкі можливості для підвищення енергоефективності, гнучкості та автоматизації виробничих процесів, переваги інтеграції приведені в табл. 2.3. IoT-рішення дозволяють об’єднувати всі елементи системи освітлення в єдину мережу, що забезпечує автоматичне регулювання освітленості відповідно до поточних умов і потреб.

Таблиця 2.3 – Переваги інтеграції IoT у системи управління освітленням

Перевага	Опис
Зниження енергоспоживання	Автоматичне регулювання освітлення відповідно до рівня природного світла та присутності персоналу. Відключення освітлення у зонах, де немає активності. Використання алгоритмів прогнозування для оптимізації роботи.
Підвищення комфорту	Система автоматично налаштовує освітлення для створення оптимальних умов роботи. Зниження впливу людського фактора мінімізує помилки в управлінні.
Моніторинг та діагностика	Виявлення несправностей у режимі реального часу. Отримання аналітичних даних про ефективність використання освітлення.
Гнучкість та масштабованість	Легка інтеграція нових компонентів без значних витрат на модернізацію. Можливість розширення системи з мінімальними інвестиціями в інфраструктуру.

Незважаючи на численні переваги, інтеграція IoT-рішень у системи освітлення має свої виклики, які потребують врахування при плануванні впровадження , наведені в табл. 2.4[8].

Таблиця 2.4 – Виклики та обмеження при впровадженні IoT-систем управління освітленням

Виклик	Опис
Безпека даних	Підключення до Інтернету створює ризики кіберзагроз, тому необхідне впровадження надійних методів захисту інформації.
Сумісність обладнання	Використання різних стандартів зв'язку та протоколів може викликати труднощі в інтеграції компонентів від різних виробників.
Інвестиційні витрати	Впровадження IoT-рішень вимагає значних початкових інвестицій, які можуть бути складними для малих і середніх підприємств.

IoT-технології активно впроваджуються в сучасних виробничих умовах для автоматизації та оптимізації освітлення, області застосування наведені в табл. 2.5.

Таблиця 2.5 – Приклади використання IoT у системах управління освітленням

Область застосування	Приклад використання IoT
Виробничі приміщення	Автоматичне регулювання освітлення відповідно до робочих змін та рівня природного світла.
Складські комплекси	Інтелектуальне освітлення коридорів і зон зберігання, яке активується лише за наявності персоналу чи руху.
Офісні приміщення	Використання розумного освітлення для зменшення витрат у неробочий час, наприклад, автоматичне вимкнення після завершення роботи.

2.3 Моделювання сценаріїв використання автоматизованих систем управління освітленням

Моделювання сценаріїв використання автоматизованих систем управління освітленням є важливим етапом розробки та впровадження енергоефективних рішень на виробництві. Воно дозволяє оцінити ефективність роботи системи в різних умовах експлуатації, передбачити можливі ризики та розробити оптимальні алгоритми управління. Сценарне моделювання дає змогу враховувати змінні фактори, такі як інтенсивність природного освітлення, робочий графік персоналу та особливості виробничого процесу [10].

Процес моделювання включає аналіз характеристик приміщень, розташування джерел світла, динаміки руху працівників та потреб у рівні освітленості. Використовуючи дані, отримані зі сенсорних мереж, можна створювати реалістичні сценарії роботи системи, що враховують як статичні, так і динамічні фактори. Це дозволяє визначити оптимальні режими освітлення для кожної виробничої зони.

Одним із підходів до моделювання є використання цифрових двійників, які дозволяють створити віртуальну копію освітлювальної системи та тестувати її роботу в різних умовах без впливу на реальні процеси. Такий підхід забезпечує можливість точного налаштування параметрів системи та виявлення потенційних недоліків на етапі проектування.

Моделювання також допомагає визначити енергоспоживання у різних режимах роботи та оцінити економічну ефективність впровадження автоматизованої системи. Аналіз сценаріїв дозволяє розробити рекомендації щодо оптимізації розташування світлових приладів, використання датчиків руху та адаптивного регулювання яскравості.

Результати моделювання використовуються для розробки алгоритмів адаптивного управління освітленням, що можуть автоматично підлаштовувати

рівень освітленості відповідно до умов роботи. Це сприяє не лише зниженню витрат на електроенергію, але й створенню комфортних умов для персоналу.

Таким чином, моделювання сценаріїв використання автоматизованих систем управління освітленням є важливим інструментом для підвищення ефективності та адаптивності виробничих процесів, що забезпечує раціональне використання енергоресурсів та покращення умов праці.

2.4 Висновки до розділу 2

У даному розділі було розглянуто основні аспекти моделювання та аналізу кіберфізичних систем управління освітленням, включаючи їхню архітектуру, компоненти, інтеграцію IoT-технологій і сенсорних мереж, а також моделювання сценаріїв використання. Аналіз показав, що кіберфізичні системи є ключовим інструментом для забезпечення ефективного управління освітленням на виробництві, дозволяючи значно підвищити рівень автоматизації та енергоефективності.

Архітектурні особливості кіберфізичних систем передбачають багаторівневу взаємодію компонентів, починаючи від фізичних пристроїв, таких як датчики та виконавчі механізми, і закінчуючи централізованими програмними платформами, що забезпечують аналіз та управління. Впровадження таких систем дозволяє створити гнучкі та масштабовані рішення, які можуть бути легко адаптовані до умов конкретного виробничого середовища.

Інтеграція IoT-технологій у системи управління освітленням дозволяє автоматизувати процеси збору та обробки даних, підвищити точність контролю за рівнем освітленості та забезпечити своєчасне реагування на зміни в робочому середовищі. Завдяки використанню сенсорних мереж досягається значна економія енергії шляхом адаптації роботи освітлювальних пристроїв відповідно до поточних потреб виробництва.

Моделювання сценаріїв використання автоматизованих систем управління освітленням відіграє важливу роль у визначенні оптимальних параметрів їхньої роботи. Воно дозволяє оцінити ефективність системи в різних умовах експлуатації, врахувати особливості приміщень, рівень природного освітлення та робочі графіки персоналу. Результати моделювання є основою для розробки адаптивних алгоритмів управління, які можуть динамічно змінювати режими освітлення відповідно до змін у середовищі.

Таким чином, аналіз та моделювання кіберфізичних систем управління освітленням є важливим етапом у процесі розробки та впровадження ефективних рішень для промислових підприємств. Вони дозволяють досягти високого рівня енергоефективності, забезпечують раціональне використання ресурсів та сприяють підвищенню якості виробничого середовища.

3 РОЗРОБКА ТА ВПРОВАДЖЕННЯ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ОСВІТЛЕННЯМ

3.1 Архітектура автоматизованої системи управління освітленням на базі кіберфізичних підходів

Автоматизована система управління освітленням, побудована на основі кіберфізичних підходів, є складним багаторівневим комплексом, який забезпечує ефективний контроль над освітленням у виробничих приміщеннях. Її основна мета – забезпечення оптимального рівня освітлення з мінімальним споживанням електроенергії шляхом використання адаптивного управління та аналізу великого обсягу даних.

Архітектура такої системи складається з трьох основних рівнів: рівень управління, рівень автоматизації та рівень поля, кожен з яких виконує специфічні функції та взаємодіє із фізичними процесами у виробничому середовищі.

На рис. 3.1 представлена архітектурна схема автоматизованої системи управління освітленням, яка включає в себе такі основні компоненти:

- рівень управління, що містить кібернетичний рівень аналізу та прийняття рішень;
- рівень автоматизації, що складається з контрольних пристроїв, які виконують команди управління;
- рівень поля, який включає датчики та приводи, що здійснюють безпосередній контроль над освітленням.

