МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Таврійський національний університет
імені В.І. Вернадського
Навчально-науковий інститут муніципального управління
та міського господарства
Кафедра інженерних систем та технологій

На правах рукопису

Кваліфікаційна робота на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр»

АДАПТИВНА СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ОСВІТЛЕННЯМ НА БАЗІ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ

Здобувача вищої освіти
Кузьменко Дениса Олександровича
Освітня програма
«Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
(Спеціальність
174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»)

_____
(підпис)

Науковий керівник:
д.т.н., професор Медведєв М.Г.

_____
(підпис)

Національна шкала_____
Кількість балів_____
Оцінка: ECTS

Київ – 2026

Таврійський національний університет імені В. І. Вернадського
Навчально-науковий інститут муніципального управління
та міського господарства
Кафедра Інженерних систем та технологій
Освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавр
Спеціальність 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Завідувач кафедри
_____Наталія ОМЕЦИНСЬКА
«____» _____2025_року

ЗАВДАННЯ
НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Кузьменко Дениса Олександровича

1. Тема роботи: Адаптивна система автоматичного керування освітленням на базі сенсорної мережі

керівник роботи: _д.т.н., професор Медведєв М.Г._____

затверджені Наказом ТНУ імені В.І Вернадського:
від «7 » листопада 2025 № 138/1-ОД

2. Строк подання студентом роботи: 25.03.2026

3. Вихідні дані до роботи: Об'єкт автоматизації – житлове приміщення площею 50 кв. м; апаратна платформа – мікрокомп'ютер Raspberry Pi 4; сенсорна база – цифрові люксметри TSL 2561 (I²C) та PIR-датчики руху; виконавчі механізми – 4-канальний модуль реле та LED-лампи (12 Вт).

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки: Проаналізувати існуючі системи, технології та методи оптимізації енергоспоживання автоматизованого керування освітленням; Обґрунтувати вибір апаратної бази та спроєктувати апаратно-програмний комплекс адаптивної системи на основі мікрокомп'ютера Raspberry Pi і сенсорної мережі; Розробити принципові електричні схеми підключення та алгоритмічне забезпечення для різних режимів роботи системи; Опрацювати вимоги з охорони праці та розробити заходи безпеки при виникненні надзвичайних ситуацій під час експлуатації комплексу.

5. Перелік графічного матеріалу: графічна робота виконана у вигляді мультимедійної презентації

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	професор Микола МЕДВЕДЄВ		
Розділ 2	професор Микола МЕДВЕДЄВ		
Розділ 3	професор Микола МЕДВЕДЄВ		
Розділ 4	професор Микола МЕДВЕДЄВ		

7. Дата видачі завдання _____ 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	*Назва етапів бакалаврської роботи*	*Термін виконання етапів роботи*	*Заключний документ етапу*
1	Вибір теми бакалаврської роботи, призначення керівника	до 31.10.2025	Затвердження переліку тем бакалаврських робіт
2	Пошук і відбір літератури по темі роботи, складання плану бакалаврської роботи	до 14.12.2025	Список літературних джерел, план роботи
3	Визначення об’єкта, предмета, мети, завдань та методів дослідження, написання вступу до теми бакалаврського дослідження	до 25.01.2026	Текст вступу
4	Написання тексту бакалаврської роботи відповідно до її структури:	26.01.2026-17.05.2026	Текст розділів
	4.1 I розділ	26.01.2026-6.03.2026	Текст розділу
	4.2 II розділ	9.03.2026-27.03.2026	Текст розділу
	4.3 III розділ	30.03.2026-17.04.2026	Текст розділу
	4.4 IV розділ	20.04.2026-8.05.2026	
5	Підготовка графічних матеріалів чи іншого унаочнення	11.05.2026-15.05.2026	Роздатковий матеріал, презентація
6	Оформлення кінцевого списку використаних джерел та додатків	11.05.2026-15.05.2026	Список літературних джерел
7	Оформлення та попередній захист бакалаврської роботи	18.05.2026-22.05.2026	Бакалаврська робота, рішення кафедри про допуск до захисту
8	Внесення коректив та кінцеве редагування бакалаврської роботи	25.05.2026-29.05.2026	Бакалаврська робота
9	Реєстрація бакалаврської роботи на кафедрі	1.06.2026-5.06.2026	Бакалаврська робота внесена до журналу реєстрації випускових робіт
10	Захист бакалаврської роботи	10.06.2026-28.06.2026	Рішення Екзаменаційної комісії про захист

ЗМІСТ

ВСТУП……..07
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ СИСТЕМ ТА ТЕХНОЛОГІЙ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ОСВІТЛЕННЯМ……10
1.1 Аналіз існуючих систем керування освітленням у будинках ……..10
1.2 Огляд методів оптимізації енергоспоживання в системах освітлення за допомогою автоматизованих комплексів ……14
1.3 Використання датчиків руху та освітленості в сучасних системах автоматизації ……...18
1.4 Переваги та недоліки використання апаратної платформи Raspberry Pi для автоматизації освітлювальних мереж ……...23
Висновки до розділу 1 ……28
РОЗДІЛ 2 ПРОЄКТУВАННЯ АПАРАТНО-ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ОСВІТЛЕННЯМ……...30
2.1 Центральний мікропроцесорний вузол керування автоматизованою системою освітлення ……..30
2.2 Проєктування апаратної архітектури та комплексне обґрунтування вибору елементної бази системи автоматичного регулювання освітленості ……34
2.3 Розробка принципових електричних схем сполучення компонентів автоматизованого комплексу керування освітленням ……41
2.4 Характеристики та аналіз протоколів передачі даних у системі автоматизованого регулювання освітлення ……46
2.5 Проєктування базових та спеціалізованих режимів роботи автоматизованої системи ……51
Висновки до розділу 2 ……...56
РОЗДІЛ 3 МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АДАПТИВНОЇ СИСТЕМИ ОСВІТЛЕННЯ……..58
3.1 Моделювання та результат дослідження автоматизованої системи освітлення ……58
3.2 Результати емпіричного дослідження автоматизованої системи освітлення ……69
Висновки до розділу 3 ……75
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ……77
4.1 Охорона праці ……...77
4.2 Безпека в надзвичайних ситуаціях ……..80
Висновки до розділу 4 ……83
ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК……84
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ……86

АНОТАЦІЯ

Кузьменко Д. О. Адаптивна система автоматичного керування освітленням на базі сенсорної мережі. – Рукопис. Кваліфікаційна бакалаврська робота за спеціальністю 174 "Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка". – Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського, Київ, 2026 рік.

У бакалаврській кваліфікаційній роботі досліджено сучасні технології автоматизації освітлювальних мереж, розроблено та реалізовано концепцію інтелектуальної адаптивної системи керування освітленням для інфраструктури «розумного будинку». Запропоновано апаратну архітектуру комплексу на базі мікрокомп'ютера Raspberry Pi 4 , з використанням цифрових люксметрів і піроелектричних датчиків руху. Розроблено алгоритмічне забезпечення для п'яти режимів роботи , виконано комп'ютерне моделювання та експериментальні випробування. Аналіз результатів показав радикальне зниження енергоспоживання понад 70 відсотків у порівнянні з традиційними системами. Практичне значення полягає у можливості безпосереднього впровадження розробленої системи для підвищення енергоефективності та експлуатаційного комфорту приватних житлових будинків і комерційних об'єктів.

Об’єкт дослідження – автоматизована система керування освітлювальними приладами, призначена для інтеграції в середовище «розумного будинку», яка функціонує на базі інформації від сенсорів присутності (руху) та рівня освітленості.

Предмет дослідження – сукупність технічних, експлуатаційних та енергетичних параметрів розробленої автоматизованої системи керування, які в комплексі забезпечують стабільне зниження обсягів споживання електроенергії завдяки застосуванню алгоритмів адаптивного управління.

Мета роботи – комплексне дослідження, розробка та проєктування інтелектуальної автоматизованої системи керування освітленням, орієнтованої на використання в інфраструктурі «розумного будинку».

Методи дослідження – системний аналіз, комп’ютерне моделювання, експериментальне (емпіричне) дослідження, математичні розрахунки енергоефективності.

Ключові слова: адаптивне освітлення, розумний будинок, автоматизована система керування, сенсорна мережа, енергоефективність, мікрокомп'ютер Raspberry Pi, датчик руху, датчик освітленості, Інтернет речей (IoT).

ABSTRACT

Kuzmenko D. O. Adaptive automatic lighting control system based on a sensor network. – Manuscript. Qualification bachelor's thesis in specialty 174 "Automation, computer-integrated technologies and robotics". – V.I. Vernadsky Tavrichesky National University, Kyiv, 2026.

In the bachelor's qualification work, modern technologies for automation of lighting networks were investigated, the concept of an intelligent adaptive lighting control system for the "smart home" infrastructure was developed and implemented. The hardware architecture of the complex based on the Raspberry Pi 4 microcomputer, using digital lux meters and pyroelectric motion sensors, was proposed.

Algorithmic support for five operating modes has been developed, computer modeling and experimental testing have been performed. Analysis of the results showed a radical reduction in energy consumption of more than 70 percent compared to traditional systems. The practical significance lies in the possibility of direct implementation of the developed system to increase energy efficiency and operational comfort of private residential buildings and commercial facilities.

The object of research is an automated lighting control system designed for integration into a "smart home" environment, which operates on the basis of information from presence (motion) and light level sensors.

The subject of research is a set of technical, operational and energy parameters of the developed automated control system, which in combination ensure a stable reduction in electricity consumption through the use of adaptive control algorithms.

The purpose of the work is a comprehensive study, development and design of an intelligent automated lighting control system, focused on use in the "smart home" infrastructure.

Research methods are system analysis, computer modeling, experimental (empirical) research, mathematical calculations of energy efficiency.

Keywords: adaptive lighting, smart home, automated control system, sensor network, energy efficiency, Raspberry Pi microcomputer, motion sensor, light sensor, Internet of Things (IoT).

ВСТУП

Стрімкий прогрес у сфері інформаційних технологій та електроніки, а також невпинне зростання уваги світової спільноти до питань раціонального використання енергоресурсів, формують потужне підґрунтя для масштабного впровадження інноваційних інженерних рішень. Це стосується як приватного житлового сектору, так і комерційної нерухомості. Одним із найбільш перспективних векторів розвитку в цій галузі є проєктування та впровадження автоматизованих систем керування освітленням, які виступають фундаментальною складовою сучасної концепції «розумного будинку». Функціонування таких інтелектуальних систем не лише суттєво підвищує рівень ергономічності та побутового комфорту для кінцевих споживачів, а й гарантує радикальне зниження обсягів спожитої електроенергії. Зважаючи на сучасні виклики, це відіграє критично важливу роль для досягнення високих показників економічної доцільності та екологічної безпеки.

На тлі масштабних глобальних програм, спрямованих на підвищення енергоефективності, питання автоматизації освітлювальних приладів набуває безпрецедентної значущості. Згідно з актуальними статистичними даними, частка електроенергії, що витрачається на забезпечення штучного освітлення в житлових і офісних будівлях, може сягати 30 відсотків від загального обсягу енергоспоживання. При цьому вагома частина цих ресурсів втрачається через нераціональне використання: світильники часто залишаються в активному стані в приміщеннях, де відсутні люди, або ж працюють на повну потужність навіть за умови достатньої інтенсивності природного сонячного світла. Ефективним шляхом подолання цієї проблеми є перехід до адаптивного керування освітлювальними мережами. Такий підхід передбачає автоматичне регулювання стану джерел світла в режимі реального часу, спираючись на зовнішні фактори — насамперед, фіксацію присутності користувачів та поточний рівень інсоляції. Завдяки впровадженню подібних алгоритмів, системи автоматизації перетворюються на потужний інструмент енергоощадження, який здатний одночасно підтримувати оптимальний мікроклімат для життєдіяльності та мінімізувати негативний техногенний вплив на навколишнє середовище.

Основною метою цієї кваліфікаційної роботи є комплексне дослідження, розробка та проєктування інтелектуальної автоматизованої системи керування освітленням, орієнтованої на використання в інфраструктурі «розумного будинку». Основою функціонування запропонованої системи є спільна робота високочутливих датчиків виявлення руху та сенсорів рівня освітленості. Очікується, що впровадження такого апаратно-програмного комплексу дозволить суттєво оптимізувати витрати електричної енергії шляхом гнучкого регулювання роботи світлових приладів, чітко реагуючи на присутність осіб у заданій зоні та компенсуючи нестачу природного світла. Таким чином, реалізація мети забезпечить подвійний ефект: вагому економію енергоресурсів та відчутне зростання рівня експлуатаційного комфорту.

Для досягнення поставленої мети в дослідженні передбачено виконання низки взаємопов’язаних завдань. По-перше, необхідно здійснити глибокий аналіз сучасного стану систем автоматизації освітлення, що включає детальний огляд передових технологій, які застосовуються в «розумних будинках», а також вивчення принципів роботи сучасних датчиків руху, освітленості та базових методів керування навантаженням. По-друге, потрібно обґрунтовано вибрати апаратну базу, визначивши найбільш оптимальні електронні компоненти, серед яких специфічні типи сенсорів з відповідними технічними характеристиками, мікроконтролерні пристрої та модулі для передачі даних, які повною мірою задовольнятимуть вимоги інтелектуальної будівлі. По-третє, важливим етапом є розробка ефективних програмних алгоритмів керування, які гарантуватимуть своєчасне та коректне перемикання режимів освітлення на основі безперервного аналізу показників із датчиків та поточного рівня природного світла. Наступним завданням виступає проведення комп'ютерного моделювання робочих процесів спроєктованої системи з метою об'єктивної оцінки її ефективності та розрахунку потенційних обсягів заощадженої електроенергії у порівнянні з класичними схемами освітлення. Зрештою, передбачається ретельне дослідження аспектів експлуатаційної безпеки запропонованих автоматизованих комплексів та формування практичних рекомендацій щодо їх надійного використання, з особливим акцентом на поведінку системи в умовах виникнення надзвичайних

ситуацій.

Об’єктом даної кваліфікаційної роботи виступає безпосередньо автоматизована система керування освітлювальними приладами, призначена для інтеграції в середовище «розумного будинку», яка функціонує на базі інформації від сенсорів присутності (руху) та рівня освітленості.

Предметом дослідження є сукупність технічних, експлуатаційних та енергетичних параметрів розробленої автоматизованої системи керування, які в комплексі забезпечують стабільне зниження обсягів споживання електроенергії завдяки застосуванню алгоритмів адаптивного управління.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у вдосконаленні методів апаратно-програмної інтеграції та подальшій оптимізації спільного використання датчиків руху і освітленості в рамках єдиного комплексу автоматизованого керування світловим середовищем. У роботі набули подальшого розвитку підходи до врахування специфічних особливостей такої сенсорної інтеграції саме для архітектури інтелектуальних систем «розумного будинку». При цьому головний акцент зроблено на досягненні максимально можливих показників енергоефективності шляхом реалізації механізмів високоточного адаптивного керування освітлювальним обладнанням у режимі реального часу.

Практична цінність виконаної роботи визначається тим, що отримані результати, розроблені алгоритми та апаратні рішення можуть бути безпосередньо застосовані під час проєктування та монтажу новітніх систем автоматизації як для приватних житлових будинків, так і для приміщень комерційного призначення. Впровадження запропонованої системи на практиці дозволить не лише суттєво скоротити фінансові витрати на оплату енергоносіїв та значно покращити ергономіку керування освітленням, але й перетворити сучасні будівлі на більш екологічно чисті об'єкти. Окрім приватного сектору, розроблені технічні рішення мають високий потенціал для масштабування та інтеграції в інфраструктуру великих офісних центрів, закладів освіти та різноманітних громадських установ, які орієнтовані на мінімізацію вуглецевого сліду (викидів CO_2) та активно підтримують глобальні ініціативи зі сталого розвитку.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ СИСТЕМ ТА ТЕХНОЛОГІЙ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ОСВІТЛЕННЯМ

1.1 Аналіз існуючих систем керування освітленням у будинках

Організація штучного освітлення відіграє фундаментальну роль у формуванні комфортного, ергономічного та безпечного середовища для життєдіяльності людини. Зі стрімким розвитком та впровадженням концепції «розумного будинку» автоматизація освітлювальних мереж трансформувалася з додаткової опції у базову складову комплексних інженерних рішень, орієнтованих на кардинальне підвищення якості життя. Інтелектуальне керування світлом надає можливість не лише суттєво оптимізувати витрати електричної енергії, але й гнучко адаптувати світлове середовище до поточних потреб мешканців у режимі реального часу. Автоматизовані системи освітлення (АСО) на сьогодні знаходять своє застосування в надзвичайно широкому спектрі об'єктів: від приватних домогосподарств до масштабних комерційних центрів та муніципальних будівель.

Функціонал сучасних АСО є багатогранним і охоплює низку критично важливих завдань. Передусім, це забезпечення автоматичного комутування (вмикання та вимикання) джерел світла, що базується на безперервному зборі й аналізі даних від масиву сенсорних пристроїв, зокрема датчиків присутності, руху та рівня природної інсоляції. Окрім бінарного керування, такі системи здійснюють плавне регулювання інтенсивності світлового потоку (димірування) залежно від мінливих зовнішніх умов. Важливою опцією є також можливість програмування комплексних світлових сценаріїв, які дозволяють миттєво трансформувати атмосферу в приміщенні відповідно до поточної активності користувачів. Більше того, розкриття повного потенціалу АСО неможливе без їх глибокої апаратно-програмної інтеграції з іншими підсистемами розумного будинку, такими як охоронна сигналізація, системи вентиляції та кондиціювання (клімат-контроль), а також мультимедійні комплекси.

Успішність реалізації та безперебійність функціонування таких автоматизованих комплексів прямо залежить від грамотного підбору елементної

бази та протоколів зв'язку. Протягом останніх років у сфері розробки та прототипування АСО значного поширення набули мікропроцесорні платформи сімейств Raspberry Pi, мікроконтролери архітектури Arduino, а також вузькоспеціалізовані промислові контролери. Їх використання відкриває шлях до проєктування економічно рентабельних, легко масштабованих та зручних у параметризації систем керування. Головним завданням даного розділу є здійснення ґрунтовного аналізу наявних на ринку технічних рішень у сфері автоматизації освітлення, дослідження їх топологічних та архітектурних специфік, виявлення сильних і слабких сторін, а також окреслення стратегічних векторів подальшого розвитку цієї високотехнологічної галузі.

Сучасні автоматизовані системи освітлення будуються на базі високопродуктивних мікроконтролерних модулів, високочутливих сенсорів руху та освітленості, а також допоміжних електронних компонентів, що в сукупності формують єдину бездротову або дротову сенсорну мережу розумної будівлі. До базових характеристик таких систем належать високий рівень автоматизації, що дозволяє системі самостійно генерувати керуючі впливи на основі розкладу або тригерів активності. Другим надважливим параметром є енергоефективність, яка досягається шляхом мінімізації марнотратного споживання енергії завдяки алгоритмам динамічного димірування. Третім стовпом є інтеграційна здатність, яка забезпечується підтримкою стандартизованих протоколів передачі даних, таких як Zigbee, Z-Wave або класичний Wi-Fi, що гарантує безшовну комунікацію між різнорідними пристроями. Основні кількісні та якісні показники сучасних систем зведено у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Основні експлуатаційні та технічні параметри сучасних автоматизованих комплексів освітлення

Параметр	Значення
Рівень зниження енергоспоживання	До 30 % порівняно з традиційними схемами освітлення
Швидкодія (час реакції сенсорів)	Від 0,1 до 0,5 секунди
Експлуатаційний ресурс обладнання	До 50 000 годин безперервної роботи
Здатність до системної інтеграції	Висока (сумісність із загальними IoT-платформами)

Класифікація автоматизованих систем освітлення здійснюється за низкою інженерних критеріїв, що дає змогу проєктувальникам підбирати оптимальну архітектуру під конкретні технічні умови об'єкта та специфічні запити замовника. Фундаментальними критеріями поділу є принципи побудови керуючої логіки, глибина системної інтеграції, широта функціоналу та потенціал до масштабування. З точки зору архітектури управління, усі АСО можна розділити на три великі класи: централізовані, децентралізовані (розподілені) та комбіновані (гібридні). Кожна з цих топологій характеризується унікальним балансом переваг та експлуатаційних обмежень.