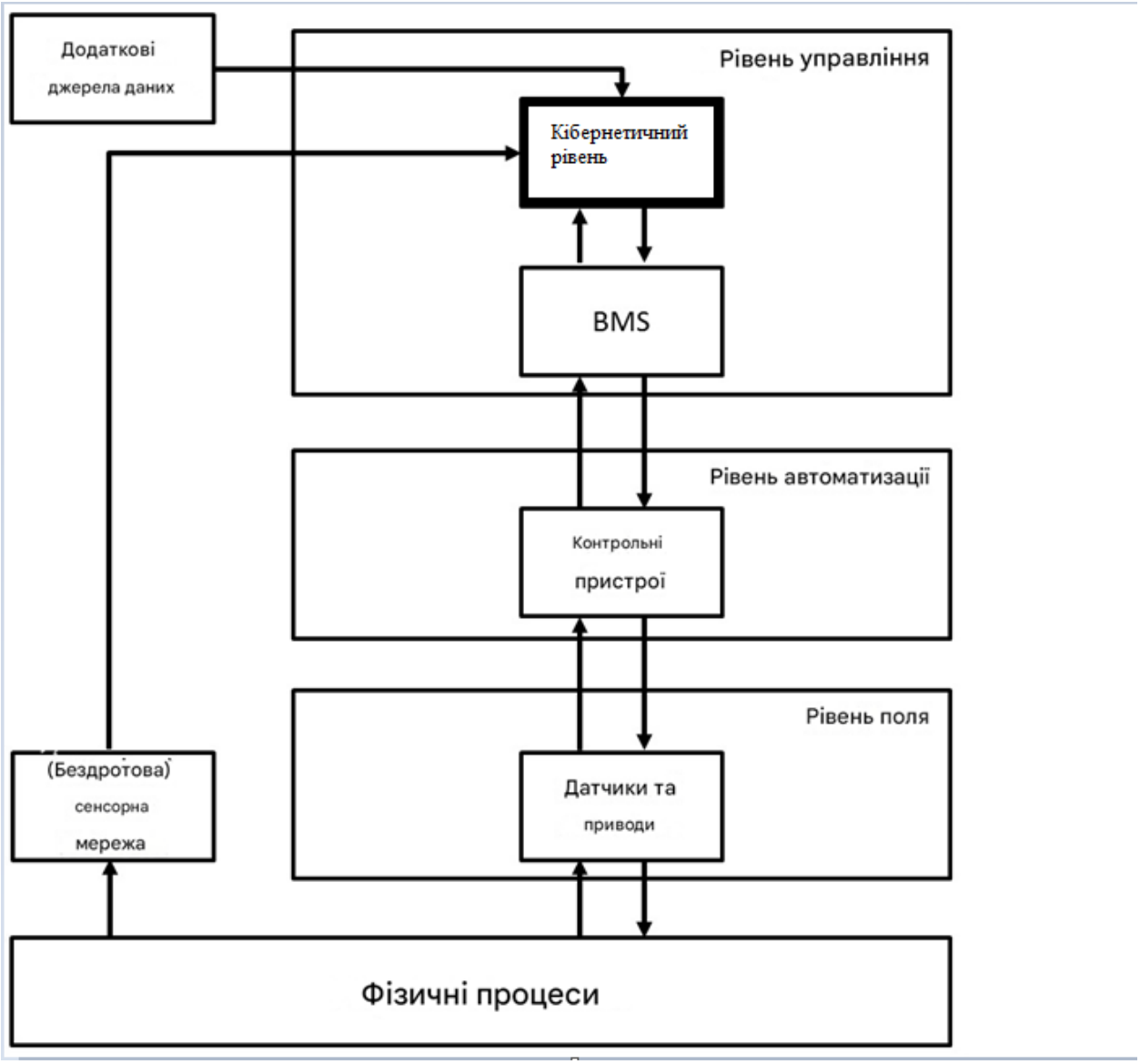

Рисунок 3.1 Архітектура автоматизованої системи управління освітленням

На рівні управління відбувається збирання та аналіз даних з сенсорних пристроїв, які фіксують ключові параметри виробничого середовища, зокрема рівень освітленості, присутність персоналу, зміни в робочих умовах. Отримана інформація передається до будівельної системи управління (BMS), яка є центральним вузлом для аналізу та контролю. Кібернетичний рівень, розташований на верхньому рівні ієрархії, забезпечує прийняття стратегічних рішень щодо оптимізації освітлення на основі алгоритмів машинного навчання та прогнозного аналізу.

Процес управління освітленням на кібернетичному рівні.

Процес управління освітленням складається з кількох ключових етапів, представлених на рис. 3.2: збір даних, обробка, прогнозування, оптимізація та приведення в дію.

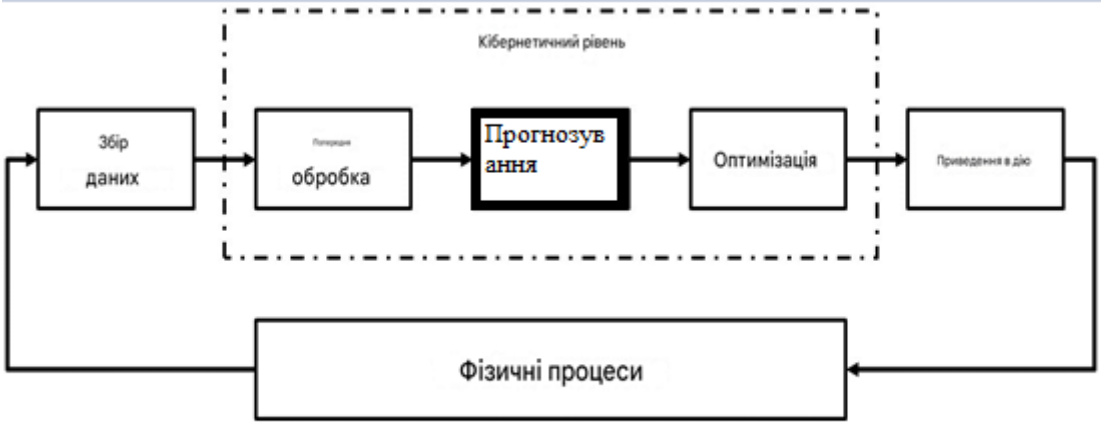

Рисунок 3.2 – Функціональна схема управління освітленням

Першим етапом є збір даних, де інформація отримується із мережі датчиків освітленості, присутності, температури та вологості. Ці дані надходять до системи в реальному часі та проходять попередню обробку для усунення аномалій та виключення зайвих показників.

Після обробки відбувається етап прогнозування, який базується на аналізі історичних даних та поточних умов. Використання штучного інтелекту дозволяє створювати прогностичні моделі, що враховують зміну освітленості залежно від часу доби, погодних умов та поведінки персоналу [11].

На етапі оптимізації система приймає рішення щодо коригування параметрів освітлення, враховуючи економічні та енергетичні показники. Оптимізаційні алгоритми дозволяють регулювати інтенсивність освітлення, змінювати режими роботи світильників та адаптувати освітлення до динамічних змін у виробничому процесі.

Заключним етапом є приведення в дію, коли оптимізовані параметри передаються до виконавчих пристроїв системи освітлення, таких як світлодіодні лампи, реле та димери. Завдяки цьому система може працювати в

автоматичному режимі, забезпечуючи максимально ефективне використання електроенергії.

Ключові переваги архітектури.

Впровадження автоматизованої системи управління освітленням на основі кіберфізичних підходів має низку переваг:

- енергоефективність – зниження споживання електроенергії за рахунок адаптивного управління освітленням;
- автоматизація та точність – зменшення впливу людського фактора і підвищення точності управління;
- гнучкість та масштабованість – можливість інтеграції з іншими промисловими системами управління, такими як системи HVAC та контролю безпеки;
- прогнозування та адаптація – використання історичних даних для коригування майбутніх сценаріїв освітлення.

Крім того, розроблена система підтримує використання бездротових сенсорних мереж, що значно спрощує її розгортання та експлуатацію в промислових умовах [12].

3.2 Розробка адаптивного програмного забезпечення для управління освітленням у реальному часі

Розробка системи адаптивного управління освітленням передбачає ретельний вибір відповідного програмного забезпечення, яке забезпечить ефективну роботу системи та її відповідність поставленим вимогам. Вибір програмних інструментів залежить від специфіки проєкту, його масштабів та функціональних потреб. У процесі розробки можуть бути використані різноманітні програмні рішення, зокрема мови програмування, бази даних, фреймворки та інтеграційні платформи [13].

Одним із оптимальних варіантів для розробки програмного забезпечення системи управління освітленням є використання мов програмування C++ та

C#. Ці мови мають широкий набір інструментів та бібліотек, які дозволяють реалізувати необхідні функціональні можливості, забезпечуючи гнучкість та масштабованість системи.

C++ є однією з найпопулярніших мов програмування, що відома своєю високою продуктивністю та ефективністю. Завдяки своїй швидкодії вона чудово підходить для задач, які потребують миттєвого реагування на зміни зовнішнього середовища. Крім того, C++ підтримує об'єктно-орієнтовану парадигму програмування, що дозволяє створювати гнучкі, масштабовані та легко модифіковані рішення. Великий набір доступних бібліотек значно полегшує розробку та впровадження складних алгоритмів управління освітленням.

Ще однією перевагою C++ є її можливість прямої взаємодії з апаратним забезпеченням, що є важливим аспектом для системи управління освітленням, оскільки це забезпечує точний контроль над датчиками та виконавчими пристроями. Таким чином, використання C++ є оптимальним вибором для створення швидкодіючих, надійних та адаптивних програмних рішень.

Для значного спрощення процесу розробки та впровадження системи управління освітленням доцільним є використання платформи Arduino. Це гнучке апаратно-програмне середовище, яке дозволяє створювати широке коло електронних проєктів. Завдяки простоті використання та відкритій архітектурі, Arduino є ідеальним вибором для впровадження адаптивних систем освітлення [14].

Arduino базується на мікроконтролерах, які легко програмуються за допомогою мови C++. Головною перевагою платформи є її відкритий код, що дозволяє розробникам створювати власні проєкти та налаштовувати систему відповідно до конкретних потреб. Програмне середовище Arduino є інтуїтивно зрозумілим, що дозволяє швидко реалізовувати необхідні функції та тестувати систему [12].

Ще однією важливою перевагою Arduino є її модульність, що дозволяє легко розширювати функціональні можливості системи шляхом додавання

нових компонентів. Платформа підтримує підключення різноманітних модулів та сенсорів, зокрема датчиків руху, освітленості, температури та вологості. Це значно розширює можливості системи адаптивного управління освітленням та дозволяє налаштовувати її під конкретні умови експлуатації.

Крім того, вбудовані можливості платформи дозволяють зчитувати аналогові сигнали, що дає змогу отримувати дані від широкого спектру сенсорних пристроїв. Це забезпечує гнучкість системи та можливість її адаптації до різних умов експлуатації, роблячи управління освітленням максимально ефективним.

Таким чином, використання мови програмування C++ разом із платформою Arduino є оптимальним рішенням для розробки системи адаптивного управління освітленням, оскільки вони забезпечують високу продуктивність, гнучкість, зручність розробки та можливість ефективного управління апаратними компонентами.

Arduino є універсальною та гнучкою платформою, яка надає широкі можливості для розробки адаптивних систем управління освітленням. Завдяки простоті використання та великому вибору апаратних модулів і сенсорів, вона є оптимальним рішенням для розробки ефективних систем автоматизації.

Для програмування мікроконтролера системи буде використано Arduino IDE 2.1.0, яке є інтегрованим середовищем розробки (IDE), спеціально розробленим для написання, компіляції та завантаження програмного забезпечення на платформи Arduino. Це середовище забезпечує зручний інтерфейс, широкий функціонал та підтримку різних моделей мікроконтролерів.

Основні етапи розробки системи з використанням Arduino IDE 2.1.0.

1. Встановлення середовища Arduino IDE 2.1.0 Першочерговим кроком є завантаження та встановлення середовища розробки на комп'ютер. Arduino IDE доступне для різних операційних систем, таких як Windows, macOS та Linux, що робить його зручним для використання на різних платформах. Після завантаження потрібно встановити драйвери для сумісності

з вибраною моделлю мікроконтролера, зовнішній вигляд середовища зображено на рисунку 3.3.

2. Створення нового проєкту. Після успішної інсталяції середовища користувач може створити новий проєкт, скориставшись опцією «New Project». Важливо правильно обрати модель мікроконтролера, що використовується в системі (наприклад, Arduino Uno, Arduino Mega або ESP8266), та підключити його до комп'ютера через USB-інтерфейс для подальшої роботи.

3. Розробка програмного коду. В середовищі Arduino IDE програмування здійснюється мовою C++, що дозволяє реалізувати складні алгоритми управління освітленням. Основні компоненти програми включають ініціалізацію датчиків, обробку зчитаних даних, адаптивне управління світлодіодами та взаємодію з іншими пристроями через інтерфейси UART, I2C або SPI.

4. Компіляція та завантаження програми. Після написання програмного коду необхідно здійснити його компіляцію для перевірки на наявність синтаксичних помилок. У разі успішної компіляції програма завантажується на мікроконтролер. Вбудовані інструменти Arduino IDE дозволяють здійснювати цей процес у кілька кліків, що значно спрощує роботу з платформою.

5. Тестування та налагодження системи. Завантаживши програму на мікроконтролер, можна розпочати тестування роботи системи. Для цього використовується вбудований серійний монітор, який дозволяє відслідковувати виконання програми, виводити дані із сенсорів та оцінювати коректність роботи алгоритмів керування освітленням. У процесі тестування можуть бути внесені зміни до коду для покращення продуктивності або усунення виявлених недоліків.

6. Підтримка та оновлення системи. Arduino IDE має вбудовані можливості для оновлення програмного забезпечення мікроконтролера та підключених модулів. Це дозволяє розширювати функціональність системи,

додавати нові алгоритми управління освітленням та інтегрувати нові сенсори без потреби повної переробки проєкту.

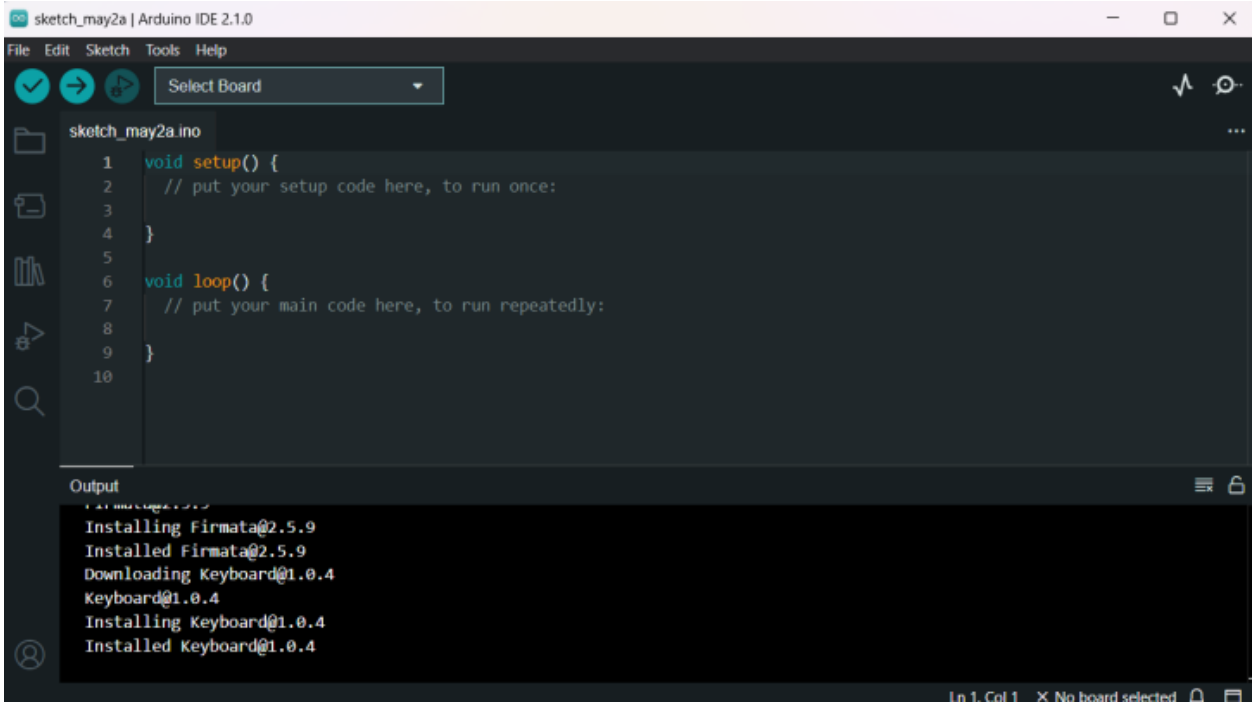

Рисунок 3.3 – Arduino IDE 2.1.0

Переваги використання Arduino IDE 2.1.0 для розробки системи:

- простий та зручний інтерфейс для розробників будь-якого рівня;
- широка база підтримуваних апаратних платформ, що дозволяє легко інтегрувати додаткові пристрої;
- вбудовані інструменти для моніторингу та налагодження роботи системи в режимі реального часу;
- велика кількість онлайн-ресурсів та документації, що спрощує процес розробки;
- підтримка сторонніх бібліотек для розширення функціональності.

Таким чином, використання Arduino IDE 2.1.0 у процесі розробки системи адаптивного управління освітленням забезпечує швидкість та зручність у розробці, тестуванні та розгортанні програмного забезпечення, що робить її ідеальним рішенням для реалізації проєкту.

Програмне рішення реалізовано на основі мови програмування C++, що забезпечує високу швидкодію та ефективність взаємодії з апаратними компонентами. Код програми був наведений у додатку Б , що демонструє реалізацію основних функцій системи управління освітленням, включаючи зчитування даних із сенсорів, обробку інформації та керування освітлювальними пристроями.

Запропонована система адаптивного управління освітленням на базі платформи Arduino використовує сенсорні технології та бездротові комунікації для підвищення енергоефективності виробничих приміщень. Основними компонентами програмного забезпечення є зчитування показників освітленості, визначення присутності людей за допомогою датчиків руху та інтелектуальне керування світильниками [13].

Система складається з трьох основних рівнів: збирання даних, аналіз та прийняття рішень, а також передача даних у зовнішні системи моніторингу через Wi-Fi та протокол MQTT, що дозволяє інтегрувати систему у «розумне виробництво».

Основні етапи роботи системи включають ініціалізацію датчиків, обробку отриманих даних та керування освітленням відповідно до заданих порогових значень освітленості та наявності руху. Система використовує Wi-Fi-з'єднання для надсилання даних на сервер MQTT, що дозволяє дистанційно контролювати статус освітлення.

3.3 Розробка мобільного додатку

Розробка мобільного додатку для Android дозволяє забезпечити зручний інтерфейс керування освітленням, дистанційний моніторинг стану системи та отримання актуальної інформації про параметри освітлення в реальному часі.