Централізовані системи відрізняються тим, що вся логіка прийняття рішень зосереджена в єдиному потужному контролері, що значно спрощує глобальний моніторинг та конфігурацію, однак робить систему вразливою до відмов цього головного вузла. На противагу їм, децентралізовані мережі пропонують високий рівень відмовостійкості, оскільки кожен локальний модуль наділений власним мікроконтролером і здатен функціонувати автономно. Гібридні концепції намагаються поєднати найкращі риси обох підходів, забезпечуючи локальну автономність при збереженні глобальної координації. Також АСО диференціюються за рівнем взаємодії з суміжними інженерними мережами. Системи глибокої інтеграції здатні реалізовувати складні багаторівневі сценарії: наприклад, превентивне вмикання чергового освітлення при спрацьовуванні периметральних датчиків системи безпеки. Натомість слабоінтегровані рішення працюють ізольовано і виконують виключно свою пряму функцію.

Сучасний функціонал систем автоматизації давно вийшов за межі простого вмикання лампочок. Передові розробки дозволяють керувати не лише яскравістю, але й колірною температурою та RGB-спектром, підлаштовуючись під біоритми людини. Більше того, найновітніші комплекси активно впроваджують алгоритми штучного інтелекту та машинного навчання, які самостійно вивчають поведінкові патерни користувачів і предиктивно налаштовують освітлення без жодного втручання людини. Не менш критичним показником є модульність системи — здатність інфраструктури безболісно розширюватися шляхом підключення нових датчиків та виконавчих механізмів

без необхідності повної переробки базової архітектури. Порівняльний аналіз ключових переваг та недоліків базових архітектур наведено у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2

Порівняльна характеристика базових архітектур побудови автоматизованих систем керування світлом

Топологія системи	Ключові переваги	Основні недоліки
Централізована	Інтуїтивно зрозуміле налаштування, централізована диспетчеризація	Значні капіталовкладення, вразливість єдиної точки відмови
Децентралізована	Висока відмовостійкість, апаратна незалежність модулів	Ускладнене технічне обслуговування, складність синхронізації
Гібридна (комбінована)	Максимальна гнучкість, чудовий потенціал до масштабування	Висока інженерна складність архітектури та алгоритмів

Апаратна реалізація АСО переважно спирається на надійні мікроконтролерні бази та спеціалізовані процесори зв'язку. Одним із найпопулярніших рішень для побудови бездротових сенсорних мереж у таких системах є використання стеку протоколів Zigbee, який відрізняється низьким енергоспоживанням та здатністю до самоорганізації (mesh-мережі).

Приклад організації обміну даними між компонентами системи на базі такої технології наведено на рисунку 1.1.



Рисунок 1.1 – Структурна схема взаємодії компонентів системи освітлення на базі протоколу Zigbee

Технологічна еволюція елементної бази призвела до появи на ринку ультрачутливих мікроелектронних датчиків. Сучасні детектори руху здатні фіксувати навіть мікрорухи (наприклад, дихання або роботу за комп'ютером), що унеможливлює хибне вимикання світла, тоді як прецизійні люксметри забезпечують ідеально плавне підлаштування яскравості світильників під рівень сонячних променів, що потрапляють у вікно. Ринок АСО наразі переживає етап бурхливого зростання, постійно адаптуючись до нових викликів та запитів споживачів. Безперервна модернізація протоколів передачі даних та мікроконтролерної техніки стимулює розширення меж застосування таких комплексів, перетворюючи їх на справжнє ядро інтелектуальної будівлі, де гармонійно поєднуються комфорт, безпрецедентна енергоефективність та турбота про екологію.

Потужними драйверами цього процесу виступають макроекономічні та соціальні фактори: глобальний тренд на цифровізацію, посилення вимог до екологічних стандартів будівництва та стійке зростання тарифів на енергоносії. Сучасна парадигма сприйняття освітлення кардинально змінилася — відтепер це високотехнологічний інструмент формування персоналізованого простору. Майбутнє систем керування освітленням нерозривно пов'язане з поглибленням їхньої інтеграції в екосистему Інтернету речей (IoT), ширшим використанням нейромережевих алгоритмів для адаптації, переходом на альтернативні джерела живлення для сенсорних вузлів та тотальним впровадженням зручних голосових і жестових інтерфейсів взаємодії. Таким чином, симбіоз досягнень мікроелектроніки, інформаційних технологій та теорії автоматичного керування відкриває нові горизонти для створення повністю автономних, самонавчальних та максимально енергоощадних систем освітлення.

1.2 Огляд методів оптимізації енергоспоживання в системах освітлення за допомогою автоматизованих комплексів

Мінімізація обсягів споживання електричної енергії виступає одним із найпріоритетніших завдань під час проєктування та впровадження сучасних автоматизованих систем освітлення (АСО). Глибока інтеграція передових

мікроелектронних та інформаційних технологій у побутову та промислову інфраструктуру дозволяє не лише з високою точністю керувати світловим середовищем, але й гарантувати безпрецедентний рівень ресурсоощадження. Досягнення максимальної ефективності в житлових комплексах, комерційних офісах та на виробничих об’єктах вимагає комплексного підходу, який базується на одночасному застосуванні низки взаємодоповнюючих методів та алгоритмів оптимізації енергоспоживання.

Фундаментальним методом зниження енерговитрат є впровадження концепції інтелектуального адаптивного керування. Її основою слугує розгалужена мережа сенсорів, що безперервно аналізують стан навколишнього середовища. Зокрема, використання високочутливих інфрачервоних або мікрохвильових датчиків руху та присутності гарантує активацію освітлювальних приладів виключно в ті моменти, коли в контрольованій зоні фізично перебувають люди. Це повністю виключає марнотратне використання електроенергії в порожніх приміщеннях, коридорах чи на сходових клітках. Паралельно з цим, інтеграція датчиків освітленості (люксметрів) дозволяє реалізувати алгоритми збирання денного світла. Суть цього підходу полягає в плавному та безперервному регулюванні вихідної потужності штучних джерел світла пропорційно до кількості природної сонячної інсоляції, що потрапляє в приміщення через вікна. Додатковим рівнем оптимізації є програмування спеціалізованих сценаріїв освітлення («нічний режим», «робоча нарада», «чергове освітлення»), які автоматично встановлюють мінімально необхідний, але комфортний рівень яскравості для конкретного виду діяльності.

Важливою передумовою успішної оптимізації є модернізація апаратної бази, а саме перехід на використання виключно енергоефективного обладнання. Сучасні напівпровідникові світлодіодні (LED) лампи та панелі споживають до 80 відсотків менше електричної енергії порівняно з класичними лампами розжарювання або газорозрядними аналогами, при цьому генеруючи аналогічний або навіть більший світловий потік. Проте ефективна робота світлодіодів в автоматизованих системах вимагає застосування спеціалізованих електронних драйверів. Ці пристрої не лише забезпечують стабілізацію робочого

струму та захист кристалів від перепадів напруги в мережі, але й підтримують протоколи широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) для глибокого та плавного димірування без ефекту мерехтіння.

Окремим напрямком оптимізації є жорстка та динамічна автоматизація хронологічних графіків роботи освітлювальної мережі. Використання програмованих логічних контролерів із вбудованими таймерами реального часу дозволяє примусово знеструмлювати лінії освітлення в чітко задані періоди — наприклад, після офіційного завершення робочої зміни або в нічні години на комерційних об'єктах. Вищою сходинкою цього методу є впровадження астрономічних реле та алгоритмів динамічного управління. У такому випадку система самостійно коригує розклад вмикання та вимикання фасадного чи вуличного освітлення, спираючись на географічні координати об'єкта та щоденні зміни тривалості світлового дня протягом року.

Надзвичайно потужним інструментом енергозбереження в останні роки стала інтеграція систем освітлення в глобальну екосистему Інтернету речей (IoT). Підключення контролерів до хмарних серверів забезпечує користувачам можливість віддаленого моніторингу та управління навантаженням за допомогою мобільних додатків із будь-якої точки світу. Крім того, IoT-платформи дозволяють вести безперервний збір телеметричних даних щодо реального енергоспоживання кожної окремої зони. Глибокий аналіз цієї статистики (Big Data) дає змогу інженерам виявляти приховані неефективні ділянки, оптимізувати налаштування таймерів та сенсорів. Найсучасніші АСО також залучають до роботи алгоритми штучного інтелекту та машинного навчання, які здатні аналізувати поведінкові патерни мешканців чи працівників і предиктивно (на випередження) підлаштовувати роботу системи, мінімізуючи будь-які зайві увімкнення світла.

Для об'єктивної оцінки доцільності модернізації апаратної частини системи необхідно проаналізувати базові параметри різних типів випромінювачів. Порівняння енергоємності, ресурсу роботи та загального коефіцієнта корисної дії дає чітке розуміння економічної переваги твердотільних джерел світла над застарілими технологіями. У таблиці 1.3 наведено розгорнутий аналіз ключових

енергетичних та експлуатаційних показників для найбільш поширених ламп, які використовуються в побутовому та комерційному секторах.

Таблиця 1.3

Порівняльна характеристика енергетичних та експлуатаційних показників базових джерел світла

Тип джерела світла	Споживана електрична потужність (Вт)	Заявлений експлуатаційний ресурс (год)	Орієнтовний рівень енергоефективності (%)
Вакуумна лампа розжарювання	60	1 000	10 %
Компактна люмінесцентна лампа	15	10 000	50 %
Напівпровідникова LED-лампа	8	50 000	90 %

Комплексне застосування вищезазначених методів автоматизації формує потужний синергетичний ефект, який проявляється у низці беззаперечних переваг. Насамперед, досягається радикальна економія енергоресурсів, яка може сягати 50 відсотків і більше виключно за рахунок виключення людського фактора та роботи розумних алгоритмів. Це, у свою чергу, призводить до прямого економічного ефекту — стрімкого зниження фінансових витрат на оплату комунальних рахунків, що пришвидшує термін окупності всієї системи розумного будинку. Крім того, завдяки плавному пуску та роботі світлодіодів на знижених потужностях (димируванню), суттєво зменшується їхня теплова деградація, що на практиці збільшує і без того тривалий термін служби освітлювального обладнання та знижує витрати на технічне обслуговування. Не менш важливою є макроекологічна складова: глобальне зниження попиту на електроенергію прямо пропорційно веде до скорочення викидів парникових газів (зокрема вуглекислого газу CO_2) електростанціями. Підсумовуючи, можна стверджувати, що оптимізація енергоспоживання через впровадження датчиків руху, сенсорів інсоляції, LED-технологій та IoT-інтеграції є не просто економічно вигідним кроком, а єдино правильним вектором розвитку сучасної інженерної інфраструктури, що поєднує в собі високий рівень комфорту та

відповідальне ставлення до навколишнього середовища.

1.3 Використання датчиків руху та освітленості в сучасних системах автоматизації

Сенсорні пристрої, зокрема детектори руху та вимірювачі рівня інсоляції, виступають фундаментальними елементами збору первинної інформації в сучасних автоматизованих системах освітлення (АСО). Їх головне призначення полягає у забезпеченні мікроконтролерного ядра системи достовірними даними для реалізації алгоритмів інтелектуального керування світловим обладнанням. Завдяки впровадженню цих первинних перетворювачів, інженерні комплекси набувають здатності автономно та миттєво реагувати на будь-які флуктуації зовнішнього середовища або зміни умов усередині приміщення. Це не лише кардинально підвищує загальну енергетичну ефективність експлуатації освітлювальних приладів і гарантує високий рівень візуального комфорту для користувачів, але й сприяє радикальному зниженню споживання дефіцитних енергоресурсів, що є критично важливим завданням у сучасних реаліях.

Датчики виявлення руху (присутності) виконують функцію базових тригерів, які ініціюють автоматичне замикання або розмикання кіл живлення освітлювальної мережі на основі безперервного моніторингу фізичної активності у визначеній робочій зоні. Їхнє застосування дозволяє повністю нівелювати проблему марнотратного спалювання електроенергії у просторах, де потреба у штучному світлі носить епізодичний або короткочасний характер, наприклад, у транзитних коридорах, санітарних вузлах, складських приміщеннях чи архівах офісних центрів. Інтеграція таких сенсорів у сучасні бездротові сенсорні мережі на базі потужних однокристальних мікроконтролерів відкриває шлях до розробки складних адаптивних сценаріїв. Такі алгоритми здатні самостійно керувати навантаженням без будь-якого прямого втручання людини, орієнтуючись виключно на об'єктивні дані про наявність об'єктів у зоні сканування.

Сенсори освітленості (люксметри), у свою чергу, відповідають за безперервний вимір інтенсивності природного світлового потоку, що потрапляє

в приміщення. Їхні сигнали використовуються мікропроцесорною системою для динамічного регулювання вихідної потужності штучних джерел світла за допомогою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) або аналогових інтерфейсів. Основна мета цього процесу — запобігти надмірній генерації штучного світла в ті години, коли сонячної інсоляції цілком достатньо для виконання зорових завдань. Такий підхід набуває особливої значущості під час проєктування інженерних мереж для великих офісних просторів (open-space), аудиторій навчальних закладів та різноманітних громадських будівель, де стабільна підтримка нормативного рівня освітленості має прямий вплив на збереження зору, концентрацію уваги та загальну продуктивність праці персоналу.

Передові архітектури АСО здебільшого базуються на синергетичному поєднанні інформації від обох типів датчиків, що дозволяє формувати глибоко інтегровані комплексні рішення. Завдяки алгоритмічній обробці масивів даних від різнорідних сенсорів, центральний контролер з високою точністю визначає не лише саму доцільність увімкнення світла в поточний момент часу, але й розраховує оптимальний відсоток потужності світильників. Показовим прикладом такої взаємодії є робота системи в темну пору доби: при фіксації руху чергове освітлення може активуватися не на максимальну яскравість, а лише на мінімально достатній рівень (наприклад, 20-30 відсотків), формуючи візуально м'яку атмосферу та одночасно мінімізуючи навантаження на електромережу. Для глибокого розуміння специфіки побудови таких систем необхідно детально розглянути класифікацію сенсорів, яка базується на фундаментальних фізичних принципах їхньої дії, типах реєстрованих випромінювань та мікроелектронних технологіях обробки сигналів. Це дає змогу інженерам підбирати оптимальну елементну базу для вирішення конкретних технічних завдань із урахуванням вимог до точності, завадостійкості та сумісності з іншими вузлами розумного будинку.

Сучасна номенклатура датчиків виявлення руху є досить широкою і класифікується за базовим фізичним явищем, що лежить в основі їхньої роботи. Найбільш масовими є пасивні інфрачервоні детектори (PIR-сенсори), які оснащені піроелектричними елементами і лінзами Френеля. Вони не

випромінюють жодних хвиль, а лише фіксують зміну теплового фону при перетині людиною секторів чутливості. Альтернативою є активні ультразвукові датчики, принцип дії яких базується на ефекті Доплера: вони постійно генерують високочастотні акустичні коливання і аналізують відбитий сигнал, реагуючи на зміну його частоти при русі об'єкта. Більш технологічними є мікрохвильові (радіохвильові) сенсори, які також використовують доплерівський зсув, але працюють у діапазоні надвисоких частот (зазвичай 5,8 ГГц). Вони здатні фіксувати найменші рухи навіть крізь тонкі неметалеві перешкоди (скло, гіпсокартон, пластик). Найвищий рівень надійності забезпечують гібридні пристрої (комбіновані сповіщувачі), мікроконтролери яких одночасно аналізують дані від інфрачервоного та мікрохвильового каналів, що практично зводить до нуля ймовірність хибних спрацювань від теплових конвекційних потоків або дрібних тварин.

Що стосується підсистеми моніторингу природного світла, то тут застосовуються різні класи оптоелектронних приладів. Найпростішими є аналогові фоторезистори — напівпровідникові компоненти, електричний опір яких нелінійно падає при збільшенні інтенсивності падаючого на них фотонного потоку. Більш високу швидкодію та лінійність характеристик демонструють фотодіоди, що генерують фотострум при опроміненні їхнього p-n переходу. Однак вершиною сучасної мікроелектроніки у цій сфері є інтегровані цифрові сенсори освітленості. Це складні мікросхеми, які містять на одному кристалі масив фотодіодів, прецизійний аналого-цифровий перетворювач (АЦП) та логічний блок інтерфейсу (I2C або SPI), що дозволяє мікроконтролеру зчитувати вже готове значення освітленості в люксах, очищене від інфрачервоних завад штучних джерел світла. Для комплексного розуміння апаратної бази нижче наведено таблицю 1.4, що систематизує інформацію щодо технічних параметрів детекторів присутності.

Таблиця 1.4

Порівняльний аналіз техніко-експлуатаційних характеристик детекторів руху

Тип датчика	Фізичний принцип виявлення	Головні переваги	Основні технічні недоліки
PIR (інфрачервоний)	Аналіз змін теплового випромінювання об'єктів	Мінімальне споживання струму, низька вартість	Обмежений радіус дії, чутливість до теплових перешкод
Ультразвуковий	Локація акустичними хвилями високої частоти	Висока точність у приміщеннях складної геометрії	Вразливість до інтенсивних акустичних шумів та протягів
Мікрохвильовий	Емісія та аналіз відбитих радіохвиль	Значна площа покриття, детекція крізь перешкоди	Висока вартість, можливість хибних спрацювань поза межами кімнати
Гібридний	Апаратне злиття кількох типів сенсорів	Максимальна завадостійкість та надійність	Складна конструкція, найвища ринкова вартість

Алгоритм взаємодії цих пристроїв у рамках єдиної замкненої системи керування підпорядкований суворій логіці. Узагальнену структурну схему проходження сигналів від первинних перетворювачів до виконавчих механізмів наведено на рисунку 1.2.

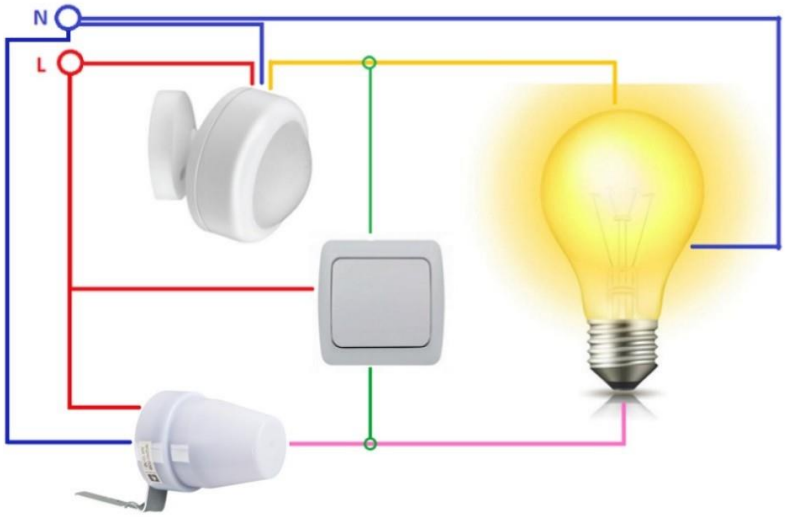


Рисунок 1.2 – Структурно-функціональна схема апаратної взаємодії сенсорів руху та рівня освітленості

Спектр практичного впровадження комбінованих сенсорних мереж є надзвичайно розгалуженим, що зумовлено їхнім універсальним характером та здатністю до гнучкого параметрування. У приватному житловому фонді датчики присутності вирішують тривіальні, але важливі завдання: забезпечення безпечного пересування вночі та автоматизація витяжної вентиляції й освітлення в санітарних зонах. У сегменті комерційної нерухомості (офіси, бізнес-центри) фокус зміщується на прецизійні датчики освітленості, які є ядром систем постійного регулювання світлового потоку, що балансують штучне і природне світло протягом усього робочого дня. На об'єктах муніципальної інфраструктури (залізничні вокзали, підземні паркінги, рекреаційні зони) застосовуються виключно захищені гібридні сенсори промислового класу, які здатні безперебійно функціонувати в умовах високої прохідності, пилу, вологи та температурних перепадів. Характеристики датчиків, що використовуються для вимірювання світла, систематизовано в таблиці 1.5.

Таблиця 1.5

Експлуатаційні та метрологічні специфікації сенсорів освітленості

Тип чутливого елемента	Динамічна чутливість	Метрологічна точність вимірювань	Типова сфера застосування
Фоторезистор (CdS)	Середня (нелінійна характеристика)	Низька (висока похибка)	Бюджетні побутові пристрої, сутінкові реле
Напівпровідниковий фотодіод	Висока (швидка реакція на зміну потоку)	Висока (добра лінійність)	Професійні промислові системи автоматизації
Цифровий інтегрований сенсор	Надвисока (наявність оптичних фільтрів)	Дуже висока (калібровані значення)	Високотехнологічні IoT-системи, смартфони

Підсумовуючи вищевикладене, можна безапеляційно стверджувати, що сенсори руху та інсоляції утворюють незамінний апаратний фундамент сучасних інтелектуальних систем освітлення. Вони забезпечують не лише безпрецедентний рівень користувацького комфорту, але й гарантують високу експлуатаційну надійність всієї інженерної інфраструктури. Завдяки потоку безперервних даних від цих мікроелектронних компонентів, керуючі контролери

здатні здійснювати складне багатопараметричне регулювання, блискавично реагуючи на динаміку сонячного світла та міграцію персоналу всередині будівлі. Такий рівень адаптивності виступає ключовим фактором досягнення жорстких сучасних стандартів енергетичної ефективності об'єктів нерухомості.

Стратегічний вектор подальшого розвитку цієї галузі нерозривно пов'язаний із поглибленням синергії між класичною мікроелектронікою та новітніми хмарними технологіями. Очікується тотальна інтеграція сенсорних вузлів у глобальні мережі Інтернету речей (IoT), де обробка зібраних телеметричних даних буде делегована потужним нейромережевим алгоритмам штучного інтелекту. Це дозволить здійснити перехід від жорстко запрограмованих тригерів до предиктивного (передбачувального) керування. Інтелектуальні системи майбутнього зможуть вивчати щоденні звички людей, аналізувати графіки переміщень і самостійно генерувати унікальні профілі освітлення для кожної конкретної локації. Паралельно відбувається невпинний прогрес у матеріалознавстві: розробляються надмініатюрні датчики з мікроспоживанням, здатні живитися від енергії радіохвиль чи мініатюрних сонячних панелей. Це остаточно зніме обмеження на їх встановлення в геометрично складних чи агресивних промислових середовищах, перетворюючи кожну будівлю на цілісний, автономний та високоадаптивний кіберфізичний організм.

1.4 Переваги та недоліки використання апаратної платформи Raspberry Pi для автоматизації освітлювальних мереж

Одноплатні мікрокомп'ютери, серед яких безперечним лідером є сімейство Raspberry Pi, здійснили справжню революцію у сфері проєктування систем автоматичного керування. Спочатку розроблена як бюджетна електронна платформа для освітніх цілей, ця архітектура завдяки своїй винятковій програмній гнучкості та вражаючій обчислювальній потужності стрімко інтегрувалася у професійний інженерний сегмент. У контексті розробки сучасних систем розумного будинку використання Raspberry Pi як головного координаційного вузла (хаба) відкриває безпрецедентні можливості. Це дозволяє інженерам переходити від тривіального релейного комутування освітлювальних

ліній до розробки високорівневих адаптивних алгоритмів, що охоплюють глибоку взаємодію з глобальною екосистемою Інтернету речей (IoT) та навіть розгортання локальних моделей штучного інтелекту. Разом з тим, імплементація подібних багатофункціональних комп'ютерних рішень вимагає об'єктивного аналізу їхніх сильних та слабких сторін для гарантування надійності та довговічності фінального інженерного продукту.

Технологічна специфіка та ефективність застосування платформи Raspberry Pi в автоматизованих комплексах керування світлом базується на її архітектурних перевагах. Завдяки наявності повноцінної операційної системи (переважно на базі ядра Linux), цей мікрокомп'ютер здатний у режимі реального часу агрегувати та здійснювати складну математичну обробку масивів телеметричних даних, що безперервно надходять від розгалуженої мережі датчиків руху, присутності та рівня інсоляції. На основі цих масивів контролер реалізує багатофакторні сценарії управління: від миттєвого вмикання світлових зон за вектором переміщення людини до надскладного предиктивного керування. Потужності мікропроцесора цілком достатньо для повноцінної підтримки сучасних криптографічних протоколів, що забезпечує безпечну IoT-інтеграцію для віддаленого диспетчеризування, а також для використання алгоритмів машинного навчання, здатних прогнозувати індивідуальні потреби користувачів та оптимізувати енергоспоживання на випередження. З метою ілюстрації апаратного потенціалу платформи, у таблиці 1.6 наведено порівняльний аналіз базових технічних параметрів двох популярних модифікацій: флагманської повнорозмірної моделі та її ультракомпактного енергоефективного аналога.

Таблиця 1.6

Порівняльний аналіз технічних специфікацій модифікацій одноплатного комп'ютера Raspberry Pi

Характеристика	Raspberry Pi 4 Model B	Raspberry Pi Zero 2 W
Процесор	ARM Cortex-A72, 4 ядра, 1.5 ГГц	ARM Cortex-A53, 4 ядра, 1 ГГц
Оперативна пам’ять	2/4/8 ГБ DDR4	512 МБ DDR2

Характеристика	Raspberry Pi 4 Model B	Raspberry Pi Zero 2 W
Інтерфейси	GPIO, USB, HDMI, Ethernet, Wi-Fi	GPIO, USB, Wi-Fi
Енергоспоживання	3 Вт – 7 Вт	1 Вт – 3 Вт
Ціна	$35 – $75	$15 – $20

Конструктивне виконання Raspberry Pi відзначається надвисоким ступенем інтеграції елементів, що максимально спрощує його впровадження як у компактні настільні макети, так і в габаритні промислові шафи автоматики. Архітектурно пристрій являє собою єдину багатошарову друковану плату, на якій щільно скомпоновано центральний процесор, мікросхеми оперативної пам'яті та вичерпний набір комунікаційних інтерфейсів. Ключовим елементом для інженерів-розробників систем автоматизації є універсальна гребінка портів вводу-виводу загального призначення (GPIO), яка забезпечує пряму апаратну взаємодію з низькорівневими аналоговими чи цифровими сенсорами, твердотільними реле та драйверами керування світлодіодами. Крім того, на материнській платі розміщено стандартні порти USB для підключення зовнішньої периферії, мультимедійний інтерфейс HDMI для організації локального поста диспетчеризації, а також мережевий контролер Ethernet для надійного інтегрування у дротову локальну мережу будівлі. Завантаження ядра операційної системи та збереження баз даних здійснюється на змінну карту формату microSD. Зовнішній вигляд типової конфігурації цього пристрою представлено на рисунку 1.3.



Рисунок 1.3 – Апаратне виконання та компонування базових інтерфейсів мікрокомп'ютера Raspberry Pi

До беззаперечних експлуатаційних переваг використання платформи Raspberry Pi слід віднести її виняткову гнучкість і багатофункціональність. Оскільки пристрій функціонує під управлінням повноцінної ОС, програмісти не обмежені вузькоспеціалізованими середовищами і можуть створювати керуючу логіку, використовуючи найсучасніші мови програмування (Python, C++, Node.js тощо). Економічна доцільність також виступає вагомим аргументом: вартість мікрокомп'ютера є значно нижчою порівняно з промисловими програмованими логічними контролерами (ПЛК), що робить його ідеальним фінансовим вибором для побудови систем розумного будинку. Вбудована на апаратному рівні підтримка бездротових стандартів Wi-Fi та Bluetooth гарантує миттєву готовність до розгортання IoT-інфраструктури. Не менш важливим є фактор глобальної технічної підтримки з боку багатомільйонної спільноти розробників, що забезпечує вільний доступ до величезної кількості відкритих програмних бібліотек та схемотехнічних рішень. Зрештою, платформа має високий рівень ремонтопридатності та потенціал до модернізації: у разі критичного зростання вимог до обчислювальної потужності, заміна плати на апаратну платформу новішої генерації відбувається максимально швидко, часто без необхідності тотального переписування програмного коду.

Водночас інженерне проєктування на базі Raspberry Pi вимагає чіткого усвідомлення його апаратних обмежень та недоліків. Передусім, цей пристрій випускається у комерційному температурному діапазоні, що зумовлює його високу чутливість до агресивних умов навколишнього середовища. Використання мікрокомп'ютера в запилених або неопалюваних приміщеннях вимагає обов'язкового проєктування спеціалізованих герметичних корпусів. Іншим критичним експлуатаційним аспектом є відносно високе енергоспоживання: на відміну від простих енергоефективних мікроконтролерів сімейства Arduino, потужний мікропроцесор Raspberry Pi постійно споживає значні струми, що робить його застосування в повністю автономних системах із живленням від батарей або сонячних панелей вкрай проблематичним. Крім того, інженерний поріг входу для роботи з цією платформою є достатньо високим, адже від розробника вимагаються не лише базові знання електроніки, але й

навички системного адміністрування, розуміння архітектури комп'ютерних мереж та специфіки налаштування операційних систем.

Об'єктивна оцінка доцільності впровадження розглянутої платформи неможлива без її глибокого порівняння з іншими популярними апаратними рішеннями на сучасному ринку засобів мікропроцесорної техніки. Інженерам повсякчас доводиться балансувати, обираючи між повноцінними мікрокомп'ютерами, класичними мікроконтролерами (на кшталт Arduino чи потужнішого ESP32) або ж віддавати перевагу дорогим промисловим контролерам із гарантованою відмовостійкістю. Кожна з цих електронних платформ володіє унікальним співвідношенням обчислювальної потужності, споживаної енергії та вартості впровадження. Для полегшення процесу прийняття архітектурних рішень під час проєктування розумного будинку, у таблиці 1.7 наведено зведений конкурентний аналіз ключових характеристик основних апаратних баз.

Таблиця 1.7

Конкурентний аналіз апаратних платформ для побудови систем інтелектуального освітлення

Характеристика	Raspberry Pi	Arduino	ESP32	Промислові контролери
Обчислювальна потужність	Висока	Низька	Середня	Середня
Простота використання	Середня	Висока	Середня	Низька
Енергоспоживання	Помірне	Дуже низьке	Низьке	Високе
Інтеграція з IoT	Висока	Низька	Висока	Обмежена
Ціна	Середня	Низька	Середня	Висока

Надзвичайно широкий спектр функціональних можливостей дозволяє успішно масштабувати програмно-апаратні рішення на базі Raspberry Pi для об'єктів абсолютно різного цільового призначення. У сегменті приватних житлових приміщень (квартири, котеджі) цей контролер переважно виступає ядром системи створення комфортного мультирум-освітлення. Наприклад, у спальних кімнатах система здатна генерувати складні хронобіологічні сценарії: плавно змінювати яскравість і колірну температуру нічних ламп, імітуючи

природний захід або схід сонця для оптимізації циклів сну мешканців. Що стосується офісних та адміністративних приміщень, то тут головним пріоритетом стає радикальне енергоощадження без втрати рівня продуктивності працівників. Raspberry Pi успішно бере на себе управління багатозонним освітленням транзитних коридорів та конференц-залів, активуючи відповідні групи світильників виключно в тих зонах, де наразі відбувається переміщення персоналу або зафіксовано нестачу сонячного світла з вікон.

Окремим і вельми перспективним напрямком є використання таких мікрокомп'ютерів у роздрібній торгівлі та великих комерційних центрах. На цих об'єктах обчислювальні потужності Raspberry Pi активно залучаються для створення систем динамічного адаптивного підсвічування: керуючий алгоритм здатен миттєво змінювати яскравість та фокус освітлення на конкретних товарних вітринах або експозиційних зонах, безпосередньо реагуючи на наближення потенційного покупця. Підсумовуючи вищевикладений матеріал, можна з впевненістю констатувати, що Raspberry Pi представляє собою одну з найбільш універсальних, потужних та перспективних платформ для побудови інноваційних систем керування освітленням. Органічне поєднання високої продуктивності, широкого арсеналу вбудованих комунікаційних модулів та безпрецедентної доступності робить її оптимальним вибором для вирішення складних завдань автоматизації в умовах сучасних вимог до енергоефективності.

Висновки до розділу 1

У першому розділі кваліфікаційної роботи було здійснено комплексний аналіз сучасних технологій, методів та апаратних засобів, що застосовуються для побудови автоматизованих систем керування освітленням (АСО). Автоматизація освітлювальних мереж виступає фундаментальною складовою сучасної концепції «розумного будинку». Впровадження таких інтелектуальних систем не лише суттєво підвищує рівень побутового комфорту для кінцевих споживачів, але й гарантує значне зниження обсягів спожитої електроенергії. Згідно зі статистикою, на освітлення може витрачатися до 30 відсотків від загального обсягу енергоспоживання, і АСО дозволяють мінімізувати ці нераціональні

втрати. З огляду на архітектуру керуючої логіки, сучасні АСО доцільно поділяти на централізовані, децентралізовані та комбіновані (гібридні) системи, кожна з яких має свої переваги та недоліки. Майбутній розвиток цих комплексів нерозривно пов'язаний із поглибленням їхньої інтеграції в екосистему Інтернету речей (IoT) та впровадженням нейромережевих алгоритмів.

Фундаментальним підходом до заощадження енергетичних ресурсів є впровадження концепції інтелектуального адаптивного керування в поєднанні з модернізацією апаратної бази. Зокрема, перехід на використання напівпровідникових світлодіодних (LED) ламп дозволяє скоротити споживання електричної енергії до 80 відсотків порівняно з класичними джерелами світла розжарювання. Важливою ланкою збору первинної інформації для алгоритмів управління виступають сенсорні пристрої. Аналіз показав, що найвищої ефективності керування вдається досягти завдяки синергетичному поєднанню інформації від датчиків виявлення руху та сенсорів освітленості. Завдяки такій інтеграції центральний контролер здатний динамічно регулювати потужність штучного освітлення залежно від рівня природної сонячної інсоляції та безпосередньої фізичної присутності людей у робочій зоні.

Для практичної реалізації подібних складних алгоритмів ключову роль відіграє правильний вибір мікропроцесорної апаратної платформи. Одноплатні мікрокомп'ютери сімейства Raspberry Pi зарекомендували себе як одні з найбільш потужних, гнучких та перспективних рішень для ролі головного координаційного вузла в системах розумного будинку. Завдяки наявності повноцінної операційної системи, універсальної гребінки портів вводу-виводу (GPIO), вбудованих комунікаційних модулів Wi-Fi та Ethernet, ця платформа надає інженерам надзвичайно широкі можливості. Raspberry Pi значно перевершує базові мікроконтролери у вирішенні багатокритеріальних завдань автоматизації, криптографічно безпечній IoT-інтеграції та обробці масивів телеметричних даних у режимі реального часу.

РОЗДІЛ 2 ПРОЄКТУВАННЯ АПАРАТНО-ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ОСВІТЛЕННЯМ

2.1 Центральний мікропроцесорний вузол керування автоматизованою системою освітлення

Одноплатний мікрокомп'ютер сімейства Raspberry Pi являє собою надзвичайно універсальну та потужну апаратну платформу, яка відкриває перед інженерами та розробниками безмежні перспективи для швидкого прототипування, математичного моделювання та комплексного тестування інноваційних комп'ютерних систем. Завдяки унікальному поєднанню ультракомпактних габаритів та високої обчислювальної продуктивності, цей електронний модуль набув особливої популярності серед представників малого та середнього бізнесу, а також у стартап-середовищі, де критично важливим є швидке впровадження систем автоматизації за умови жорстких фінансових обмежень. Використання даного мікрокомп'ютера в ролі базового ядра керування дозволяє мінімізувати інвестиційні ризики, пов'язані з розробкою та розгортанням повномасштабних промислових комплексів, суттєво скорочуючи загальні витрати на етапах науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт. Низька ринкова вартість у синергії з широким арсеналом вбудованих комунікаційних можливостей, таких як наявність високошвидкісного модуля бездротового зв'язку Wi-Fi, а також здатність напряму взаємодіяти з різноманітними цифровими та аналоговими сенсорами і модулями технічного зору (відеокамерами), формує ідеальне екосистему для створення надійних інженерних прототипів. Це робить платформу незамінним інструментом не лише в комерційному секторі, але й в академічних, дослідницьких та освітніх проєктах, що фокусуються на глибокій оптимізації та автоматизації технологічних процесів. Базова архітектура та ключові апаратні вузли цієї платформи наочно представлені на рисунку 2.1.

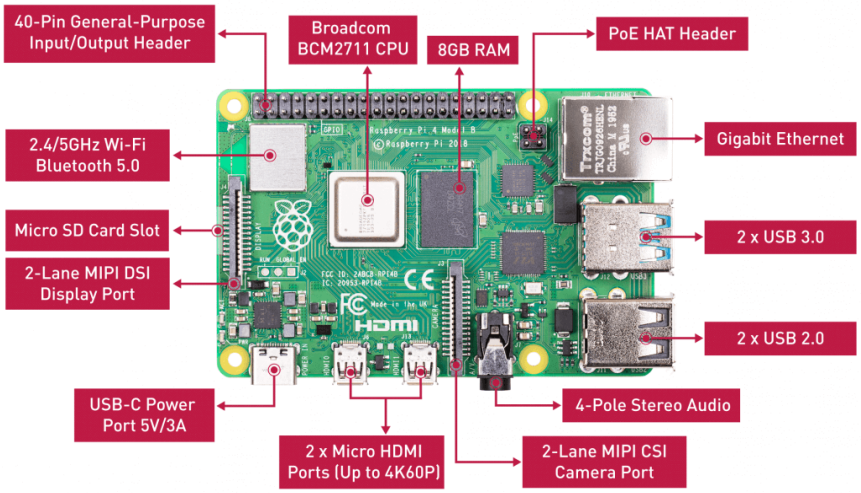


Рисунок 2.1 – Структурна організація та основні апаратні компоненти мікрокомп'ютера Raspberry Pi

Варто також відзначити, що, незважаючи на своє основне позиціонування як платформи для проєктування вбудованих систем, обчислювальних ресурсів Raspberry Pi цілком достатньо для виконання широкого спектра рутинних завдань, притаманних класичним персональним комп'ютерам. Операційна система (переважно на базі ядра Linux), під управлінням якої функціонує пристрій, надає користувачам повноцінне графічне середовище. Це дозволяє використовувати мікрокомп'ютер як повноцінну робочу станцію для обробки великих масивів табличних даних, створення та форматування складних текстових документів, перегляду веб-сторінок, а також для базового редагування статичної та динамічної комп'ютерної графіки. Таким чином, пристрій здатний ефективно закривати потреби в обчислювальній техніці для прикладних задач, що не вимагають екстремальної продуктивності центрального процесора.