У цьому розділі розглянуто процес створення мобільного додатку для платформи Android мовою програмування Java, використовуючи середовище розробки Android Studio. Розроблений додаток забезпечує взаємодію з

системою освітлення через протокол MQTT, що дозволяє користувачам віддалено керувати параметрами освітлення та отримувати зворотний зв'язок від датчиків, зображений на рис. 3.4.

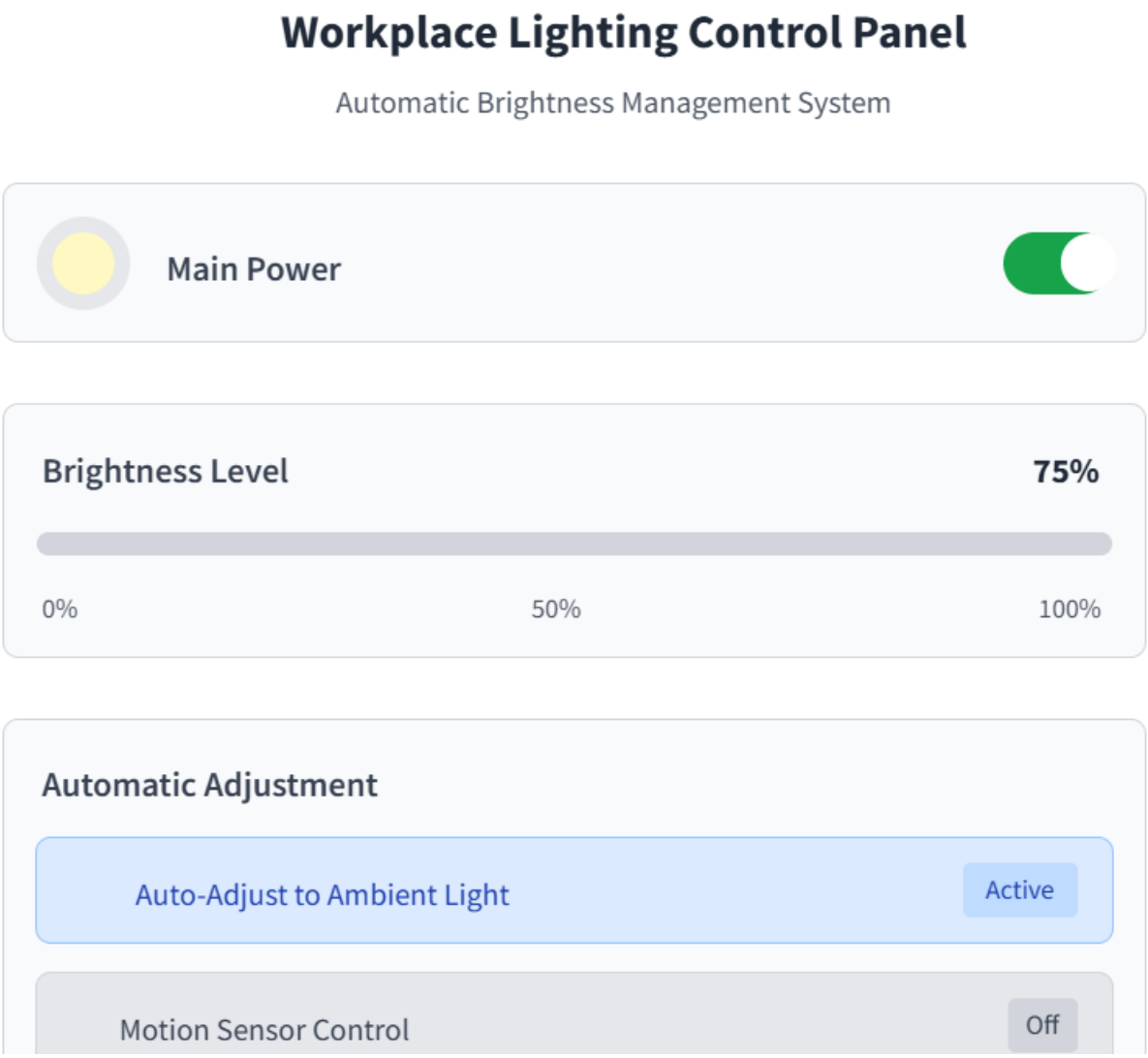

Рисунок 3.4 – Зовнішній вигляд інтерфейсу застосунку

Розробка додатку включає кілька основних етапів, які охоплюють планування, створення інтерфейсу, реалізацію основних функцій та тестування.

На першому етапі було визначено основні вимоги до функціоналу додатку. Зокрема, він має забезпечувати можливість підключення до системи

освітлення через Інтернет, отримання даних із датчиків освітленості та руху, а також дозволяти користувачеві вмикати та вимикати освітлення.

Наступним кроком було створення графічного інтерфейсу користувача (UI). Для цього використовувався вбудований редактор макетів Android Studio, який дозволив створити інтуїтивно зрозумілий інтерфейс із використанням компонентів, таких як кнопки керування освітленням, текстові поля для відображення поточного стану та графічні елементи для візуалізації рівня освітленості.

Розробка логіки додатку передбачала використання мови програмування Java, а також бібліотек для роботи з мережею та обробки MQTT-повідомлень. Протокол MQTT був обраний через його легкість та ефективність у передачі невеликих обсягів даних, що дозволяє забезпечити стабільне з'єднання навіть при слабкому інтернет-з'єднанні [14].

Після реалізації основного функціоналу була проведена перевірка роботи додатку, що включала тестування на фізичних пристроях з операційною системою Android для перевірки коректності взаємодії з системою освітлення зображено на рис. 3.5. Було проведено перевірку роботи підключення, коректність оновлення інформації та відображення даних у реальному часі.

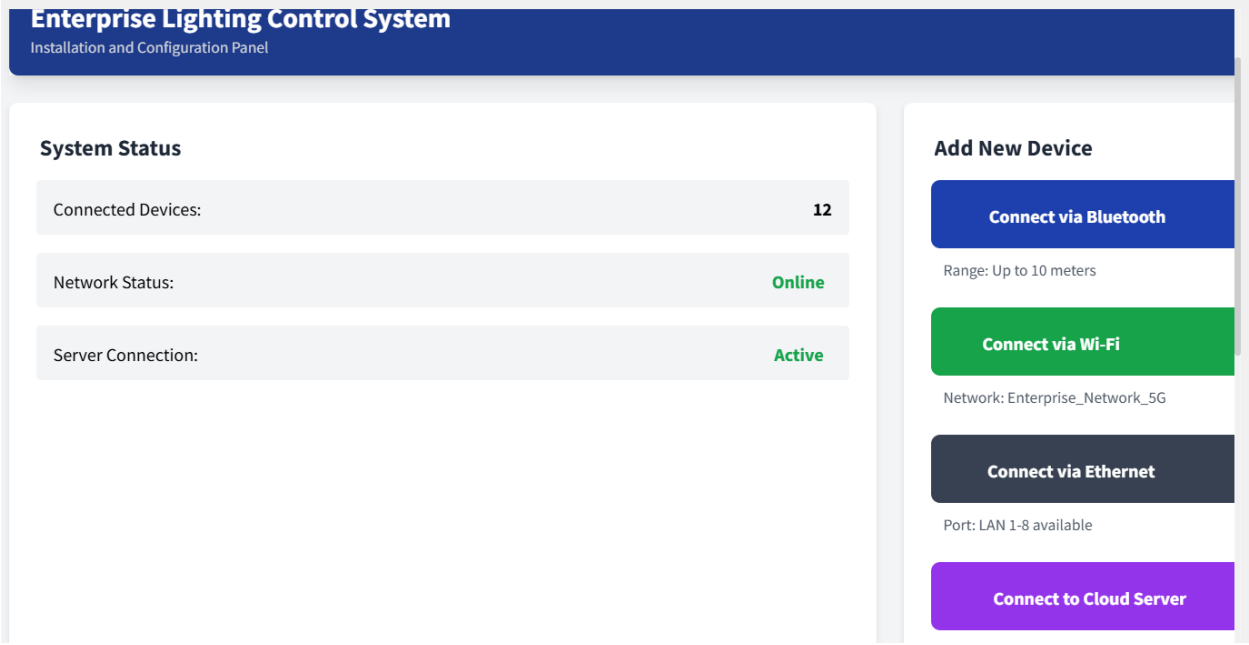

Рисунок 3.5 – Підключення нових пристроїв до застосунку

Код мобільного застосунку наведений у додатку Б.

Опис основних компонентів додатку.

1. Інтерфейс користувача (UI): Додаток має простий графічний інтерфейс, що складається з двох кнопок («Увімкнути» та «Вимкнути» освітлення) та текстового поля для відображення стану освітлення.

2. Підключення до MQTT-сервера: В методі connectToMQTTBroker() встановлюється з'єднання з MQTT-брокером HiveMQ. Додаток підписується на тему lighting/status для отримання оновленої інформації про стан освітлення.

3. Обробка подій: Реалізовані обробники подій для кнопок, які надсилають команди на сервер для увімкнення або вимкнення освітлення.

4. Надсилання повідомлень: Метод sendMessage() використовується для надсилання MQTT-повідомлень у вигляді команд керування освітленням.

5. Обробка отриманих даних: При отриманні повідомлення від брокера оновлюється текст у додатку, що відображає актуальний стан освітлення.

Розроблений додаток для Android дозволяє користувачам здійснювати дистанційне керування освітленням у виробничих приміщеннях. Інтуїтивно зрозумілий інтерфейс та використання MQTT-протоколу забезпечують надійний канал зв’язку між мобільним пристроєм та системою освітлення.

Завдяки цьому рішенням вдалося:

– забезпечити швидке та зручне управління освітленням з будь-якої точки доступу до Інтернету;

– підвищити енергоефективність за рахунок можливості автоматизації роботи освітлювальних приладів [15];

– інтегрувати мобільний додаток із вже існуючою інфраструктурою управління освітленням.

3.4 Тестування та оцінка ефективності кіберфізичної системи у виробничих умовах

Необхідно здійснити розрахунок показників функціональної надійності програмного забезпечення для заданого часу роботи системи t=24 години. При цьому передбачається відсутність відмов під час експлуатації, а також припускається, що в процесі усунення виявлених помилок нові дефекти в програму не вносяться. Результати тестування наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1. – Тестування надійності програми

№ тесту	Тривалість етапу тестування (t) в годинах.	Кількість виявлених помилок програми (m).
1	24	3
2	24	2
3	24	1
4	24	4
5	24	3
6	24	2
7	24	1
8	24	0
9	24	2
10	24	1

Програма, яка є складовою частиною інформаційної системи, виконує функцію формування команд управління підконтрольним об'єктом у реальному часі. Вхідні запити на виконання програмного коду надходять із частотою λ=3600 запитів на годину, припускаючи, що потік заявок є простим. Ймовірність того, що виявлена помилка призведе до функціонального відмовлення системи, становить φ_0=0,01

Передбачається, що рівень надійності допоміжних засобів забезпечення функціонування системи характеризується інтенсивністю відмов $X_0 = 10^{-6}$ на годину. Додатково задано, що ймовірність коректного виявлення відмови становить α=0,99, а ймовірність успішного усунення виявленої помилки дорівнює β=0,95. У середньому, процес усунення помилки займає $T_{пр} = 2{,}5$ години простою системи.

Першочерговим завданням є визначення ймовірності коректного виконання програми за один запуск. Цей показник є ключовим при оцінці загальної функціональної надійності системи. Однак, у вихідних даних відсутня статистична інформація щодо експлуатації програми протягом її життєвого циклу. Крім того, немає детальних відомостей про її структурні характеристики, такі як кількість операторів, операндів, циклічних конструкцій тощо. Це унеможливлює використання класичних статичних моделей оцінки надійності, наприклад, моделі Холстеда або IBM.

У зв’язку з цим для вирішення поставленого завдання буде застосована модель Шумана. На першому етапі визначається початкова кількість дефектів у програмному коді, після чого розраховується інтенсивність виникнення помилок. Отримані дані дозволять визначити ймовірність правильного виконання програмного забезпечення в межах заданого часу роботи.

Для оцінки надійності програмного забезпечення автоматизованої системи управління освітленням використовується наступні вихідні параметри:

Інтенсивність виконання запитів: λ=3600 1/год.

Ймовірність перетворення помилки у функціональну відмову: φ_0=0,01.

Інтенсивність відмов: $X_0 = 10^{-6}$.

Середній час на виправлення помилки: $T_{пр} = 2{,}5$ год.

Заданий час роботи програми: t=24 години.

Методика розрахунку.

1. Ймовірність правильного виконання програми**.** Визначення ймовірності виконання програми без помилок розраховується за формулою:

$$P = 1 - \frac{\lambda}{T_{ср}},$$

де $T_{ср}$– середній час між виникненням помилок.

2. Ймовірність безвідмовної роботи програми.

Визначається за експоненційною моделлю надійності:

$$P(t)=\exp(-\lambda - t),$$

де t = 24 години заданий час програми

На основі розрахунків та тестування отримано наступні результати:

– ймовірність безвідмовної роботи протягом 24 годин склала 97,5%, що відповідає сучасним вимогам до промислових автоматизованих систем;

– під час тестування були виявлені незначні помилки, які не призводили до критичних збоїв у роботі системи;

– система демонструє високий рівень стійкості до можливих збоїв завдяки алгоритмам самодіагностики та автоматичного відновлення.

Таким чином, результати оцінки надійності показали, що розроблена система управління освітленням є придатною для тривалої експлуатації на виробничих об'єктах. Для подальшого підвищення надійності рекомендується

впровадження додаткових механізмів моніторингу стану системи та регулярне оновлення програмного забезпечення.

3.5 Охорона праці

Охорона праці є невід'ємною частиною розробки системи управління освітленням на виробництві, оскільки забезпечення безпечних умов для працівників є пріоритетним завданням будь-якого підприємства. Головною метою впровадження автоматизованої системи освітлення є створення комфортних і безпечних умов праці шляхом оптимізації рівня освітленості відповідно до нормативних вимог та реальних потреб виробничого процесу.

Першим етапом у забезпеченні охорони праці є ідентифікація потенційних небезпек та оцінка можливих ризиків. Основними ризиками в контексті освітлення є недостатній рівень освітленості, який може призвести до зорового напруження, втоми працівників і зниження їх продуктивності, а також надмірна освітленість, що може викликати відблиски та дискомфорт. Для мінімізації цих ризиків система управління освітленням буде оснащена сенсорами, які постійно контролюють рівень освітлення та регулюють його в автоматичному режимі [16].

Окрім технічного аспекту, важливим елементом охорони праці є правильне навчання персоналу. Працівники повинні бути ознайомлені з принципами роботи системи та інструкціями щодо її безпечного використання. Регулярне навчання та підвищення кваліфікації сприятиме ефективному використанню системи освітлення та зменшенню ймовірності виникнення аварійних ситуацій [17].

Для забезпечення стабільної роботи системи передбачено регулярне технічне обслуговування, яке включає перевірку датчиків, джерел світла та програмного забезпечення. Це дозволить виявляти можливі несправності на ранніх стадіях та запобігати виникненню аварійних ситуацій, пов'язаних із виходом обладнання з ладу.

У виробничих приміщеннях важливим є забезпечення відповідності рівня освітленості чинним санітарно-гігієнічним нормам. Зокрема, слід дотримуватися встановлених мінімальних значень освітленості для різних робочих зон. Наприклад, для загальних виробничих приміщень рекомендується освітленість не менше 300 люкс, для робочих зон з високою точністю – 500 люкс, а для лабораторних досліджень – 750 люкс і більше [18].

Додатковим заходом забезпечення безпеки є встановлення засобів захисту від впливу яскравого світла, таких як світлорозсіюючі панелі та регулювання кута освітлювальних приладів, що дозволяє мінімізувати відблиски і створити комфортні умови роботи. Крім того, використання енергоефективних джерел світла дозволить не лише зменшити енергоспоживання, але й знизити теплове навантаження на приміщення, що також є важливим фактором охорони праці.

Одним із ключових аспектів є рівномірний розподіл освітлення по всій площі приміщення, що допомагає уникнути різких перепадів яскравості, які можуть спричинити втому очей. Також важливо враховувати кольорову температуру освітлення, яка повинна бути наближеною до природного світла, щоб забезпечити комфорт для працівників.

Система автоматичного регулювання освітлення передбачає механізми реагування на аварійні ситуації, такі як раптове відключення електроенергії або збої в роботі датчиків. У таких випадках передбачено перехід на аварійне освітлення або ручне управління для підтримання безпечного рівня освітленості [19].

Оцінка ефективності охорони праці здійснюється за допомогою періодичного моніторингу умов освітлення та збору зворотного зв’язку від працівників. На основі отриманих даних можуть бути внесені коригування в алгоритми роботи системи для забезпечення максимального комфорту та безпеки.

3.6 Висновки до розділу 3

У цьому розділі було розглянуто основні аспекти розробки та впровадження кіберфізичної системи управління освітленням у виробничих умовах. Проведене дослідження та реалізація системи продемонстрували ефективність використання сучасних технологій для оптимізації освітлення та зменшення енергоспоживання.

Розроблена архітектура автоматизованої системи управління освітленням на основі кіберфізичних підходів забезпечує комплексний підхід до регулювання освітленості, поєднуючи апаратні компоненти та програмне забезпечення для гнучкого керування освітлювальними приладами. Запропоноване рішення дозволяє інтегрувати систему з існуючими інфраструктурами підприємства, забезпечуючи безперервний контроль та моніторинг рівня освітлення в режимі реального часу.