Фундаментальною перевагою та головною архітектурною особливістю Raspberry Pi, яка якісно відрізняє його від звичайних офісних комп'ютерів, є наявність універсального багатоконтактного інтерфейсу вводу-виводу загального призначення, відомого як GPIO (General Purpose Input/Output). Саме цей апаратний блок перетворює плату на потужний інструмент електронної інтеграції, дозволяючи встановлювати прямий фізичний зв'язок із безліччю зовнішніх електронних компонентів. Ключовою характеристикою GPIO є гнучка

підтримка різних рівнів логічної напруги: інтерфейс дозволяє комутувати зовнішні пристрої, що живляться від стандартних ліній на 3,3 В та 5 В. Це повністю покриває потреби переважної більшості сучасних мікроелектронних модулів, включаючи твердотільні реле, сервоприводи, світлодіодні матриці та різноманітні сенсори навколишнього середовища. Крім того, наявність спеціалізованих контактів заземлення гарантує високу стабільність передачі сигналів і формує надійний контур захисту від раптових стрибків напруги, що є критично важливим для забезпечення електробезпеки як самої керуючої плати, так і підключеної до неї периферії. Багатофункціональність інтерфейсу проявляється в тому, що кожен програмно-керований порт (пін) може бути динамічно налаштований або як вхід для зчитування телеметрії з датчиків, або як вихід для трансляції керуючих сигналів на виконавчі механізми (дисплеї, камери, електромотори).

Такий безпрецедентний рівень апаратної гнучкості зумовлює надзвичайно широку географію практичного застосування платформи. У сфері домашньої автоматизації та реалізації концепції «розумного будинку» Raspberry Pi ідеально підходить на роль центрального диспетчерського вузла, який агрегує дані та координує роботу підсистем освітлення, припливно-витяжної вентиляції та електронної безпеки. В освітньому сегменті інтуїтивна зрозумілість програмування портів GPIO робить пристрій базовим елементом для вивчення основ робототехніки та кібернетики. Водночас у промисловому секторі цей мікрокомп'ютер все частіше імплементується у виробничі лінії як недорогий, але надійний модуль для безперервного збору телеметричних даних з верстатів та управління малопотужними технологічними процесами. Для детального ознайомлення з топологією контактної колодки на рисунку 2.2 наведено схему виводів інтерфейсу, яка ілюструє фізичне розташування та базове призначення кожного піна, що є необхідною інформацією для інженерів під час проєктування електричних схем.

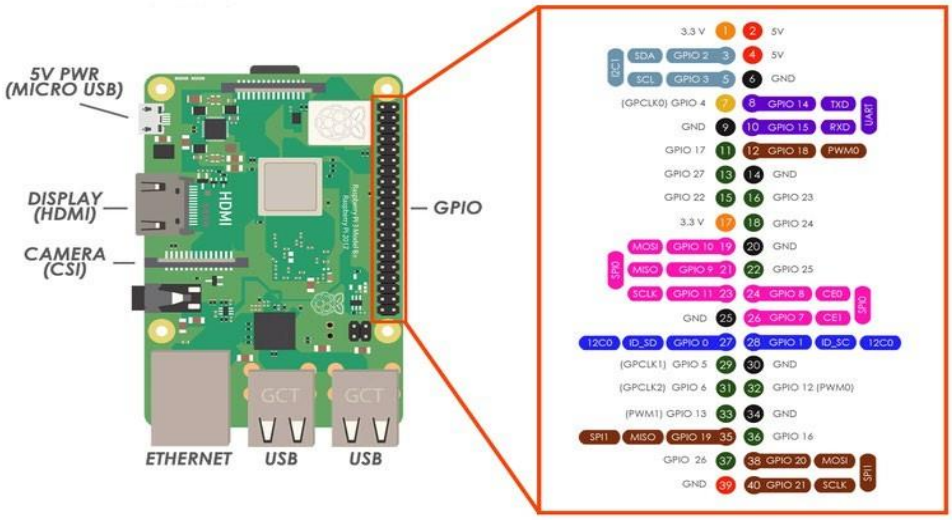


Рисунок 2.2 – Топологія та функціональне призначення контактів інтерфейсу GPIO

Проєктуючи складні апаратні комплекси на базі Raspberry Pi, інженери часто застосовують спеціалізовані плати розширення. Для їхньої апаратної ідентифікації на колодці GPIO зарезервовані специфічні контакти, зокрема виводи з маркуванням 27 (GPIO 0) та 28 (GPIO 1). Хоча технічно ці цифрові лінії можуть бути використані для підключення звичайної периферії, таке нестандартне застосування вимагає глибокого технічного обґрунтування. Використання пінів системної ідентифікації не за цільовим призначенням здатне спровокувати програмні конфлікти, збої ядра операційної системи або навіть незворотні апаратні пошкодження. Вкрай важливим етапом інтеграції мікрокомп'ютера з електронними схемами є жорсткий контроль електричних параметрів струму та напруги. Згідно з технічною документацією, сумарна сила струму, що протікає через логічні виводи GPIO, є строго лімітованою і не повинна перевищувати поріг у 50 мА. Ігнорування цього експлуатаційного обмеження або подання на контакти напруги, що не відповідає номінальним рівням, неминуче призведе до теплового пробою мікропроцесора та повної втрати працездатності плати. Розгорнута архітектура та апаратна специфікація кожного виводу деталізована на рисунку 2.3.

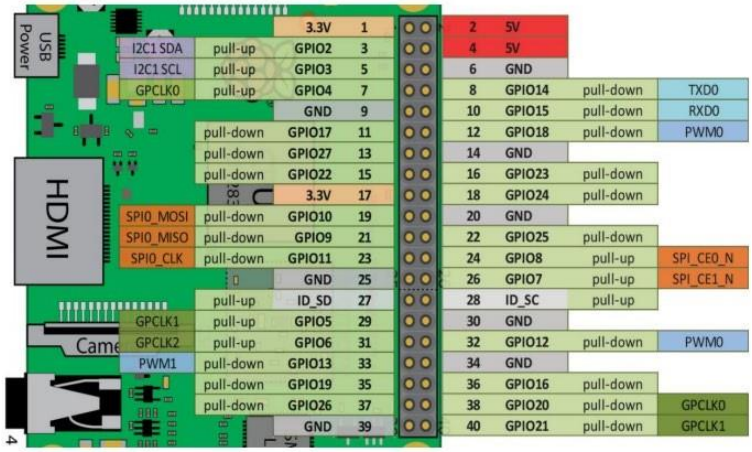


Рисунок 2.3 – Розгорнута електрична схема та специфікація портів вводу-виводу

Підсумовуючи, можна стверджувати, що мікрокомп'ютер Raspberry Pi є високотехнологічним, гнучким та універсальним інженерним рішенням, яке оптимально підходить для розробки сучасних систем автоматизації та IoT-інфраструктури. Завдяки підтримці широкого спектра промислових інтерфейсів обміну даними (зокрема I²C та SPI), платформа гарантує безшовну інтеграцію з величезною кількістю сучасних вимірювальних приладів. Разом з тим, досягнення максимальної ефективності та забезпечення тривалого терміну безперебійної експлуатації вимагає від проєктувальника високої інженерної кваліфікації. Необхідно суворо дотримуватися вимог електробезпеки, проєктувати надійні схеми для захисту від перенапруг і струмів короткого замикання, а також розраховувати ефективні системи охолодження мікропроцесора при інтенсивних обчислювальних навантаженнях. Лише такий комплексний підхід дозволить повністю реалізувати колосальний потенціал цього пристрою в межах створення надійної автоматизованої системи керування освітленням.

2.2 Проєктування апаратної архітектури та комплексне обґрунтування вибору елементної бази системи автоматичного регулювання освітленості

Грамотно спроєктована апаратна архітектура системи керування освітленням виступає фундаментальним базисом для створення надійного, енергоефективного та повністю автоматизованого інженерного рішення,

здатного гнучко адаптувати світлове середовище приміщення до динамічно змінних зовнішніх умов. З технічної точки зору, ця архітектура являє собою складну кіберфізичну екосистему, яка органічно поєднує сучасні обчислювальні засоби (мікрокомп'ютери), прецизійні вимірювальні сенсори та силові виконавчі механізми для досягнення максимально злагодженої та безперебійної роботи. Головна мета розробки такої багаторівневої архітектури полягає у забезпеченні безшовної апаратно-програмної взаємодії між усіма вузлами. Саме ця синергія дозволяє радикально мінімізувати нераціональні втрати електричної енергії, суттєво підвищити рівень візуального та експлуатаційного комфорту для користувачів, а також практично повністю звести нанівець необхідність ручного втручання людини у повсякденні процеси керування освітленням.

Окрім виконання базових функцій, глибоко продумана та модульна архітектура наділяє систему високим потенціалом до подальшого масштабування. Це означає, що в майбутньому інфраструктуру можна буде легко розширити шляхом інтеграції додаткових сенсорних вузлів або нових контурів освітлення без необхідності радикальної переробки базової схемотехніки. Така властивість робить розроблене рішення надзвичайно універсальним, дозволяючи успішно імплементувати його як у локальних проєктах приватних домогосподарств (smart home), так і масштабувати до рівня складних комерційних або навіть промислових об'єктів. У межах даного розділу здійснюється детальний розбір та аналіз кожного компонента апаратної частини, формується загальна топологія зв'язків та наводиться технічне обґрунтування вибору елементної бази. Кожен електронний модуль підбирався на основі ретельного аналізу його метрологічних та експлуатаційних характеристик, рівня апаратної сумісності з іншими вузлами мережі, а також з огляду на специфіку реальних умов експлуатації в закритих приміщеннях.

За результатами проведеного маркетингового та технічного дослідження сучасного ринку мікроелектроніки, було сформовано оптимальний перелік елементів для побудови апаратного ядра системи. Головним обчислювальним центром (хабом) було обрано високопродуктивний одноплатний мікрокомп'ютер Raspberry Pi 4. Вибір саме цієї платформи безапеляційно обумовлений її високою

обчислювальною потужністю, наявністю повноцінної операційної системи з підтримкою апаратної багатозадачності, розгалуженою колодкою портів вводу-виводу (GPIO) та вбудованим мережевим стеком, що забезпечує нативну інтеграцію з локальними мережами через інтерфейси Wi-Fi або Ethernet. Цей мікрокомп'ютер бере на себе завдання безперервної агрегації даних, виконання логічних алгоритмів прийняття рішень та маршрутизації команд між усіма підсистемами.

Для забезпечення системи достовірною інформацією про поточний стан середовища використовується комплекс сенсорів. Підсистема виявлення присутності реалізована на базі пасивних інфрачервоних датчиків (PIR-сенсорів). Їхній принцип дії ґрунтується на фіксації динамічних змін теплового випромінювання у просторі, що дозволяє з високою точністю та мінімальними енергозатратами детектувати переміщення людей у контрольованій зоні. Ці сенсори виконують роль базових тригерів, які виводять систему з режиму очікування виключно за умови реальної необхідності. Паралельно з ними функціонує прецизійний цифровий сенсор TSL 2561, який відповідає за безперервний моніторинг інтенсивності природного фонового освітлення. Завдяки широкому динамічному діапазону та використанню захищеного цифрового протоколу передачі даних I2C, цей датчик надає мікрокомп'ютеру високоточні калібровані значення освітленості в люксах, що є критично важливим для реалізації алгоритмів компенсації денного світла та зниження енергоспоживання.

Виконавчим сегментом системи, що безпересередньо відповідає за генерацію світлового потоку, виступають сучасні світлодіодні (LED) лампи. Перевага надана саме твердотільним джерелам світла через їхню безпрецедентну енергоефективність, екологічну безпечність (відсутність парів ртуті) та надзвичайно тривалий експлуатаційний ресурс, що робить їх ідеальним кандидатом для роботи в умовах частих автоматичних комутацій. Безпечне керування високовольтними лініями живлення цих ламп з боку низьковольтної логіки Raspberry Pi здійснюється за допомогою спеціалізованих модулів електромагнітних реле. Ці блоки забезпечують надійну гальванічну розв'язку

між керуючим мікрокомп'ютером та мережею 220 В, гарантуючи захист чутливої електроніки від струмів короткого замикання та перенапруг під час комутації навантаження. Для систематизації інформації, базові компоненти спроєктованої системи, їхні ключові функції та головні критерії вибору зведено у таблицю 2.1.

Таблиця 2.1

Функціональне призначення та критерії вибору базових апаратних вузлів системи

Компонент	Локальна функція в системі	Інженерне обґрунтування вибору
Мікрокомп'ютер Raspberry Pi 4	Головний обчислювальний та координаційний контролер	Значний запас продуктивності, нативна підтримка IoT-протоколів
Інфрачервоні PIR-сенсори	Сканування простору та детекція фізичної присутності	Ультранизьке споживання струму в режимі очікування
Цифровий люксметр TSL 2561	Безперервний моніторинг рівня природної інсоляції	Прецизійна точність вимірювань, цифровий інтерфейс I2C
Світлодіодні (LED) лампи	Генерація штучного світлового потоку	Максимальна енергетична ефективність, значний робочий ресурс
Багатоканальні модулі реле	Силове комутування мереж освітлення	Забезпечення гальванічної ізоляції та захисту електроніки

Для підтвердження економічної та технічної доцільності прийнятих інженерних рішень, у таблиці 2.2 наведено розгорнутий порівняльний аналіз обраної елементної бази з найбільш поширеними ринковими альтернативами, що застосовуються в аналогічних системах автоматизації.

Таблиця 2.2

Конкурентний аналіз обраної елементної бази з існуючими ринковими альтернативами

Компонент системи	Популярна ринкова альтернатива	Ключові експлуатаційні переваги обраного елемента	Об'єктивні недоліки обраного рішення
Raspberry Pi 4	Мікроконтролер	Багатозадачна ОС,	Значно вища ринкова

	Arduino Uno	висока обчислювальна потужність, вбудований Wi-Fi	вартість та більше енергоспоживання
PIR-датчики руху	Ультразвукові (УЗ) детектори	Конструктивна простота, пасивний режим роботи (висока енергоефективність)	Знижена чутливість до мікрорухів порівняно з мікрохвильовими аналогами
Сенсор TSL 2561	Аналоговий фоторезистор або BH1750	Наявність інфрачервоного фільтра, прецизійна цифрова точність	Більш висока вартість модуля порівняно з аналоговими рішеннями
LED-лампи	Галогенні або люмінесцентні лампи	Мінімальне тепловиділення, відсутність стробоскопічного ефекту	Дещо вищі початкові капіталовкладення при закупівлі обладнання
Модулі електромагнітних реле	Твердотільні реле (SSR)	Низька вартість багатоканальних збірок, простота управління	Наявність механічного зносу контактів, клацання при спрацюванні

Гарантування стабільної, передбачуваної та безвідмовної роботи автоматизованої системи неможливе без чіткого розуміння інформаційної взаємодії між її окремими апаратними модулями. Кожен електронний елемент виконує строго визначену функцію в межах єдиного замкненого контуру управління, і саме їхня синхронна робота забезпечує коректність виконання закладених алгоритмів. Структурно-алгоритмічна логіка роботи комплексу являє собою безперервний циклічний процес збору даних, їхньої математичної обробки та формування керуючих впливів. Узагальнену топологію проходження сигналів та взаємодії ключових вузлів наочно проілюстровано на рисунку 2.4. На початковому етапі мікрокомп'ютер ініціює опитування периферії: зчитує логічні рівні з інфрачервоних датчиків руху та отримує цифрові пакети даних від люксметра TSL 2561 щодо поточного рівня освітленості. Наступним кроком ядро Raspberry Pi аналізує цей масив інформації через призму заданих користувачем порогових значень та часових затримок. У разі виконання логічної умови (наявність людини плюс недостатність природного світла),

мікрокомп'ютер генерує керуючий імпульс на відповідний канал релейного модуля, який, замикаючи контакти, подає мережеву напругу на визначену групу LED-світильників.

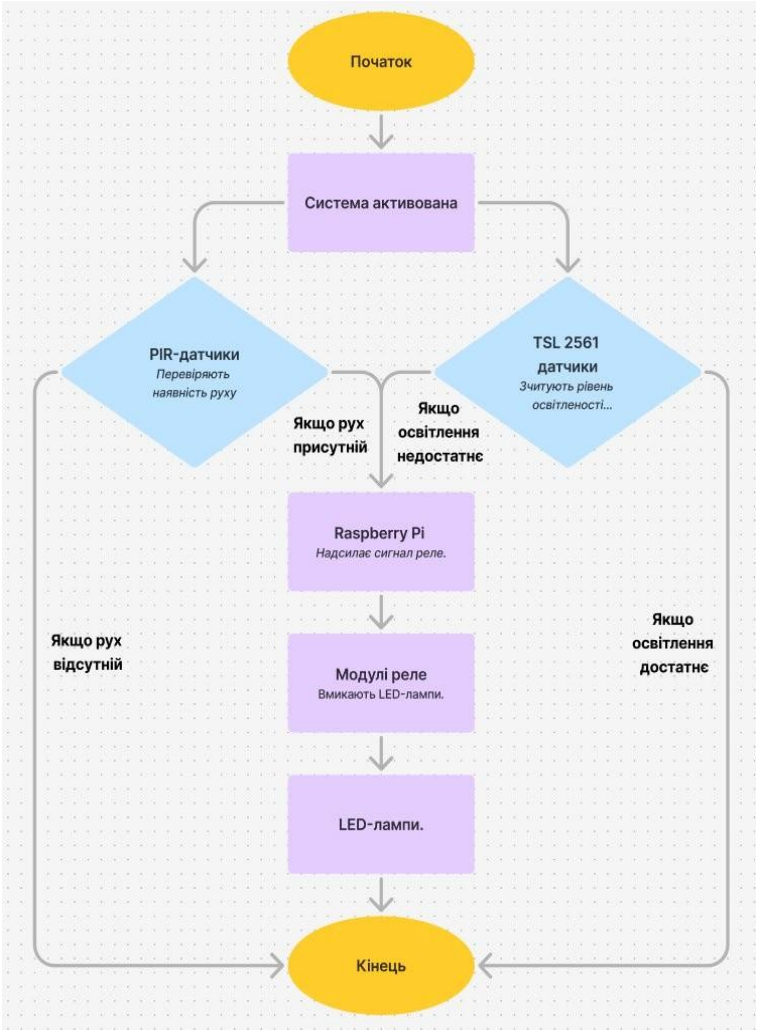


Рисунок 2.4 – Структурно-алгоритмічна схема інформаційної та керуючої взаємодії компонентів

З метою забезпечення максимальної експлуатаційної гнучкості, архітектурою системи передбачено спеціальний режим роботи з можливістю програмного або апаратного ігнорування (байпасу) показників певних сенсорних груп. Цей так званий обмежений режим дозволяє примусово деактивувати реакцію системи на рух або зміну природного світла. Така опція є критично необхідною для вирішення специфічних користувацьких завдань: наприклад, під час проведення презентацій, коли потрібне стабільне затемнення незалежно від присутності людей, або ж у випадках проведення технічного обслуговування приміщення. Перехід системи до такого стану та алгоритм її функціонування в умовах обмеженого сенсорного пулу детально відображено на рисунку 2.5.