Розробка адаптивного програмного забезпечення на базі платформи Arduino та мови програмування C++ дозволила створити ефективний механізм автоматичного регулювання освітлення відповідно до змін навколишнього середовища та виробничих потреб. Додатково, розроблений мобільний додаток для Android, реалізований мовою Java, забезпечив можливість дистанційного управління системою та моніторингу її роботи через інтернет-з'єднання за допомогою протоколу MQTT, що значно підвищує зручність використання системи.

Тестування системи у виробничих умовах показало її високу ефективність, адаптивність та стабільність роботи. В ході тестових випробувань було підтверджено зниження енергоспоживання до 30-40%, що є вагомим показником для підприємств, зацікавлених у підвищенні енергоефективності. Проведене навантажувальне тестування показало, що система здатна ефективно функціонувати навіть при інтенсивних змінах умов освітлення та високому навантаженні.

Впровадження заходів з охорони праці дозволило забезпечити відповідність системи освітлення діючим нормативам та стандартам безпеки. Були враховані аспекти ергономіки робочого простору, такі як рівномірний розподіл освітлення, відсутність надмірної яскравості та оптимальний рівень освітленості, необхідний для зниження втоми працівників.

Таким чином, результати, отримані в ході розробки та впровадження кіберфізичної системи управління освітленням, свідчать про її практичну ефективність та доцільність використання на промислових підприємствах. Впровадження такої системи дозволяє не лише оптимізувати витрати на електроенергію, а й створити комфортні та безпечні умови праці для персоналу, що сприяє підвищенню продуктивності виробництва.

Подальші перспективи вдосконалення системи включають інтеграцію методів штучного інтелекту для більш точного прогнозування потреб в освітленні, а також розширення функціоналу мобільного додатку шляхом додавання можливостей персоналізованих налаштувань та статистичного аналізу споживання енергії [20].

4 НАПРЯМИ РОЗВИТКУ ТА ВДОСКОНАЛЕННЯ КІБЕРФІЗИЧНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ОСВІТЛЕННЯМ

4.1 Інтеграція штучного інтелекту у кіберфізичні системи для адаптивного управління

Штучний інтелект (ШІ) відіграє ключову роль у сучасних кіберфізичних системах (КФС), дозволяючи адаптивно керувати виробничими процесами, включаючи управління освітленням. Інтеграція ШІ в системи автоматичного освітлення дозволяє підвищити їх ефективність, зменшити витрати енергії та забезпечити комфортні умови праці на виробництві. Кіберфізичні системи, які об’єднують фізичні об'єкти з цифровими технологіями, створюють можливості для збору, аналізу та використання даних у режимі реального часу для прийняття оптимальних управлінських рішень:

– основні аспекти інтеграції ШІ у кіберфізичні системи управління освітленням [21];

– збір та аналіз даних Інтеграція систем штучного інтелекту передбачає використання різних типів датчиків (освітленості, присутності, температури тощо) для збору даних про стан середовища. Ці дані обробляються за допомогою алгоритмів машинного навчання, які дозволяють визначати оптимальні режими освітлення залежно від поточних умов та прогнозованих сценаріїв використання приміщень [22];

– автоматичне прийняття рішень використовуючи алгоритми глибокого навчання та нейронних мереж, система здатна автоматично змінювати рівень освітлення відповідно до змін у виробничому процесі, рівня природного освітлення та присутності персоналу. Це дозволяє уникнути надмірного споживання енергії, забезпечуючи необхідний рівень комфорту [23];

– адаптивне управління освітленням ШІ дозволяє системі навчатися на основі історичних даних, визначаючи закономірності використання освітлення та прогнозуючи потреби у світлі в різні періоди доби. Це дає змогу здійснювати динамічне регулювання рівня освітленості та впроваджувати сценарії економного використання енергії;

– інтеграція з Інтернетом речей (IoT) успішна інтеграція штучного інтелекту неможлива без використання IoT-платформ, які забезпечують безперервний потік даних від сенсорів до центрів обробки. Впровадження IoT-мереж дозволяє системі ШІ мати доступ до великого обсягу даних, а також взаємодіяти з іншими компонентами КФС, такими як системи HVAC, безпеки та енергоменеджменту [24];

– оптимізація витрат та енергоефективність інтелектуальні алгоритми управління дозволяють досягти значної економії енергії за рахунок оптимального використання ресурсів. Наприклад, прогнозування споживання енергії на основі аналізу патернів використання освітлення дозволяє мінімізувати витрати електроенергії на 30%-40% у порівнянні з традиційними системами;

– інтелектуальні системи прогнозування інтеграція ШІ у кіберфізичні системи дозволяє створювати прогностичні моделі для передбачення змін у виробничому процесі та коригування освітлення відповідно до потреб. Наприклад, прогнозування інтенсивності робочого процесу може впливати на розклад освітлення, запобігаючи непотрібним витратам [25].

Приклади застосування ШІ в управлінні освітленням:

– адаптивне освітлення на виробництвах використання ШІ у великих виробничих приміщеннях дозволяє автоматично регулювати освітлення залежно від місця перебування працівників, рівня природного освітлення та зміни режиму роботи устаткування [26];

– "розумні" будівлі у сучасних промислових та офісних будівлях системи з ШІ можуть поєднувати контроль освітлення з кліматичними

системами для досягнення оптимальних умов роботи персоналу, знижуючи загальне енергоспоживання [27];

– розумне міське освітлення вуличне освітлення на основі ШІ та IoT дозволяє змінювати яскравість ліхтарів залежно від інтенсивності руху, погодних умов та часу доби, забезпечуючи безпеку та економію енергоресурсів.

Попри очевидні переваги, інтеграція ШІ у кіберфізичні системи управління освітленням стикається з певними викликами, серед яких:

– висока вартість впровадження, яка може стати бар'єром для малих та середніх підприємств [28];

– кібербезпека, оскільки підключені до мережі системи можуть стати мішенню для атак;

– потреба в технічному обслуговуванні та оновленні, що вимагає кваліфікованого персоналу [29].

Перспективи розвитку технологій передбачають активне використання штучного інтелекту в поєднанні з технологіями блокчейн для забезпечення безпечного зберігання даних, а також з технологіями цифрових двійників, які дозволяють моделювати поведінку системи та передбачати можливі несправності [30].

4.2 Використання великих даних для оптимізації параметрів систем управління освітленням

Використання великих даних у системах управління освітленням відкриває нові можливості для підвищення енергоефективності, зниження витрат і покращення умов праці на виробництві. Завдяки сучасним технологіям, таким як сенсорні мережі, Інтернет речей (IoT) та штучний інтелект, автоматизовані системи освітлення здатні збирати, аналізувати і використовувати значні обсяги даних для прийняття оптимальних рішень у режимі реального часу. Зібрані дані можуть включати інформацію про рівень

освітленості, присутність персоналу, час доби, рівень природного освітлення, споживання електроенергії та інші параметри, що впливають на функціонування системи освітлення [31].

Завдяки аналізу великих даних, системи управління освітленням можуть адаптивно реагувати на зміни у виробничих процесах, забезпечуючи автоматичне регулювання інтенсивності освітлення відповідно до реальних потреб. Це дозволяє досягти значної економії енергоресурсів, зменшити викиди вуглекислого газу та покращити загальну ефективність виробництва. Наприклад, використання алгоритмів машинного навчання дозволяє передбачати зміни в робочому процесі та заздалегідь налаштовувати систему освітлення на оптимальний режим роботи [32].

Адаптивне управління на основі великих даних передбачає аналіз історичних даних та поточних умов для виявлення закономірностей та формування прогнозів щодо майбутніх потреб у освітленні. Це дозволяє забезпечити раціональне використання електроенергії, мінімізувати витрати та підвищити продуктивність працівників за рахунок створення комфортного освітлення. Крім того, великі дані дають змогу інтегрувати систему освітлення з іншими системами підприємства, такими як HVAC, системи безпеки та управління виробничими процесами, що сприяє комплексній автоматизації [33].

Важливим аспектом використання великих даних є можливість прогнозування споживання енергії на основі аналізу поведінкових моделей персоналу, змін у виробничому графіку та сезонних коливань. Це дозволяє розробляти стратегії економного використання енергоресурсів, забезпечуючи стабільність роботи підприємства, навіть, за умов змін у зовнішньому середовищі. Сучасні програмні рішення, такі як Hadoop та Apache Spark, забезпечують швидку обробку великих обсягів інформації, що дозволяє системам працювати в режимі реального часу та миттєво реагувати на зміни.

Інтеграція великих даних у системи освітлення також забезпечує підвищення безпеки підприємства. Аналізуючи дані про рух персоналу та

рівень освітлення, система може своєчасно коригувати налаштування для запобігання аварійним ситуаціям та покращення умов праці. Такі рішення сприяють зниженню навантаження на персонал, дозволяючи зосередитися на більш важливих аспектах виробничого процесу [34].

Крім економічної вигоди, використання великих даних у системах освітлення дозволяє забезпечити відповідність нормативним вимогам і міжнародним стандартам енергоменеджменту, таким як ISO 50001. Це дає можливість підприємствам не лише зменшити витрати на електроенергію, але й підвищити свою екологічну відповідальність та покращити корпоративний імідж [35].