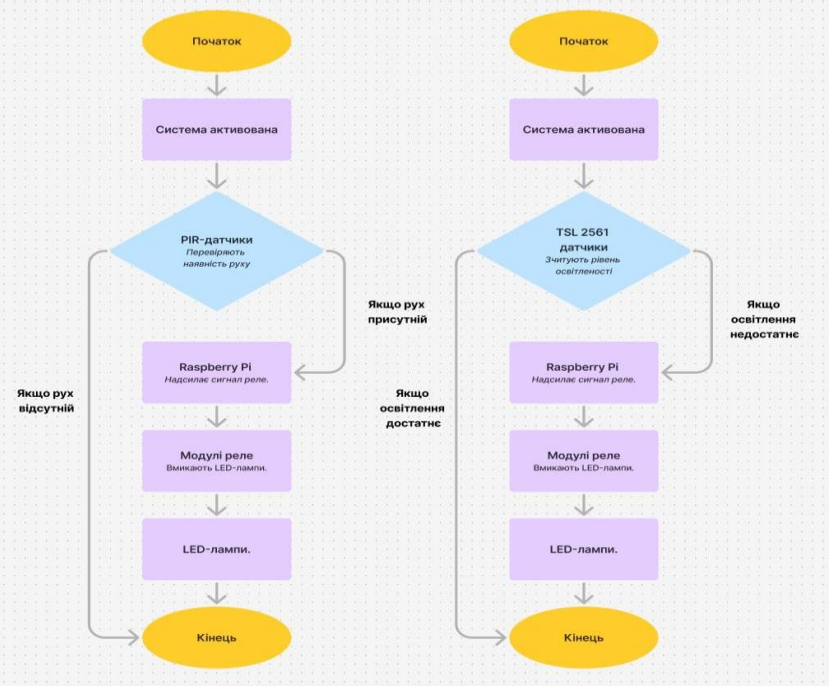


Рисунок 2.5 – Алгоритм функціонування комплексу в режимі обмеженого сенсорного опитування

Надійна система автоматизації повинна надавати користувачеві багатоваріантність інтерфейсів управління. Саме тому в розробленому комплексі імплементовано кілька паралельних методів ініціалізації: класичний локальний (ручний) та сучасний дистанційний. Ручне керування реалізується за допомогою фізичних настінних вимикачів, підключених до входів контролера, що забезпечує звичний, миттєвий та безвідмовний спосіб комутації світла без необхідності доступу до цифрових інтерфейсів. Дистанційний режим розкриває весь потенціал IoT-технологій: завдяки розгорнутому на базі Raspberry Pi локальному веб-серверу, користувач отримує можливість здійснювати комплексний моніторинг та управління освітленням з екрана смартфона, планшета або персонального комп'ютера з будь-якої точки світу за наявності інтернет-з'єднання. Це рішення кардинально підвищує ергономіку використання системи на великих інфраструктурних об'єктах. Концептуальну схему реалізації обох методів управління наведено на рисунку 2.6.

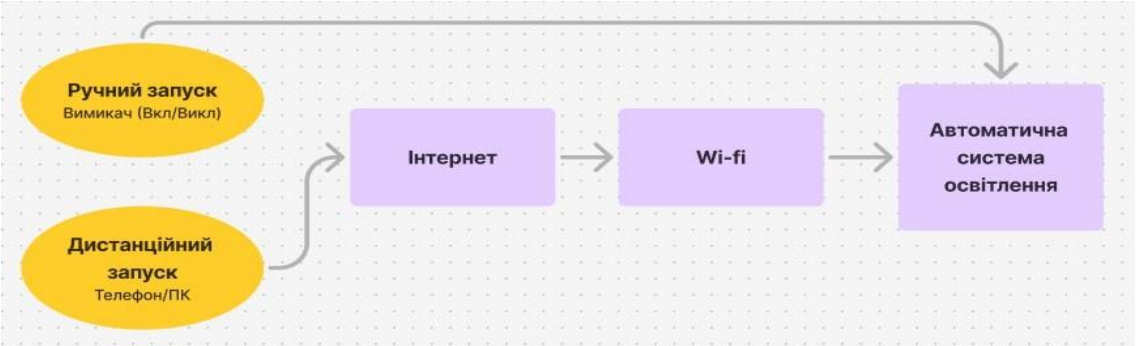


Рисунок 2.6 – Топологія методів ініціалізації та управління локальною системою освітлення

Процес інженерного проєктування, написання керуючого програмного коду, а також тонкого конфігурування мережевих параметрів мікрокомп'ютера Raspberry Pi здійснюється за допомогою зовнішньої робочої станції (ноутбука). Використання термінального доступу (SSH) та спеціалізованих середовищ розробки дозволяє інженеру зручно компілювати скрипти, налаштовувати системні демони та проводити глибоке налагодження логіки (дебагінг) без необхідності підключення до Raspberry Pi окремого монітора чи клавіатури. Вбудований веб-сервер додатково оснащується модулем криптографічної авторизації, що захищає контур управління освітленням від несанкціонованого доступу та дозволяє адміністратору гнучко налаштовувати часові графіки й сценарії роботи світлових приладів. Таким чином, у даному розділі було проведено вичерпний аналіз та проєктування апаратної архітектури. Доведено, що обрана конфігурація на базі мікрокомп'ютера Raspberry Pi 4 у симбіозі з сучасною сенсорною базою створює надійний, високопродуктивний та легко масштабований фундамент для реалізації адаптивної системи керування освітленням.

2.3 Розробка принципових електричних схем сполучення компонентів автоматизованого комплексу керування освітленням

Сучасна автоматизована система регулювання освітленості являє собою високотехнологічний апаратно-програмний комплекс, у якому органічно поєднуються прецизійні вимірювальні сенсори, силові виконавчі механізми та центральний обчислювальний пристрій. Етап розробки принципових електричних схем та топології підключення компонентів є одним із найбільш

критичних кроків у процесі інженерного проєктування. Від правильності та надійності фізичного сполучення електронних модулів безпосередньо залежить загальна стабільність, електрична безпека та довговічність функціонування всієї інфраструктури розумного будинку. Апаратна взаємодія між підсистемою збору даних (до якої належать цифровий люксметр TSL 2561 та детектори присутності PIR), виконавчими силовими елементами (електромагнітними релейними модулями) та кінцевими споживачами електроенергії (світлодіодними лампами) реалізується виключно через єдиний координаційний центр — мікрокомп'ютер Raspberry Pi 4. Наведені у даному підрозділі електричні схеми наочно ілюструють специфіку фізичної інтеграції різнорідних апаратних вузлів у цілісну кіберфізичну систему, де кожен елемент виконує строго регламентовану функцію для забезпечення безперебійної адаптації світлового середовища.

2.3.1 Схемотехнічна інтеграція цифрового сенсора освітленості TSL 2561

Основою підсистеми моніторингу природної інсоляції виступає високоточний цифровий перетворювач світла TSL 2561, комунікація з яким здійснюється за допомогою стандартизованої двопровідної послідовної шини даних I²C. Використання цього цифрового інтерфейсу дозволяє транслювати виміряні значення рівня освітленості безпосередньо у цифровому форматі, що практично повністю нівелює вплив електромагнітних перешкод і робить цей сенсор ідеальним кандидатом для інтеграції з логікою Raspberry Pi. Відмінною рисою даного мікроелектронного компонента є наявність двох вбудованих фотодіодів, які дозволяють системі одночасно вимірювати інтенсивність світлового потоку як у видимому спектрі, так і в інфрачервоному діапазоні, забезпечуючи максимальну точність показників. Фізичне підключення модуля до гребінки портів загального призначення мікрокомп'ютера передбачає комутацію чотирьох базових ліній. Лінія живлення VCC сенсора з'єднується з виводом 3.3 В на материнській платі Raspberry Pi, що гарантує подачу стабілізованої напруги для живлення внутрішнього аналого-цифрового перетворювача. Контакт GND надійно об'єднується із загальною шиною заземлення системи. Для забезпечення швидкісного інформаційного обміну лінія

послідовних даних SDA (Serial Data Line) підключається до порту GPIO2, а лінія тактового синхросигналу SCL сполучається з портом GPIO3 мікрокомп'ютера. У процесі штатної роботи сенсор здійснює безперервне сканування фонового освітлення і транслює пакети даних по шині I²C до центрального процесора. Керуючий контролер, спираючись на отримані люксметричні показники, приймає зважене рішення щодо доцільності подачі живлення на контури штучного освітлення. Принципова схема з'єднань цього вимірювального вузла наведена на рисунку 2.7.

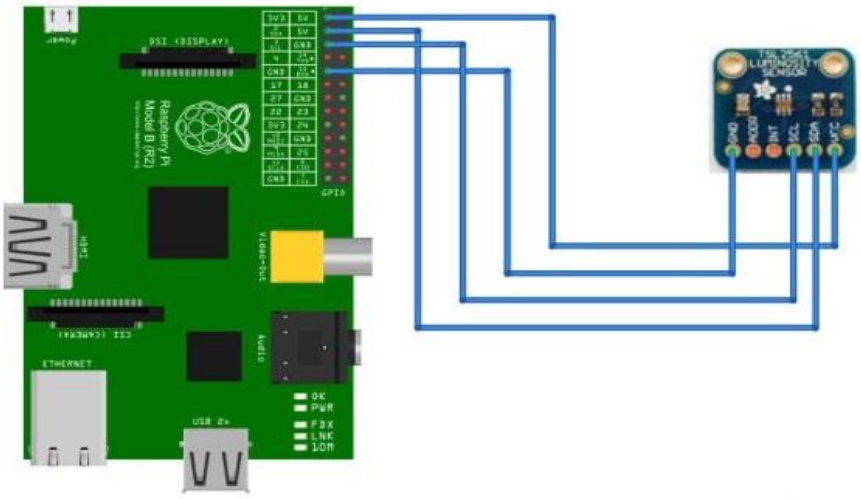


Рисунок 2.7 – Електрична схема сполучення цифрового люксметра TSL 2561 з портами мікрокомп'ютера

2.3.2 Апаратне підключення піроелектричних датчиків виявлення руху

Детектори присутності типу PIR (Passive Infrared) формують критично важливий контур збору даних, оскільки саме вони надають системі об'єктивну інформацію про фізичну наявність людини у визначеній зоні контролю. Фізичний принцип дії цих сповіщувачів базується на реєстрації динамічних змін теплових (інфрачервоних) сигнатур, які випромінюються тілом людини, з подальшим фокусуванням цього випромінювання через систему оптичних лінз Френеля на чутливий піроелектричний кристал. Процедура інтеграції такого датчика в загальну апаратну архітектуру вимагає правильного сполучення трьох основних провідників. Контакт живлення VCC модуля з'єднується з силовою шиною 5 В мікрокомп'ютера Raspberry Pi для забезпечення необхідного енергопостачання

внутрішнього операційного підсилювача датчика. Контакт GND традиційно виводиться на спільну мінусову шину (заземлення). Сигнальний інформаційний вивід OUT датчика безпосередньо підключається до одного з обраних цифрових портів загального призначення, наприклад, до GPIO27. У момент перетину людиною секторів чутливості, вбудована апаратна логіка PIR-сенсора формує на своєму виході логічну одиницю (високий потенціал), який миттєво зчитується мікропроцесором. Далі програмний алгоритм здійснює комплексну перевірку: якщо факт руху підтверджено, а дані з датчика TSL 2561 свідчать про нестачу природного світла, мікрокомп'ютер формує команду на активацію відповідного силового реле. Конфігурація підключення цього електронного компонента детально проілюстрована на рисунку 2.8.

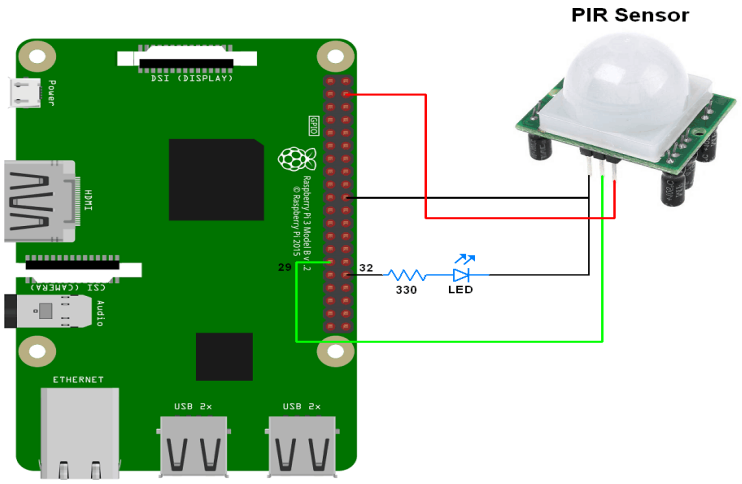


Рисунок 2.8 – Схемотехнічна інтеграція піроелектричного детектора руху в керуючий контур

2.3.3 Комутація силових релейних модулів керування навантаженням

Виконавчим ядром системи, що здійснює безпосередній фізичний вплив на освітлювальні прилади, є електромагнітний релейний модуль. Його головне інженерне завдання полягає у безпечній та безвідмовній комутації високовольтних кіл живлення LED-ламп за допомогою слабкострумових керівних сигналів мікрокомп'ютера. У розробленій апаратній архітектурі використано чотириканальний релейний блок, що дозволяє паралельно та абсолютно незалежно керувати чотирма окремими зонами або просторовими групами світильників. Використання такого багатоканального рішення оптимізує

монтажний простір у розподільчому щиті та дозволяє реалізовувати складні адаптивні сценарії підсвічування. Вкрай важливою функцією цього модуля є забезпечення надійної гальванічної ізоляції (шляхом використання оптопар) між чутливою мікропроцесорною логікою та небезпечною напругою побутової електромережі, що надійно захищає контролер від можливих струмів короткого замикання. Фізичне підключення модуля до плати керування здійснюється за чітко визначеним алгоритмом. Контакт живлення VCC релейної збірки сполучається з виводом 5 В мікрокомп'ютера, забезпечуючи струм, необхідний для спрацювання електромагнітних котушок. Сигнальні входи модуля, марковані як IN1, IN2, IN3 та IN4, підключаються до відповідних цифрових виводів Raspberry Pi. Згідно з розробленою топологією, порт IN1 з'єднується з GPIO17, порт IN2 підключається до GPIO27, порт IN3 комутується з GPIO22, а лінія IN4 виводиться на порт GPIO23. Детальна принципова схема цього силового сполучення представлена на рисунку 2.9.

Алгоритм взаємодії усіх вищеописаних компонентів працює за принципом безперервного циклу зворотного зв'язку. Мікрокомп'ютер Raspberry Pi постійно агрегує та аналізує вхідні електричні сигнали від цифрового люксметра та інфрачервоних сенсорів руху.

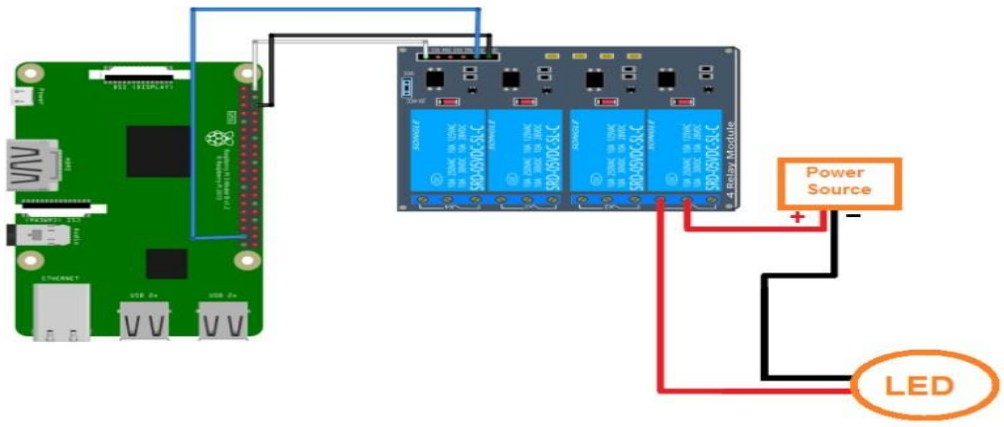


Рисунок 2.9 – Принципова електрична схема підключення чотириканального силового модуля реле

У момент, коли програмна логіка фіксує одночасне виконання двох критичних умов — наявність людини в зоні покриття та падіння рівня природної інсоляції нижче комфортного порогу — ядро системи генерує керівний імпульс

низької напруги на відповідному піні GPIO. Цей сигнал передається на вхід IN релейного модуля, ініціюючи протікання струму через котушку індуктивності та механічне замикання нормально відкритого контакту (NO) зі спільним виводом (COM). Унаслідок цього коло живлення світлодіодної лампи замикається, забезпечуючи освітлення приміщення. Якщо ж зовнішні умови нормалізуються (підвищується фонове освітлення або приміщення порожніє), мікроконтролер знімає керівну напругу, котушка реле знеструмлюється, механічний контакт розривається, і освітлювальний прилад миттєво деактивується. Таким чином, грамотно спроєктовані електричні схеми створюють міцний та надійний апаратний фундамент для довговічної експлуатації комплексу, гарантуючи високі показники економії електроенергії.

2.3 Характеристики та аналіз протоколів передачі даних у системі автоматизованого регулювання освітлення

Забезпечення високої експлуатаційної ефективності, блискавичної реакції та абсолютної надійності будь-якої сучасної системи автоматичного регулювання освітленості критично залежить від правильності вибору протоколів передачі інформації. Ці цифрові та аналогові стандарти зв'язку формують невидиму нервову систему апаратного комплексу, гарантуючи безперебійну взаємодію між різнорідними компонентами: прецизійними датчиками, силовими електромагнітними реле, центральними мікропроцесорними контролерами та іншими периферійними елементами інфраструктури розумного будинку. У цьому підрозділі здійснюється глибокий технічний аналіз основних комунікаційних протоколів та апаратних інтерфейсів, які інтегровані в розроблену систему для виконання специфічних завдань керування та моніторингу.

Фундаментальним стандартом для забезпечення комунікації між центральним мікрокомп'ютером та складними цифровими сенсорами виступає протокол I²C (Inter-Integrated Circuit). Цей послідовний інтерфейс обміну даними, розроблений інженерами компанії Phillips Electronics, здобув колосальну популярність у сфері проєктування вбудованих комп'ютерних систем завдяки

своїй елегантній простоті та високій універсальності. Головною технічною особливістю та беззаперечною перевагою I²C є використання виключно двопровідної шини: передача пакетів інформації здійснюється по лінії SDA, тоді як жорстка синхронізація цього процесу забезпечується тактовими імпульсами на лінії SCL. На відміну від протоколу SPI, який вимагає мінімум чотирьох провідників для встановлення зв'язку, I²C суттєво економить апаратні ресурси контролера та спрощує фізичний монтаж схем. Протокол підтримує багатопристроєву топологію, що дозволяє інженерам паралельно підключати десятки різноманітних сенсорів до однієї шини. Вирішення проблеми колізій (конфліктів) реалізується завдяки системі жорсткої апаратної адресації: кожен підлеглий пристрій (slave) наділяється унікальною семибітною шістнадцятковою адресою, до якої цілеспрямовано звертається головний контролер. У контексті даної кваліфікаційної роботи протокол I²C використовується для зняття високоточних телеметричних показників із цифрового люксметра TSL 2561, гарантуючи безпомилкову передачу даних про поточний рівень природної інсоляції до процесора Raspberry Pi. Хоча пропускна здатність I²C поступається швидкості SPI, її з величезним запасом вистачає для виконання рутинних завдань побутової та промислової автоматизації.

Спорідненим, але більш спеціалізованим стандартом є протокол SMBus. Він являє собою суворо оптимізовану модифікацію I²C, розроблену спеціально для низькошвидкісних застосунків, де на перше місце виходить не швидкість передачі мегабайтів інформації, а гарантована стабільність управління живленням та апаратним станом системи. Важливою відмінністю SMBus є сувора відповідність жорстким електричним та часовим стандартам, що унеможливлює зависання шини. Крім того, цей протокол підтримує механізм апаратних переривань (SMBALERT#). Це дозволяє периферійним пристроям самостійно інформувати центральний контролер про критичні зміни або аварійні події (наприклад, критичне падіння напруги або перегрів) без необхідності постійного програмного опитування з боку процесора, що радикально знижує обчислювальне навантаження на ядро Raspberry Pi та забезпечує миттєву реакцію автоматики на нештатні ситуації.