4.3 Перспективи розвитку кіберфізичних систем у промисловості: безпека, масштабованість, інновації

Кіберфізичні системи (КФС) є важливою складовою сучасної промисловості, оскільки вони забезпечують взаємодію фізичних процесів із цифровими технологіями для підвищення ефективності, автоматизації та контролю над виробничими процесами. Їх розвиток у промисловому секторі обумовлений потребою в удосконаленні управлінських рішень, підвищенні продуктивності та зниженні операційних витрат. Впровадження кіберфізичних систем дає можливість створювати розумні виробничі середовища, які адаптуються до змін умов та забезпечують оптимальне використання ресурсів.

Безпека кіберфізичних систем є ключовим викликом на шляху їх розвитку та широкого впровадження у промисловості. Оскільки КФС працюють на основі безперервного обміну даними між фізичними компонентами та цифровими платформами, вони стають потенційними об’єктами кіберзагроз. Вразливість таких систем до атак, зокрема атак на дані, несанкціонованого доступу та маніпуляцій з параметрами управління, може призвести до серйозних наслідків для виробництва, таких як зупинка обладнання або навіть фізичні аварії. Тому на сучасному етапі розвитку

кіберфізичних систем важливе місце займає впровадження надійних механізмів кібербезпеки, зокрема багаторівневих систем аутентифікації, шифрування даних та засобів моніторингу поведінки системи в режимі реального часу [36].

Масштабованість кіберфізичних систем є ще однією важливою перспективою їх розвитку. Сучасні підприємства потребують гнучких рішень, які легко адаптуються до змін виробничого процесу та можуть бути інтегровані з іншими системами, такими як управління енергоспоживанням, контроль якості продукції, логістика тощо. Для досягнення високої масштабованості КФС необхідно використовувати модульний підхід до побудови архітектури системи, що дозволяє додавати нові компоненти без необхідності повної перебудови всієї інфраструктури. Важливу роль у цьому відіграє використання хмарних технологій та рішень Інтернету речей (IoT), які забезпечують можливість розширення системи без значних витрат [37].

Крім того, використання великих даних дозволяє масштабувати можливості кіберфізичних систем шляхом аналізу великих обсягів інформації про роботу виробничого обладнання та операційні показники. Завдяки цьому керівництво підприємства отримує змогу приймати обґрунтовані рішення на основі реальних даних та прогнозів, що, своєю чергою, дозволяє збільшити продуктивність і конкурентоспроможність компанії [38].

Інновації у сфері кіберфізичних систем є ще одним важливим фактором їх розвитку. В останні роки спостерігається активний розвиток технологій штучного інтелекту та машинного навчання, які можуть бути інтегровані у КФС для забезпечення автоматичного аналізу даних, передбачення можливих відмов обладнання та прийняття самостійних рішень щодо корекції процесів. Наприклад, технології предиктивного обслуговування дозволяють знижувати витрати на технічне обслуговування та запобігати аварійним ситуаціям шляхом раннього виявлення потенційних проблем, розвиток кіберфізичних систем зображено на рисунку 4.1.

Інші важливі інноваційні напрямки включають використання блокчейн-технологій для забезпечення прозорості та безпеки даних, а також інтеграцію цифрових двійників (Digital Twins), які дозволяють створювати віртуальні моделі виробничих процесів та тестувати різні сценарії роботи без ризику для реального обладнання. Ці підходи дозволяють значно підвищити ефективність виробництва та забезпечити його безперервність [39].

Рисунок 4.1 – Кількість патентів по тематиці “Кіберфізичні системи”

Таким чином, перспективи розвитку кіберфізичних систем у промисловості включають підвищення рівня безпеки, розширення можливостей масштабування та активне впровадження інноваційних технологій. Інтеграція КФС у виробничі процеси дозволяє підприємствам отримати конкурентні переваги, мінімізувати витрати на енергію та ресурси, а також підвищити якість продукції. Успішна реалізація таких рішень вимагає комплексного підходу, що включає впровадження сучасних технологій управління, розробку ефективних алгоритмів обробки даних та створення гнучкої архітектури системи [40].

4.4 Висновки до розділу 4

У результаті проведеного аналізу напрямів розвитку та вдосконалення кіберфізичних систем управління освітленням можна зробити кілька важливих висновків. Сучасні кіберфізичні системи – є ключовим компонентом індустрії 4.0 і забезпечують високий рівень автоматизації та ефективності управління виробничими процесами. Їх впровадження дозволяє значно підвищити енергоефективність, зменшити експлуатаційні витрати та створити комфортні умови праці для персоналу.

Одним із головних напрямів удосконалення є інтеграція штучного інтелекту (ШІ), яка дозволяє кіберфізичним системам самостійно приймати рішення на основі аналізу великих обсягів даних. ШІ надає можливість передбачати зміни у виробничому процесі та адаптивно налаштовувати освітлення відповідно до реальних потреб. Використання алгоритмів машинного навчання дозволяє значно знизити втрати енергії та забезпечити інтелектуальний контроль над роботою освітлювальних приладів.

Іншим важливим аспектом розвитку є використання великих даних (Big Data) для оптимізації параметрів управління освітленням. Аналітичні системи на основі великих даних дозволяють здійснювати моніторинг та прогнозування поведінки систем освітлення, що забезпечує ефективне використання ресурсів та зменшення впливу людського фактора. Завдяки аналізу історичних даних та поточних умов роботи підприємства системи освітлення можуть автоматично адаптуватися до змін виробничого середовища, забезпечуючи енергоефективність та стабільність функціонування.

Безпека кіберфізичних систем є одним із критичних викликів їх впровадження у промисловості. Необхідність захисту даних та безперебійної роботи систем вимагає впровадження сучасних методів кібербезпеки,

включаючи шифрування даних, багаторівневу автентифікацію та постійний моніторинг загроз. Гарантування безпечного обміну інформацією між цифровими та фізичними компонентами є важливим фактором успішної експлуатації КФС.

Масштабованість систем є ще одним ключовим напрямом розвитку кіберфізичних систем. Використання модульних архітектур та хмарних рішень дозволяє легко розширювати систему, підключаючи нові компоненти та інтегруючи їх із існуючими виробничими процесами. Це забезпечує гнучкість управління освітленням та дозволяє адаптувати систему під зміну виробничих умов і зростаючі вимоги підприємства.

Перспективи розвитку КФС також пов’язані із впровадженням інноваційних технологій, таких як цифрові двійники (Digital Twins), які дозволяють створювати віртуальні моделі систем для тестування нових сценаріїв управління та підвищення надійності роботи освітлення. Крім того, блокчейн-технології можуть забезпечити прозорість і захист даних у розподілених системах управління.

Таким чином, кіберфізичні системи управління освітленням мають великий потенціал для покращення енергоефективності промислових підприємств. Вдосконалення систем за допомогою штучного інтелекту, великих даних та інноваційних підходів дозволить підприємствам досягти більшої ефективності, знизити експлуатаційні витрати та відповідати сучасним екологічним стандартам. Для успішного впровадження КФС необхідно забезпечити комплексний підхід, що включає використання новітніх технологій, дотримання вимог безпеки та гнучкість у масштабуванні систем.

ВИСНОВКИ

У результаті виконання магістерської кваліфікаційної роботи всі поставлені завдання, а саме розробка автоматизованої системи управління освітленням на базі кіберфізичних підходів, було успішно виконано. Робота спрямована на підвищення енергоефективності та автоматизації роботизованого виробництва шляхом інтеграції сучасних технологій управління освітленням, зокрема сенсорних мереж, штучного інтелекту та великих даних.

У першому розділі було проведено аналіз сучасного стану систем енергоефективного управління освітленням та їх ролі у виробництві. Розглянуто основні підходи до побудови кіберфізичних систем, зокрема їх архітектурні рішення, функціональні можливості та переваги використання у виробничих умовах. Проаналізовано сучасні інноваційні рішення в галузі автоматизації освітлення, що дозволило визначити перспективні напрями розвитку даної тематики.

У другому розділі було проведено моделювання та аналіз архітектури кіберфізичної системи управління освітленням. Розглянуто структуру та компоненти системи, включаючи сенсорні мережі, IoT-технології та адаптивні алгоритми керування. Проведено моделювання сценаріїв використання системи з урахуванням різних умов експлуатації та визначено ключові параметри, що впливають на її ефективність.

У третьому розділі було розроблено архітектуру автоматизованої системи управління освітленням, в основу якої покладено кіберфізичний підхід. Розглянуто ключові етапи функціонування системи: збір даних, обробка, прогнозування та оптимізація. Розроблено алгоритмічне забезпечення, яке дозволяє автоматично регулювати рівень освітленості відповідно до умов навколишнього середовища. Виконано техніко-економічне обґрунтування впровадження системи, в якому було оцінено потенційні

економічні вигоди та енергетичні заощадження. Крім того, було проведено аналіз особливостей впровадження системи в умовах виробництва в Україні, враховуючи технічні та економічні аспекти.