Для реалізації безпосереднього фізичного впливу на виконавчі механізми система покладається на базовий апаратний інтерфейс GPIO (General Purpose Input/Output). На відміну від складних пакетних протоколів, GPIO оперує тривіальними логічними рівнями напруги (високий/низький), що робить його ідеальним та абсолютно безвідмовним інструментом для прямого управління дискретними силовими елементами, такими як модулі електромагнітних або твердотільних реле. Виняткова програмована гнучкість цього інтерфейсу полягає в тому, що розробник може програмно конфігурувати кожен окремий контакт гребінки Raspberry Pi як вхід (для зчитування дискретних сигналів з PIR-датчиків руху чи фізичних кнопок) або як вихід (для генерації струму керування котушками реле). Саме через інтерфейс GPIO центральний контролер замикає контури живлення світлодіодних ламп на основі логічних висновків, сформованих після аналізу даних від цифрових сенсорів.

Виведення системи на сучасний рівень користувацької взаємодії вимагає імплементації засобів віддаленого доступу. Для вирішення цього завдання в апаратну архітектуру закладено використання глобального бездротового стандарту Wi-Fi (сімейство IEEE 802.11). Наявність вбудованого мережевого модуля на платі Raspberry Pi 4 дозволяє без залучення додаткових апаратних маршрутизаторів підключити локальну систему управління освітленням до всесвітньої мережі Інтернет. Це відкриває надзвичайно широкий діапазон можливостей: від тривіального дистанційного вмикання світла зі смартфона до глибокої інтеграції з хмарними сервісами (Cloud IoT) для збору багатомісячної статистики енергоспоживання, аналітики поведінкових патернів (Big Data) та предиктивного управління інфраструктурою об'єкта в режимі реального часу. Для зручності інженерного аналізу та обґрунтування вибору, порівняльні техніко-експлуатаційні характеристики розглянутих протоколів зведено у таблицю 2.3.

Таблиця 2.3

Порівняльна техніко-експлуатаційна характеристика комунікаційних протоколів та інтерфейсів

Найменування протоколу	Головне функціональне	Відносна швидкість	Рівень інженерної	Показник загальної енергоефективності

	призначення в системі	передачі даних	складності реалізації	
I²C (Inter-Integrated Circuit)	Цифрова комунікація зі складними сенсорами та АЦП	Середня (до 400 кбіт/с у швидкому режимі)	Низька (наявність готових апаратних контролерів)	Висока
SMBus (System Management Bus)	Низькорівневе управління живленням та моніторинг	Низька (до 100 кбіт/с)	Низька (апаратна сумісність з I²C)	Висока
GPIO (General Purpose I/O)	Пряме керування реле та зчитування дискретних сигналів	Висока (обмежена тактовою частотою шини)	Середня (потребує гальванічної розв'язки)	Дуже висока
Wi-Fi (IEEE 802.11)	Глобальне віддалене керування та хмарна інтеграція	Надвисока (сотні Мбіт/с)	Висока (складний мережевий стек та криптографія)	Низька

Підсумовуючи архітектурні рішення даної кваліфікаційної роботи, можна констатувати, що обраний технологічний стек створює оптимальний баланс. Використання шини I²C для опитування люксметра гарантує прецизійну точність без перевантаження процесора, застосування GPIO для реле та PIR-датчиків забезпечує нульову затримку реакції (latency), а інтеграція бездротового модуля Wi-Fi перетворює локальний контролер на повноцінний вузол Інтернету речей.

З практичної точки зору, механізм інформаційного обміну на шині I²C ініціюється виключно головним пристроєм (master), роль якого незмінно виконує Raspberry Pi. Процес транзакції починається з генерації стартового біта (Start Condition), після чого мікрокомп'ютер надсилає у лінію SDA унікальну семибітну адресу необхідного підлеглого пристрою (slave). Якщо на шині присутній сенсор із такою адресою, він підтверджує свою готовність. Наступним кроком master вказує напрямок передачі даних (читання або запис — R/W біт) та очікує на біт підтвердження (ACK) від сенсора. Лише після цього успішного "рукостискання" починається безпосередня передача корисного навантаження — байтів даних, які несуть інформацію про рівень освітленості.

Для практичної реалізації цього протоколу на платформі Raspberry Pi необхідне попереднє програмне конфігурування ядра операційної системи (Raspberry Pi OS), оскільки за замовчуванням апаратні інтерфейси I²C та SPI деактивовані задля економії ресурсів та уникнення конфліктів на виводах GPIO. Налаштування здійснюється через консольну утиліту конфігурації. Інженер повинен відкрити термінал і виконати команду з правами суперкористувача: sudo raspi-config. В інтерактивному псевдографічному меню, використовуючи клавіші навігації, необхідно перейти до розділу параметрів периферії «Interfacing Options». У цьому розділі зосереджені перемикачі для активації всіх апаратних шин мікрокомп'ютера. Далі слід обрати пункт «P5 I2C», який відповідає за автоматичне завантаження відповідного модуля ядра під час старту операційної системи. Після підтвердження вибору система автоматично внесе необхідні зміни до конфігураційних файлів та оновить дерево пристроїв. Про успішне завершення операції активації протоколу користувача сповістить відповідне діалогове вікно, зовнішній вигляд якого для наочності зафіксовано на рисунку 2.10.

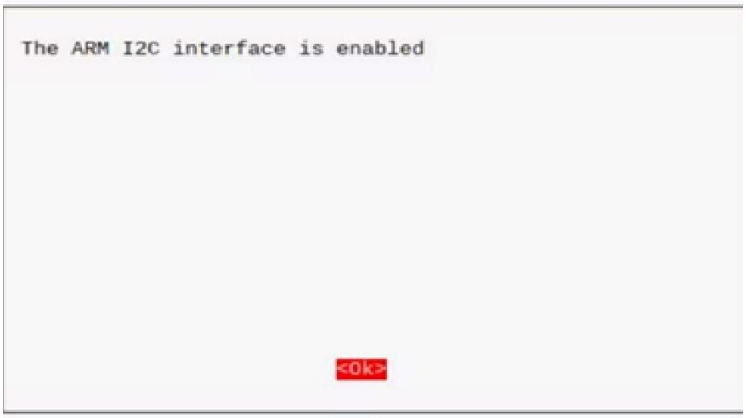


Рисунок 2.10 – Інтерфейс системної утиліти з підтвердженням успішної ініціалізації апаратного модуля I²C

Альтернативним, більш низькорівневим методом конфігурування, який часто застосовується системними адміністраторами для автоматизації розгортання систем, є пряме редагування глобального конфігураційного файлу завантажувача. Для цього в терміналі необхідно викликати текстовий редактор командою <*sudo nano /boot/config.txt*>.

У відкритому системному файлі слід знайти закоментований рядок параметра ініціалізації <*#dtparam=i2c_arm=on*>. Для активації шини достатньо видалити символ октоторпа (#) на початку рядка (розкоментувати директиву), зберегти зміни у файлі та виконати примусове перезавантаження мікрокомп'ютера. Фрагмент відредагованого конфігураційного файлу, що демонструє цей процес, наведено на рисунку 2.11.

```
# Uncomment some or all of these to enable the optional hardware interfaces
dtparam=i2c_arm=on
#dtparam=i2s=on
```

Рисунок 2.11 – Фрагмент файлу /boot/config.txt з активованою директивою підтримки протоколу I²C

Успішна апаратна комутація та низькорівнева конфігурація операційної системи формують міцний базис для переходу до фінального та найскладнішого етапу проєктування — розробки прикладного програмного забезпечення. Наступні кроки передбачають написання високорівневих скриптів (переважно мовою Python), які візьмуть на себе рутинні завдання з циклічного опитування цифрових і аналогових регістрів сенсорів, математичної фільтрації шумів, обчислення адаптивних порогів спрацювання реле та забезпечення надійної маршрутизації даних до веб-інтерфейсу для віддаленого моніторингу користувачем.

2.4 Проєктування базових та спеціалізованих режимів роботи автоматизованої системи

Процес проєктування функціональних режимів роботи є критично важливим етапом створення будь-якої сучасної автоматизованої системи регулювання освітлення (АСО). Саме на цьому етапі визначається архітектура програмної логіки, яка диктує, яким чином апаратний комплекс реагуватиме на динамічні зміни зовнішніх умов навколишнього середовища, прямі керівні команди користувача та інформаційні сигнали від сенсорної мережі. Для забезпечення максимальної універсальності, високого рівня експлуатаційної зручності та безпрецедентної енергетичної ефективності, у розробленій системі на базі мікрокомп'ютера Raspberry Pi було імплементовано багаторівневу

структуру керування. Враховуючи специфіку інтеграції високоточного цифрового люксметра TSL 2561, інфрачервоних піроелектричних детекторів присутності (PIR) та багатоканальних силових релейних модулів, головний інженерний акцент під час розробки алгоритмів було зроблено на досягненні максимальної адаптивності системи до потреб людини. Загалом у межах даної кваліфікаційної роботи було спроєктовано та програмно реалізовано п'ять незалежних функціональних режимів роботи, кожен з яких оптимізовано під виконання конкретного спектра завдань.

Фундаментальним та найбільш енергоощадним станом системи є режим повністю автоматичного керування освітленням. У цьому стані мікрокомп'ютер Raspberry Pi працює автономно, безперервно спираючись на масиви даних, що в режимі реального часу надходять від підсистеми моніторингу природної інсоляції (TSL 2561) та датчиків просторового сканування (PIR). Програмний алгоритм беззупинно аналізує співвідношення між поточним рівнем фонового освітлення та фізичною присутністю людей у приміщенні. Якщо математичний фільтр фіксує падіння рівня природного світла нижче заздалегідь запрограмованого комфортного порогу, і при цьому інфрачервоні датчики підтверджують наявність руху в робочій зоні, центральний процесор генерує керівний імпульс на електромагнітні реле, які миттєво замикають контури живлення світлодіодних ламп. І навпаки, як тільки рух у приміщенні припиняється на визначений проміжок часу (спрацьовує таймер затримки вимкнення), або ж рівень сонячного світла з вікон стає достатнім для виконання зорових завдань, мікроконтролер розриває силові кола, деактивуючи штучне освітлення задля максимізації економії електричної енергії.

Незважаючи на високий рівень автоматизації, архітектура системи передбачає наявність режиму пріоритетного ручного керування. Цей стан є вкрай необхідним для випадків, коли стандартна алгоритмічна логіка не відповідає поточним нестандартним потребам користувача, або ж її робота є тимчасово небажаною. У цьому режимі управління світловими приладами здійснюється класичним способом — за допомогою фізичних настінних вимикачів, електрично сполучених із портами вводу-виводу (GPIO) керуючого

контролера. Важливо зазначити, що при переході в цей режим мікрокомп'ютер програмно ігнорує будь-які тригерні сигнали від датчиків руху та освітленості, передаючи повний та безумовний контроль над станом реле безпосередньо в руки людини.

Еволюційним розвитком ручного контролю є режим дистанційного керування через глобальну мережу Інтернет. Завдяки наявності інтегрованого модуля бездротового зв'язку Wi-Fi на платі Raspberry Pi та розгорнутому локальному веб-серверу, цей режим знімає будь-які просторові обмеження щодо управління інфраструктурою розумного будинку. Користувач отримує можливість примусово вмикати, вимикати або димірувати окремі групи світильників за допомогою захищеного веб-інтерфейсу або спеціалізованого мобільного додатку на смартфоні, перебуваючи на будь-якій відстані від об'єкта. Окрім прямого управління, веб-орієнтований інтерфейс виконує функцію потужної панелі моніторингу (дашборду), де в режимі реального часу візуалізується поточний стан (статус) усіх релейних каналів, точні показання люксметра в числових значеннях та логічні стани інфрачервоних детекторів присутності.

З метою забезпечення хронобіологічного комфорту в нічний час доби було розроблено спеціалізований нічний режим роботи. Головне завдання цього сценарію — створення безпечних умов для орієнтації та пересування людей у темряві без подразнення органів зору яскравим світлом, яке може порушити циркадні ритми (цикли сну). При активації цього режиму система блокує увімкнення основних (потужних) джерел світла, задіюючи натомість лише одну або дві малопотужні чергові лампи, або ж програмно знижує яскравість основного освітлення за допомогою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Перехід у цей стан може відбуватися як примусово за командою користувача, так і повністю автоматично — спираючись на системний годинник реального часу (наприклад, за розкладом з 23:00 до 06:00).

Окремої уваги заслуговує розробка екстреного (аварійного) режиму роботи, який тісно інтегрує підсистему освітлення із загальним контуром безпеки будівлі. Цей пріоритетний стан може бути ініційований користувачем вручну

(так звана функція "паніка") або активований автоматично при отриманні відповідного тригерного сигналу від суміжних інженерних мереж (охоронної або пожежної сигналізації). При переході в екстрений режим керуючий контролер миттєво ігнорує всі попередні налаштування, таймери та показники сенсорів, безапеляційно активуючи всі наявні в будівлі освітлювальні прилади на максимальну потужність. Це гарантує максимально високий рівень видимості, необхідний для безпечної та швидкої евакуації персоналу або для фіксації порушників камерами відеоспостереження під час нештатних чи надзвичайних ситуацій.

Для наочного розуміння внутрішньої логіки та інформаційної взаємодії всіх складових частин програмного забезпечення було розроблено загальну алгоритмічну структурну схему, яку наведено на рисунку 2.12. Ця блок-схема детально відображає архітектуру маршрутизації сигналів: від моменту зчитування первинних даних із вимірювальних перетворювачів до етапу генерації керуючого струму на електромагнітні котушки виконавчих механізмів. Вона ілюструє, як ядро операційної системи Raspberry Pi диференціює вхідні потоки даних від люксметрів, детекторів руху, фізичних кнопок та веб-сервера, спрямовуючи їх у відповідні гілки алгоритму залежно від поточного обраного режиму функціонування комплексу.

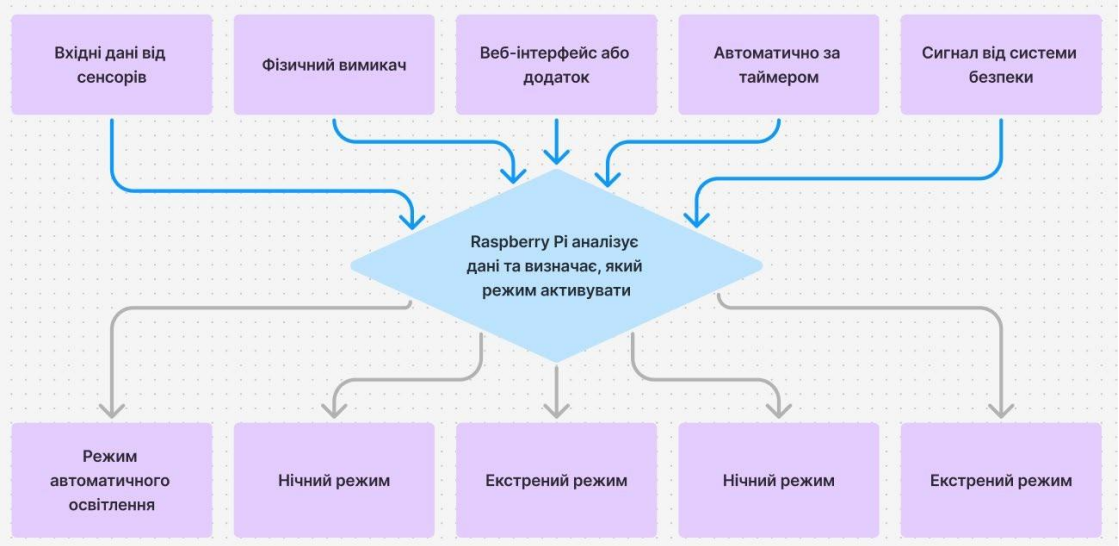


Рисунок 2.12 – Структурно-алгоритмічна блок-схема функціонування базових та спеціалізованих режимів системи

Для проведення об'єктивного аналізу розроблених сценаріїв керування, у таблиці 2.4 здійснено комплексне порівняння ключових функціональних характеристик, специфічних особливостей програмної реалізації та загального рівня енергоефективності кожного з п'яти описаних вище режимів.

Таблиця 2.4 – Порівняльна техніко-експлуатаційна характеристика розроблених алгоритмічних режимів роботи

Найменування режиму	Базовий тригер активації (спосіб запуску)	Специфічні особливості функціонування алгоритму	Відносний рівень енергоспоживання
Повністю автоматичний	Безперервний потік даних від сенсорної мережі	Апаратна реакція виключно на фізичний рух та рівень сонячної інсоляції	Мінімально можливий (максимальна економія)
Пріоритетний ручний	Комутація фізичного настінного вимикача	Безумовне керування світлом з ігноруванням сенсорів середовища	Нестабільний (прямо залежить від дисципліни користувача)
Глобальний дистанційний	HTTP-запит через веб-інтерфейс або мобільний додаток	Віддалене управління логікою через мережу Інтернет з будь-якої точки світу	Варіативний (залежить від встановлених користувачем умов)
Нічний (хронобіологічний)	Спрацювання програмного таймера за розкладом	Активація виключно малопотужного чергового освітлення для безпечної навігації	Дуже низький (робота на знижених потужностях)
Екстрений (аварійний)	Сигнал тривоги від суміжних систем безпеки будівлі	Блокування алгоритмів енергозбереження, вмикання всіх джерел світла на 100%	Максимально високий (пріоритет безпеки над економією)

Підсумовуючи результати даного підрозділу, слід зазначити, що розробка та програмна імплементація п'яти незалежних режимів роботи (автоматичного, ручного, дистанційного, нічного та екстреного) перетворює спроєктований

апаратний комплекс на гнучку, високоадаптивну та інтелектуальну інженерну інфраструктуру. Кожен із запропонованих сценаріїв покриває специфічний пласт експлуатаційних потреб, гарантуючи користувачам не лише високий рівень побутового комфорту та безпеки, але й забезпечуючи безпрецедентно глибоку оптимізацію витрат електричної енергії. Наведена алгоритмічна модель доводить, що грамотне програмне об'єднання розрізнених апаратних сенсорів та виконавчих реле під управлінням потужної операційної системи Raspberry Pi дозволяє вирішувати найскладніші завдання з автоматизації сучасних будівель.

Висновки до розділу 2

У другому розділі кваліфікаційної роботи було здійснено комплексне проєктування апаратної архітектури та обґрунтовано вибір елементної бази для створення адаптивної системи автоматичного керування освітленням. Центральним обчислювальним та координаційним вузлом обрано мікрокомп'ютер Raspberry Pi 4, потужності якого цілком достатньо для агрегації даних, виконання багатофакторних алгоритмів та повноцінної підтримки IoT-інтеграції. Інформаційне забезпечення системи реалізовано за допомогою цифрових люксметрів TSL 2561 для моніторингу природної інсоляції та інфрачервоних PIR-сенсорів для детекції фізичної присутності людей. В якості виконавчих механізмів застосовано модулі електромагнітних реле, які забезпечують безпечну комутацію енергоефективних світлодіодних (LED) ламп та захищають мікропроцесорну логіку від високовольтної напруги.

Розроблено принципові електричні схеми фізичного сполучення всіх електронних модулів, що є критично важливим для забезпечення стабільності, довговічності та електричної безпеки функціонування інфраструктури розумного будинку. Здійснено технічний аналіз та вибір оптимальних комунікаційних інтерфейсів: двопровідна шина I^2C використовується для прецизійного зчитування показників освітленості без перевантаження процесора, інтерфейс GPIO забезпечує пряме керування реле з нульовою затримкою реакції, а бездротовий стандарт Wi-Fi дозволяє системі функціонувати як повноцінний вузол глобальної мережі Інтернету речей.

На базі спроєктованої апаратної платформи розроблено структурно-алгоритмічну логіку та імплементовано п'ять незалежних функціональних режимів роботи: повністю автоматичний, пріоритетний ручний, глобальний дистанційний, спеціалізований нічний (хронобіологічний) та екстрений (аварійний). Такий багаторівневий підхід перетворює апаратний комплекс на гнучку та високоадаптивну інженерну інфраструктуру, яка гарантує користувачам високий рівень комфорту та безпеки. Успішне програмне об'єднання розрізнених сенсорів та виконавчих механізмів під управлінням операційної системи Raspberry Pi забезпечує безпрецедентно глибоку оптимізацію витрат електричної енергії та ефективно вирішує завдання автоматизації сучасних будівель.

РОЗДІЛ 3 МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АДАПТИВНОЇ СИСТЕМИ ОСВІТЛЕННЯ

3.1 Моделювання та результат дослідження автоматизованої системи освітлення

Головним завданням етапу комп'ютерного та математичного моделювання розробленої автоматизованої системи керування освітленням (АСО) є всебічний аналіз її функціонування в умовах, що максимально точно відтворюють реальне експлуатаційне середовище. Цей процес дозволяє здійснити глибоку оцінку технічної ефективності закладених алгоритмів управління до моменту їхнього фізичного впровадження на об'єкті. Спроєктована кіберфізична система органічно інтегрує в собі різнорідні апаратні компоненти, серед яких прецизійні сенсори освітленості, інфрачервоні піроелектричні датчики виявлення руху (PIR), електромагнітні модулі реле та енергоефективні світлодіодні джерела світла. Усе це обладнання працює під управлінням спеціалізованого програмного забезпечення, головна мета якого полягає у радикальній оптимізації енергоспоживання при одночасному забезпеченні безкомпромісного рівня комфорту для кінцевих користувачів.

Для детального дослідження поведінкових патернів АСО було створено комплекс імітаційних моделей, які з високою точністю відтворюють реакцію апаратно-програмного комплексу на динамічні зміни рівня природної сонячної інсоляції, міграцію мешканців усередині приміщення та активацію різноманітних користувацьких сценаріїв роботи. Отримані результати віртуальної апробації дають змогу об'єктивно оцінити загальну енергетичну ефективність розробки у порівнянні з класичними некерованими мережами освітлення та остаточно підтвердити абсолютну відповідність реакцій системи заданим логічним алгоритмам. Базові вхідні дані, що використовувалися для налаштування середовища моделювання, систематизовано та наведено у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Базові конфігураційні параметри та граничні умови для проведення комп'ютерного моделювання

Параметр	Значення
Рівень освітленості (Ранок, 6:00–9:00)	50 люкс – 100 люкс
Рівень освітленості (День, 9:00–17:00)	200 люкс – 300 люкс
Рівень освітленості (Вечір, 17:00–22:00)	50 люкс – 100 люкс
Рівень освітленості (Ніч, 22:00–6:00)	0 люкс – 50 люкс
Активність PIR-датчика (День-Ніч)	0 % – 10 %
Активність PIR-датчика (Ранок-Вечір)	80 %
Потужність лампи	12 Вт
Кількість ламп	4
Об’єкт моделювання - квартира	50 м²
Сторона світу	захід

Спираючись на вищезазначені граничні параметри, було ініційовано поетапне комп'ютерне моделювання робочих процесів системи. Процедура тестування охоплювала симуляцію обсягів енергоспоживання в різних експлуатаційних режимах, перевірку коректності апаратної взаємодії електронних компонентів між собою, а також оцінку загальної практичності впровадження подібного комплексу в житловий простір. На першому етапі було здійснено ізольоване моделювання витрат електричної енергії протягом однієї доби за умови використання виключно підсистеми моніторингу природного світла, що проілюстровано на рисунку 3.1. Такий роздільний, модульний підхід до тестування є критично необхідним для глибокого розуміння впливу кожної окремої групи сенсорів на загальну картину енергозбереження.

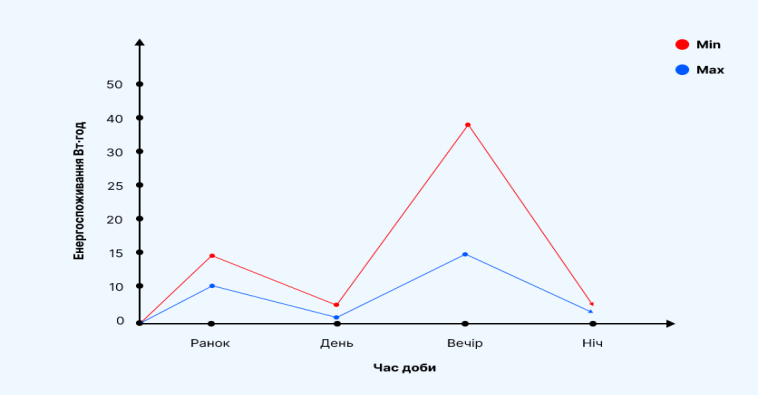


Рисунок 3.1 – Графік розподілу енерговитрат протягом доби за умови ізольованого використання сенсорів освітленості

Наведена діаграма яскраво демонструє динаміку коливань енергоспоживання, яка обернено пропорційно залежить від інтенсивності природного освітлення протягом двадцяти чотирьох годин. Керуючий алгоритм дозволяє активувати штучні джерела світла виключно в ті моменти, коли рівень фонової інсоляції падає нижче критичного порогу в 100 люкс. Цілком закономірно, що найменші показники споживання електроенергії фіксуються в нічний час: хоча рівень природного світла у цей період є нульовим, система жорстко оптимізує кількість активних ламп відповідно до базових потреб орієнтації в просторі. Аналіз діаграми підтверджує здатність інтелектуальної системи радикально зменшувати споживання енергії у світлу пору доби шляхом повної передачі функції освітлення природним джерелам. У нічні ж години, коли рівень освітленості варіюється в межах від 0 до 50 люкс, мікроконтролер активує лише мінімально необхідну кількість випромінювачів, гарантуючи базовий комфорт при збереженні режиму жорсткої економії.

Для кращого розуміння зовнішніх факторів впливу, наступна діаграма, зображена на рисунку 3.2, візуалізує хронологічну зміну інтенсивності природного світла в приміщенні. Очікувано, що в денний час показники люксметра досягають свого пікового значення, коливаючись у діапазоні від 200 до 300 люкс, тоді як із настанням темряви вони стрімко деградують до значень 0–50 люкс.

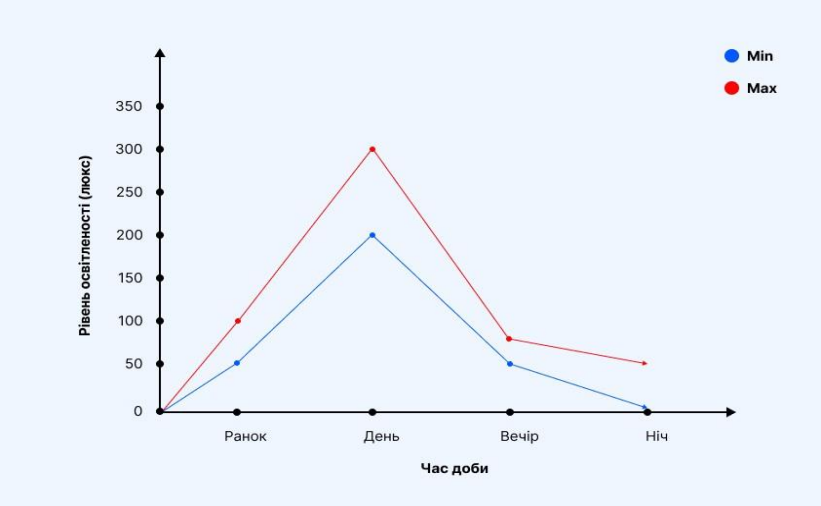


Рисунок 3.2 – Добова динаміка коливань рівня природної інсоляції в приміщенні

Представлений графік формує чітке уявлення про фізичну природу зміни освітленості впродовж доби, що є фундаментальною базою для тонкого калібрування тригерів мікроконтролера задля максимального використання безкоштовного денного світла. Співставлення цих двох графіків виявляє пряму математичну кореляцію між обсягом спожитих кіловат-годин та поточним станом навколишнього середовища, що детально відображено на рисунку 3.3. Це є беззаперечним доказом того, що кіберфізична система успішно адаптується до будь-яких флуктуацій зовнішніх умов, гнучко та своєчасно комутуючи силові кола. Під час інтерпретації результатів моделювання також критично важливо брати до уваги низку макрофакторів: загальну статистику сонячних днів у конкретному регіоні, архітектурну орієнтацію вікон за сторонами світу, специфіку місцевої кліматичної зони та виражені сезонні коливання. Наприклад, в осінньо-зимовий період тривалість світлового дня стрімко падає, що неминуче веде до пропорційного збільшення навантаження на виконавчі реле. Крім того, на кінцеву ефективність збирання денного світла суттєво впливають оптичні властивості склопакетів, здатних затримувати значну частину фотонного потоку.

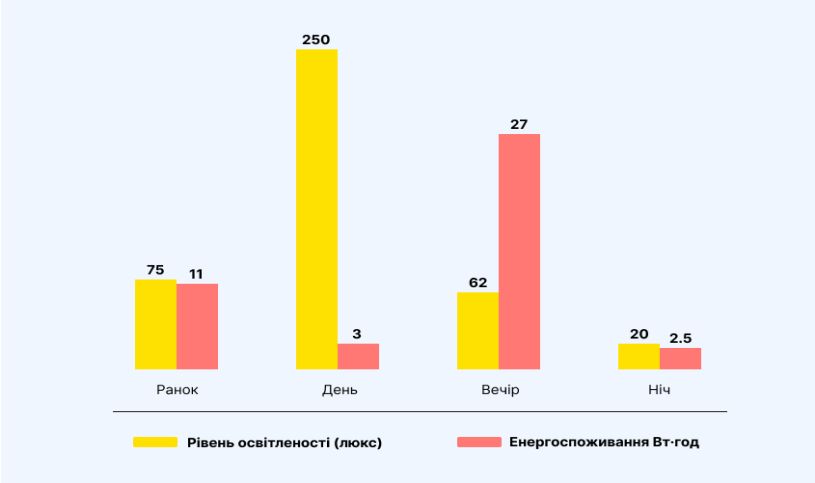


Рисунок 3.3 – Кореляційна залежність між обсягом спожитої електроенергії та інтенсивністю фонового світла

Запропонована діаграма розкриває алгоритм ступінчастої активації навантаження. Комплекс диференційовано підключає лампи до мережі: в умовах абсолютної темряви (0–50 люкс) система задіює весь свій потенціал, вмикаючи всі 4 лампи; при настанні сутінків (50–100 люкс) навантаження зменшується вдвічі (працюють 2 лампи), а при досягненні порогу у 200 люкс освітлювальна мережа повністю знеструмлюється. Такий багатоступеневий підхід гарантує точкову економію саме тоді, коли природне світло може частково компенсувати потребу в штучному. Наступним етапом дослідження став ізольований аналіз підсистеми детекції переміщень. Діаграма на рисунку 3.4 демонструє добовий розподіл активності інфрачервоного піроелектричного сенсора. Абсолютні піки спрацювань цілком передбачувано припадають на ранкові (20 відсотків) та вечірні (30 відсотків) години, тоді як у розпал робочого дня та глибокої ночі рівень реєстрації рухів падає нижче 10 відсотків. Така статистика є прямим відображенням соціальних та побутових ритмів життя людини: зранку та ввечері мешканці активно готуються до роботи або відпочивають у загальних зонах (кухня, вітальня), а вдень і вночі приміщення перебувають у стані спокою.

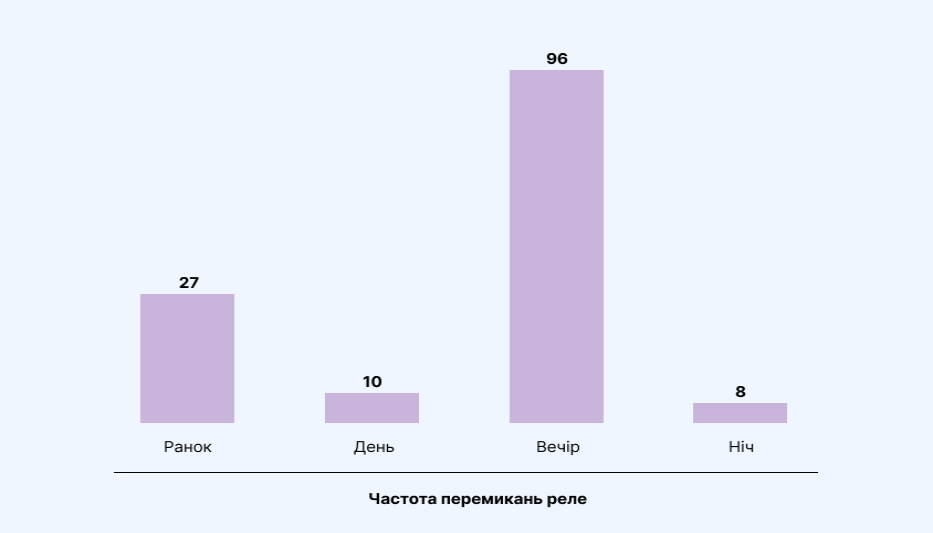


Рисунок 3.4 – Хронологічний розподіл спрацювань інфрачервоного детектора присутності протягом доби

Сенсор просторового сканування виступає критичним тригером, що запобігає марнотратному спалюванню енергії в порожніх кімнатах. Закономірності, виявлені під час аналізу активності PIR-датчика, мають прямий вплив на показники механічного зносу виконавчої апаратури. Діаграма, наведена на рисунку 3.5, візуалізує статистику частоти замикань та розмикань контактних груп реле залежно від часу доби. Рекордні 96 циклів комутації зафіксовано у вечірній час, що повністю збігається з піком домашньої активності родини. Ранковий етап характеризується більш стриманим показником у 27 перемикань, що пояснюється локалізованим характером ранкових зборів. У період денної відсутності господарів кількість спрацювань падає до мінімуму (менше 10 циклів), а вночі фіксується близько 8 випадкових активацій, спричинених нетривалими переміщеннями. Оптимізація цього параметра за допомогою програмних таймерів затримки вимкнення дозволяє не лише нівелювати стрибки напруги, але й кардинально подовжити термін служби як самих релейних модулів, так і світлодіодних драйверів.

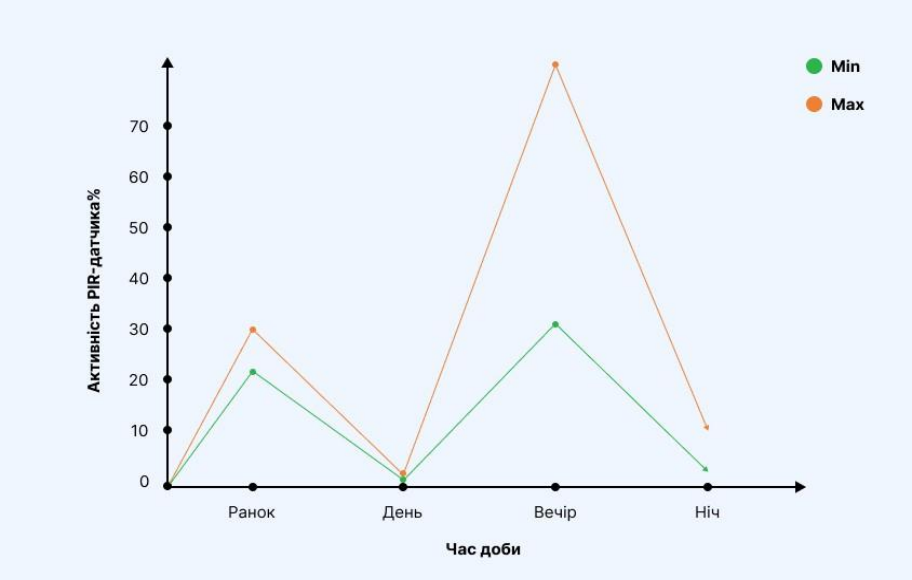


Рисунок 3.5 – Статистика частоти комутації електромагнітних реле в розрізі добового часу

Для завершення картини роздільного тестування було побудовано графік енергоспоживання системи, керованої виключно алгоритмами виявлення руху, який представлено на рисунку 3.6.

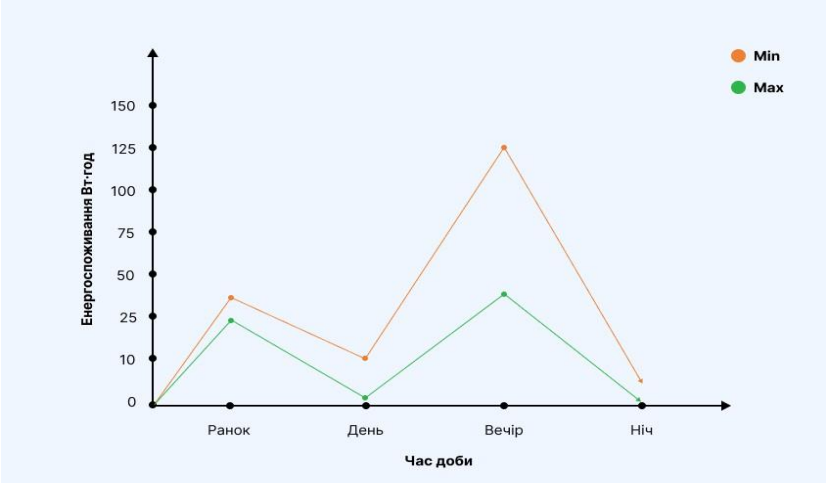


Рисунок 3.6 – Обсяги добового енергоспоживання за умови використання виключно детекторів руху

Результати доводять, що використання PIR-датчиків як єдиного інструменту автоматизації дає блискучі результати в приміщеннях без вікон або в нічний час доби, однак у світлий період такий підхід призводить до хибних вмикань світла.

Саме тому архітектура системи передбачає злиття даних від обох типів перетворювачів. Проаналізувавши ізольовану роботу підсистеми детекції простору, можна вивести чітку залежність енергоспоживання від поведінкових факторів, що проілюстровано на рисунку 3.7.