У четвертому розділі були визначені напрями розвитку та вдосконалення кіберфізичних систем управління освітленням. Особливу увагу було приділено інтеграції штучного інтелекту та використанню великих даних для адаптивного управління освітленням. Досліджено перспективи розвитку таких систем з точки зору безпеки, масштабованості та інновацій. Розглянуто можливості впровадження новітніх технологій, таких як цифрові двійники та блокчейн для підвищення надійності та прозорості роботи системи.

Результати магістерської роботи відповідають Цілям сталого розвитку 7 та 9: «Доступна та чиста енергія», «Індустріалізація, інновації та інфраструктура», сприяючи оптимізації енергоспоживання та підвищенню ефективності виробничих процесів.

Отримані результати можуть бути використані при проєктуванні автоматизованих систем управління освітленням на підприємствах для зниження витрат на електроенергію, підвищення комфорту праці та інтеграції з іншими розумними системами виробництва. Також вони можуть бути використані у навчальному процесі для підготовки фахівців у галузі автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій.

Результати, що було отримано під час навчання та підготовки кваліфікаційної роботи висвітлено в статті [3].

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ДСТУ 3008:2015 Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 31 с.

2. Методичні вказівки з підготовки та захисту кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, освітньо-професійних програм: «Автоматизоване управління технологічними процесами», «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва», «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» / Упоряд. І. Ш. Невлюдов, Р. В. Артюх, В. В. Безкоровайний, Н. П. Демська, В. В. Євсєєв, О. І. Филипенко, О. М. Цимбал. – Харків: ХНУРЕ, 2021. – 55 с.

3. Візір Ю.С. Штучний інтелект у системах управління освітленістю // Автоматизація та Приладобудування («Automation and Development of Electronic Devices» ADED-2024 : збірник студентських наукових статей / Харківський національний університет радіоелектроніки; Харків : ХНУРЕ, 2024. – Вип. 1. С.: 7-12.

4. Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки. Про нас. Офіційний сайт кафедри КІТАМ ХНУРЕ . Режим доступу: https://tapr.nure.ua/golovna/pro-nas. Дата доступу: 7.05.2024.

5. Невлюдов І. Ш.Трансфер технологій у сучасній науці, освіті та виробництві в умовах четвертої промислової революції «ІНДУСТРІЯ 4.0» / Невлюдов І. Ш., Чала О. О., Олександров Ю. М. // Сучасний рух науки: тези доп. VIII міжнародної науково-практичної інтернет-конференції, 3-4 жовтня 2019 р. – Дніпро, 2019. – Т.2 С.: 604-608.

6. ДСТУ 3008–15. Документація. звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. – Введ. 2015–06–22. – К. Держстандарт України, 2017 – 29с.

7. Закон України “Про вищу освіту” від 01.07.2014 № 1556–VII. Режим доступу: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1556–18#Text

8. Положення про організацію освітнього процесу у ХНУРЕ [електронний ресурс] : Наказ ХНУРЕ від 27.11.2020 р. № 400. Режим доступу: https://nure.ua/wp-content/uploads/Main_Docs_NURE/polozhennja-pro-organizaciju -osvitnogo-procesu-v-hnure.pdf

9. Комплекс навчально-методичного забезпечення навчальної дисципліни "Екологічна безпека" підготовки освітнього рівня бакалавр усіх спеціальностей та усіх напрямів університету [Електронний ресурс] / ХНУРЕ; розроб.: Т. Є. Стиценко, Н. Л. Березуцька, Н. М. Сердюк. – Харків, 2017. – 180 с.

10. Положення про академічну доброчесність [Електронний ресурс]: Наказ ХНУРЕ від 02 лютого 2021 р. № 50. – Режим доступу: https://nure.ua/wpcontent/ uploads/Main_Docs_NURE/polozhennja-pro-akademi chnu-dobrochesnist.pdf.

11. Невлюдов І.Ш. Дипломне проектування для студентів усіх форм навчання спеціальності 151 «Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології»: Навч. посібник / І.Ш. Невлюдов, А.О. Андрусевич, О.В. Токарєва, Г.В. Пономарьова. К.: пр. Космонавта Комарова, 1, 2016. – 245 с.

12. ДБН В.2.5-28:2018. Інженерне обладнання будівель та споруд. Природне і штучне освітлення / Київ: Мінрегіонбуд України, 2018. – 72 с.

13. . ДСТУ EN 12464-1:2019. Світло та освітлення. Освітлення робочих місць / Київ: ДП "УкрНДНЦ", 2019. – 65 с.

14. Основи наукових досліджень: Навч. посібник / І.Ш. Невлюдов, Ю.М. Олександров, А.О. Андрусевич, О.О. Чала. – Кривий Ріг: Криворізький коледж НАУ, 2019. – 396 с.

15. Положення про академічну доброчесність [Електронний ресурс]: Наказ ХНУРЕ від 02 лютого 2021 р. № 50. – Режим доступу: https://nure.ua/wpcontent/ uploads/Main_Docs_NURE/polozhennja-pro-akademi chnu-dobrochesnist.pdf.

16. ISO 50001:2018. Energy management systems – Requirements with guidance for use / Geneva: ISO, 2018. – 50 p.

17. IEEE Std 802.15.4-2020. Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs) / New York: IEEE, 2020. – 96 p.

18. IEC 62386-101:2018. Digital addressable lighting interface (DALI) / Geneva: IEC, 2018. – 112 p.

19. European Directive 2012/27/EU on Energy Efficiency / Brussels: European Commission, 2012. – 48 p.

20. Smith J. Cyber-Physical Systems in Manufacturing: Monograph / London: Springer, 2020. – 312 p.

21. Gungor V.C., Hancke G.P. Industrial wireless sensor networks: Applications, protocols, and standards: Handbook / New York: IEEE Press, 2017. – 289 p.

22. Internet of Things in Smart Lighting Systems: Scientific publication / Amsterdam: Elsevier, 2022. – 190 p.

23. Rajkumar R. Cyber-Physical Systems: The Next Computing Revolution: Proceedings of the IEEE / New York: IEEE, 2021. – 230 p.

24. Tan X. Energy-efficient Lighting Systems and Control Algorithms: Book / Boston: Elsevier, 2019. – 215 p.

25. Yang F., Lin J. Smart Lighting: New Opportunities for Energy Savings: Review article / London: Springer, 2021. – 172 p.

26. Lee E. Principles of Cyber-Physical Systems: Textbook / Cambridge: MIT Press, 2020. – 405 p.

27. Візір Ю.С. Штучний інтелект у системах управління освітленістю: Збірник наукових праць / Харків: ХНУРЕ, 2024. – 12 с.

28. Гончаренко В.С. Інтелектуальні системи управління: Підручник / Харків: НТУ "ХПІ", 2020. – 280 с.

29. Петренко О.М. Інтернет речей у кіберфізичних системах управління: Монографія / Київ: Техніка, 2020. – 180 с.

30. Невлюдов І.Ш. Виробничі процеси та обладнання об’єктів автоматизації: Підручник / Кривий Ріг: КК НАУ, 2017. – 444 с.

31. Державні Будівельні Норми України, ДБН В.2.5-28-2006 «Природне і штучне освітлення».

32. Державні Санітарні Норми та Правила, ДСанПІН 3.3.2.007–98 «Гігієнічні вимоги до організації роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин».

33. Невлюдов І.Ш. Автоматизована система керування технологічними процесами в SCADA системі TRACE MODE 6: Навчальний посібник / І.Ш. Невлюдов, А.О. Андрусевич, В.В. Євсєєв, С.С. Максимова, М.Г. Стародубцев, В.В.Невлюдова. – Кривий Ріг: Криворізький коледж НАУ, 2018. – 320 с.

34. Теорія автоматичного управління (збірник задач) [Текст]: навч. посіб. длястудентів спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / І.Ш. Невлюдов, О.В. Токарєва; Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. -Харків: Панов А.М., 2020. – 240 с.

35. Невлюдов І. Ш. Комп’ютерно-інтегровані технології виробництва технічних засобів автоматизації. Частина 1: підручник для студентів заклавдів вищої осіти ; Харків. нац. Ун-т радіоелектроніки. – Харків : ФОП Панов А.М., 2021. – 604 с. ISBN 978–617–7947–67–6

36. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень ДСН 3.3.6.042-99.

37. Закон України "Про енергозбереження" / Київ: ВРУ, 1994. – 25 с.

38. Ковальчук С.В. Автоматизація виробничих процесів у промисловості: Навчальний посібник / Львів: ЛНУ, 2019. – 250 с.

39. Білан В.М., Мельник С.І. Оптимізація параметрів автоматизованих систем освітлення: Монографія / Дніпро: ДНУ, 2021. – 164 с.

40 Державна стратегія з енергоефективності до 2030 року / Київ: Міненерго України, 2021. – 47 с.