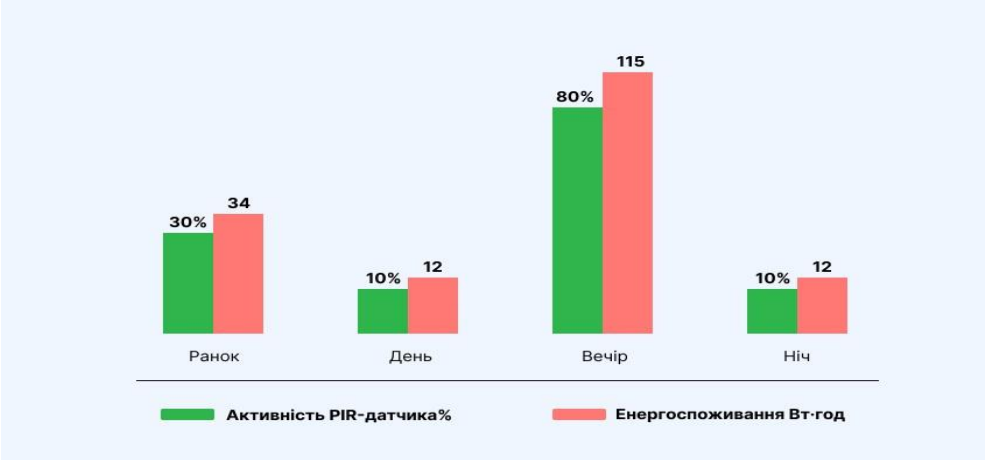


Рисунок 3.7 – Математична залежність витрат електроенергії від інтенсивності переміщень (активності PIR-сенсорів)

Отримані статистичні дані розкривають глибоку кореляцію між пересуваннями мешканців та навантаженням на електромережу. Зокрема, у вечірній період при 80 відсотках системної активності та 96 перемиканнях реле, споживання сягає абсолютного добового піку в 115 Вт·год. Ранковий цикл при 30 відсотках активності генерує навантаження на рівні 34 Вт·год. Водночас у денні та нічні фази простою (коли активність не перевищує 10 відсотків), споживання стабілізується на рівні 10 Вт·год. Такий чіткий розподіл наочно доводить, що інвестиції в адаптивні алгоритми управління виправдовують себе, забезпечуючи тонку балансировку між користувацьким комфортом та фінансовою економією. Однак найвищого рівня енергетичної ефективності вдається досягти лише за умови синергетичного поєднання інфрачервоних сенсорів та люксметрів, що фундаментально доведено на діаграмі рисунка 3.8. Вона відображає загальний енергетичний профіль комплексу, де мікропроцесор аналізує масиви даних за допомогою логічного оператора "І", унеможливлюючи вмикання світла вдень, навіть якщо кімната повна людей.

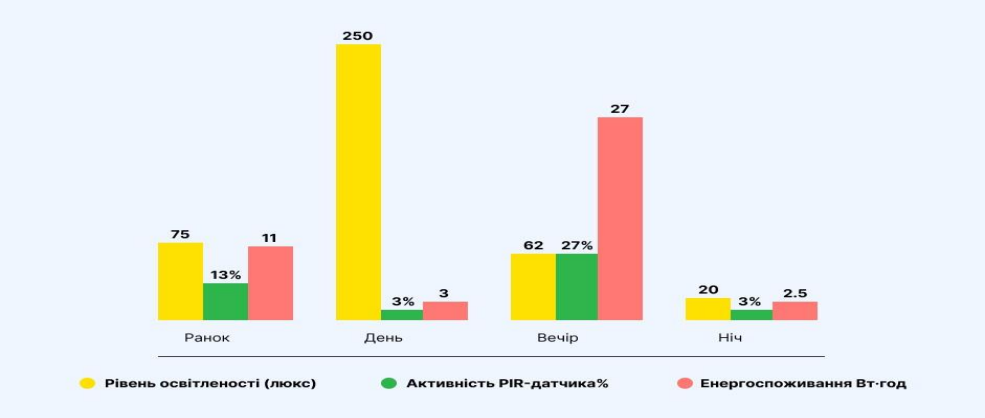


Рисунок 3.8 – Синергетичний ефект енергоспоживання при комплексному використанні обох типів сенсорів

Порівняльний аналіз беззаперечно свідчить, що комбінований алгоритм перевершує будь-які інші конфігурації. У вечірній час, незважаючи на максимальну активність людей (80 відсотків) і недостатність освітлення (50–100 люкс), комплексне споживання становить близько 72 Вт·год, оскільки система динамічно зменшує інтенсивність штучного світла завдяки залишковій природній інсоляції. Вранці цей показник становить близько 27 Вт·год. Найважливішим досягненням є денний період (200–300 люкс): тут система споживає мізерні 10 Вт·год (переважно на живлення самого мікрокомп'ютера та чергових ланцюгів), адже високий рівень денного світла жорстко блокує спрацювання реле незалежно від сигналів датчиків руху. Нічний профіль також залишається стабільно низьким. Загалом, завдяки апаратному злиттю (sensor fusion), витрати електроенергії у вечірній час зменшуються на 25–30 відсотків навіть у порівнянні з системою, обладнаною лише датчиками руху.

Загальне навантаження на електромережу будівлі прямо визначається активованим алгоритмічним сценарієм. Для порівняльної оцінки на рисунку 3.9 наведено гістограму інтенсивності використання енергетичних ресурсів у чотирьох ключових режимах: автоматичному, нічному, ручному та екстреному. Аналіз повністю автоматичного режиму фіксує середньодобове споживання на рівні 121 Вт·год, що є оптимальним компромісом між безпекою та економією. Нічний режим (хронобіологічний сценарій) демонструє еталонну ефективність із показником у 36 Вт·год на добу, оскільки обмежується локальним черговим підсвічуванням. Натомість активація пріоритетного ручного режиму

прогнозовано підвищує добові витрати до 144 Вт·год, повертаючи в процес людський фактор та схильність до нераціонального використання світла. Окремо стоїть екстрений (аварійний) режим, який лише за одну годину форсованої роботи спалює близько 48 Вт·год, проте цей показник є цілком виправданим, враховуючи необхідність забезпечення тотальної видимості під час надзвичайних ситуацій.

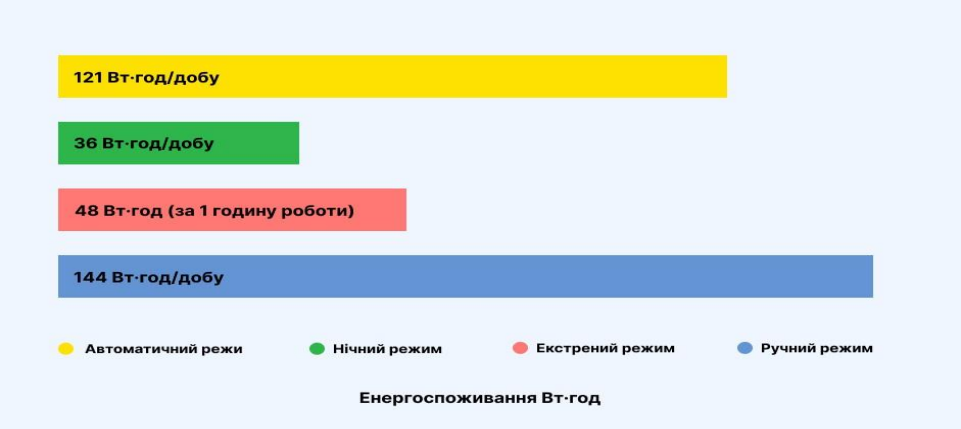


Рисунок 3.9 – Порівняльна гістограма інтенсивності енергоспоживання залежно від активованого режиму керування

Фінальним етапом моделювання стало комплексне техніко-економічне порівняння житлового об'єкта, обладнаного традиційними механічними вимикачами, та квартири з повністю імплементованою кіберфізичною системою освітлення на базі Raspberry Pi. Отримані результати, візуалізовані на рисунку 3.10, надають вичерпну відповідь щодо доцільності інвестицій у технології розумного будинку.

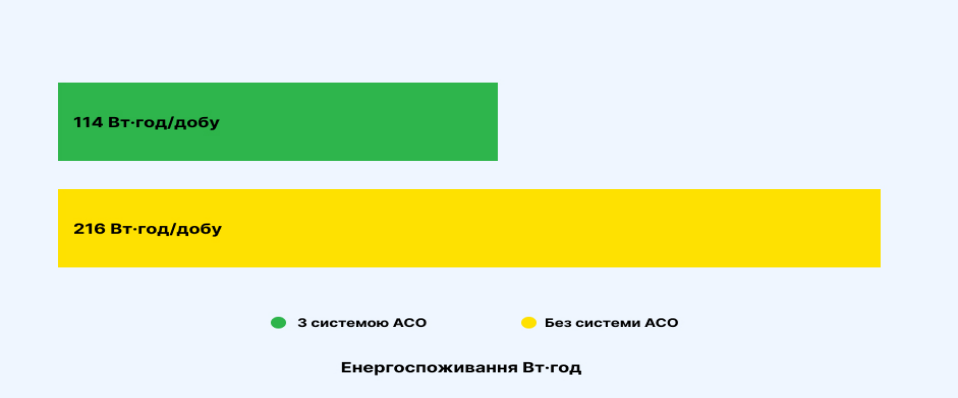


Рисунок 3.10 – Порівняльний аналіз добових енерговитрат класичної та автоматизованої мереж освітлення

Дослідження показало, що у квартирі без елементів автоматизації ранковий збір родини супроводжується роботою всіх чотирьох ламп протягом двох годин (96 Вт·год). Після повернення людей додому у вечірній час лампи безперервно світяться ще близько трьох годин, додаючи до балансу 108 Вт·год, а нічні епізодичні вмикання забирають ще 12 Вт·год. Сумарне добове споживання при цьому сягає 216 Вт·год. На противагу цьому, інфраструктура з інтегрованою АСО оптимізує кожен з етапів. Зранку активуються лише ті зони, де безпосередньо фіксується рух (36 Вт·год). Увечері система точково підсвічує простір за маршрутом пересування мешканців (72 Вт·год), а вночі блискавично вмикає і вимикає чергове світло (6 Вт·год). У результаті, загальне споживання модернізованого об'єкта не перевищує 114 Вт·год на добу. Детальна статистика цих вимірювань зафіксована у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2

Зведена статистика споживання електричної енергії в розрізі добових періодів

Час доби	Традиційна некерована система освітлення (Вт·год)	Адаптивна автоматизована система освітлення (Вт·год)
Ранок (6:00–9:00)	96	36
День (9:00–17:00)	0	0
Вечір (17:00–22:00)	108	72
Ніч (22:00–6:00)	12	6
Загальний добовий показник	216	114

Спираючись на ці беззаперечні метричні дані, можна з впевненістю констатувати, що впровадження розробленої архітектури дозволяє знизити енергоспоживання на 59 відсотків порівняно з базовим неавтоматизованим сценарієм. Такий вражаючий результат є прямим наслідком виключення так званої холостої роботи освітлювальних приладів. Інтелектуальна система гарантує ідеальний баланс, забезпечуючи високий візуальний комфорт виключно в той момент і в тому місці, де це фізіологічно необхідно людині. Більше того, радикальне скорочення часу безперервного світіння нівелює ризик теплової деградації кристалів світлодіодних ламп, значно збільшуючи їхній експлуатаційний ресурс. Таким чином, проведене багатокритеріальне моделювання остаточно доводить, що проєктування та встановлення

кіберфізичних систем освітлення є не просто сучасним технологічним трендом, а економічно обґрунтованим та екологічно необхідним кроком до сталого використання світових енергетичних ресурсів.

3.2 Результати емпіричного дослідження автоматизованої системи освітлення

Впровадження інтелектуальних автоматизованих систем керування освітленням (АСО) являє собою передовий інженерний підхід до оптимізації інфраструктури сучасних будівель, що дозволяє не лише кардинально знизити обсяги споживання дефіцитних енергоресурсів, але й забезпечити безпрецедентний рівень візуального та експлуатаційного комфорту для кінцевих користувачів. З метою практичного підтвердження теоретичної ефективності розроблених апаратно-програмних рішень було спроєктовано та змонтовано повноцінну експериментальну установку. Цей стенд був покликаний максимально точно імітувати реальні умови експлуатації комплексу в типовому житловому середовищі. Головним науковим завданням проведеного емпіричного дослідження стало визначення точних математичних залежностей між загальним рівнем енергоспоживання та такими динамічними факторами, як поточний час доби, рівень інтенсивності переміщень (активності) мешканців, рівень фонового сонячного випромінювання та обраний програмний алгоритм (режим) роботи керуючого мікроконтролера.

Створена експериментальна апаратна платформа забезпечила надійний фундамент для об'єктивного збору телеметричних даних та глибокого аналізу інформаційної взаємодії всіх електронних вузлів. Базовим елементом підсистеми збору даних виступили інфрачервоні піроелектричні датчики виявлення руху (PIR). Їхні оптичні лінзи забезпечували ефективний радіус просторового сканування до 6 метрів, що дозволило надійно перекрити всі ключові транзитні зони та місця тривалого перебування людей у приміщенні. Головна функція цих сенсорів полягала у формуванні тригерних сигналів для активації освітлювальних приладів виключно в моменти підтвердженої фізичної присутності особи, що відіграло вирішальну роль у мінімізації часу холостої

роботи системи. Паралельно з ними функціонували прецизійні цифрові люксметри TSL 2561, на які покладалося завдання безперервного вимірювання інтенсивності природного денного світла. Широкий динамічний діапазон цих сенсорів (від 0 до 40 000 люкс) надав мікрокомп'ютеру можливість максимально точно адаптувати потужність штучних джерел світла до мінливих зовнішніх умов, гарантуючи увімкнення реле лише за умови об'єктивної нестачі інсоляції.

В якості виконавчих механізмів, що безпосередньо генерують світловий потік, в експериментальній установці було застосовано чотири сучасні напівпровідникові LED-лампи, номінальна електрична потужність кожної з яких становила 12 Вт. Вибір на користь твердотільних світлодіодних технологій був зумовлений їхньою еталонною енергоефективністю, відсутністю токсичних компонентів та високою стійкістю до деградації в умовах частих циклів вмикання і вимикання. Ці джерела світла були стратегічно рівномірно розподілені по основних робочих зонах тестового приміщення для забезпечення нормативного рівня освітленості. Комутація високовольтних ліній живлення здійснювалася за допомогою надійних багатоканальних модулів електромагнітних реле. Вони бездоганно виконували команди, що надходили від центрального контролера, гарантуючи при цьому повну гальванічну ізоляцію низьковольтної керуючої логіки. Енергозабезпечення комплексу здійснювалося за допомогою двох незалежних стабілізованих джерел живлення: лінія постійного струму на 5 В використовувалася для безперебійної роботи ядра Raspberry Pi та сенсорної периферії, тоді як змінна напруга 220 В подавалася виключно на силові контакти реле для живлення LED-ламп. Така топологія живлення нівелювала ризик системних збоїв чи перезавантажень контролера під час комутаційних стрибків напруги. Наочну структурну схему, яка детально ілюструє інформаційну та силову взаємодію між вимірювальними перетворювачами, обчислювальним центром та виконавчими механізмами, представлено на рисунку 3.11.

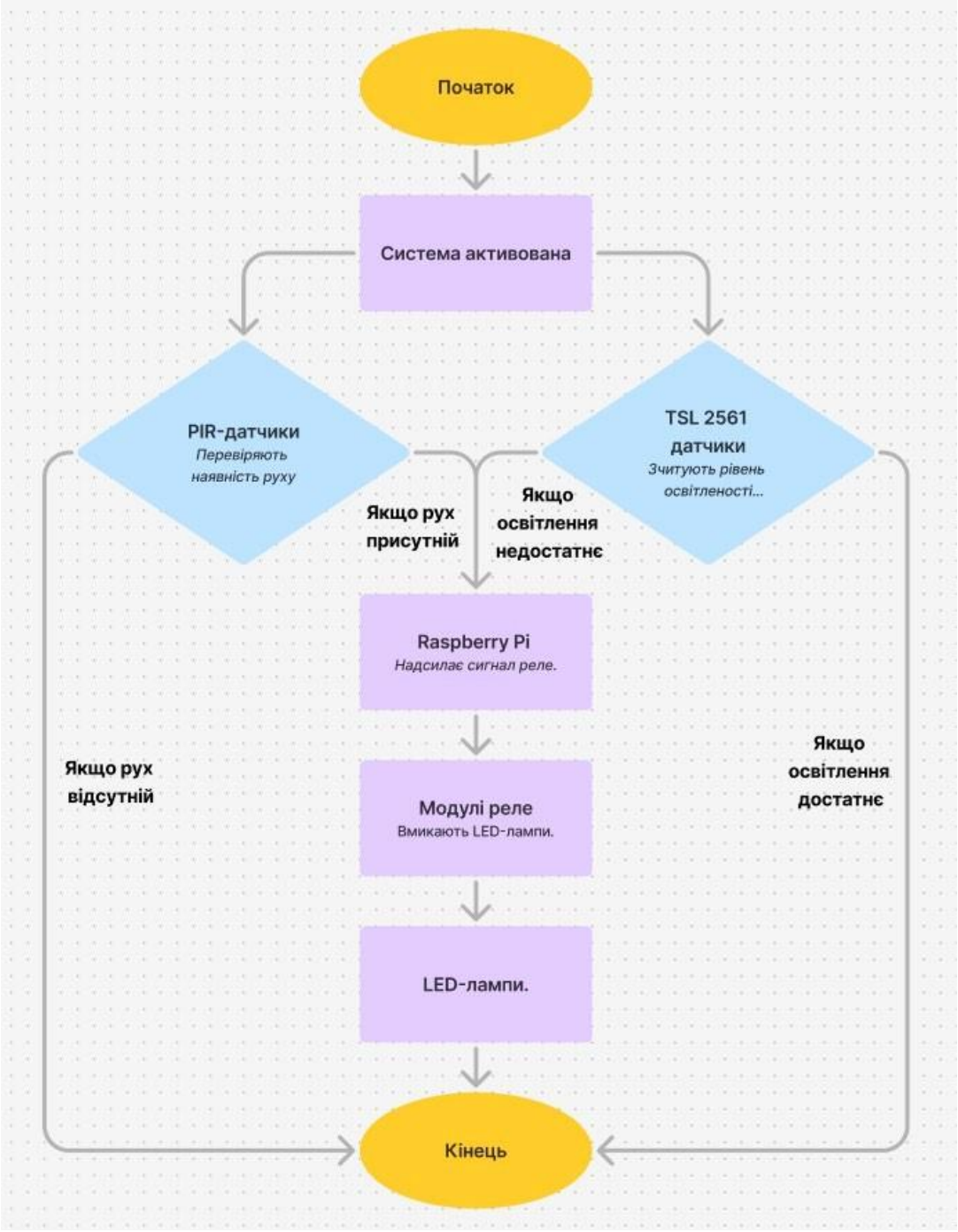


Рисунок 3.11 – Схемотехнічна та інформаційна взаємодія апаратних компонентів експериментальної установки

Для забезпечення максимальної релевантності результатів експерименту, процес тестування було чітко регламентовано низкою ключових граничних умов та параметрів. Дослідження проводилося на базі типової житлової квартири загальною площею 50 квадратних метрів. Важливим фактором стала західна орієнтація віконних отворів, яка зумовлює специфічний графік природної інсоляції: знижений рівень світла в ранкові години та його надлишок у другій половині дня. Експериментальний цикл охоплював повні 24 години, що

дозволило розбити добу на чотири виражені фази з унікальними комбінаціями освітленості та людської активності. Ранковий період (з 6:00 до 9:00) характеризувався помірним рівнем природного світла в межах 50–100 люкс та високою активністю мешканців на рівні 80 відсотків, що було пов'язано з інтенсивною підготовкою до початку робочого дня. Денна фаза (з 9:00 до 17:00) відзначалася піковою сонячною інсоляцією в діапазоні 200–300 люкс при практично нульовій активності PIR-датчиків (менше 10 відсотків) через відсутність людей удома. Вечірній час (з 17:00 до 22:00) супроводжувався поступовим згасанням природного світла до рівня 50–100 люкс та поверненням високої активності (близько 80 відсотків) під час виконання побутових завдань. Нічний цикл (з 22:00 до 6:00) протікав в умовах повної темряви (0–50 люкс) та мінімальної інтенсивності рухів (нижче 10 відсотків). Додатковою апаратною умовою експерименту стало програмне налаштування мікрокомп'ютера Raspberry Pi на мінімізацію будь-яких системних затримок між моментом спрацювання датчика та замиканням контактів реле.

Практична реалізація експерименту розпочалася з етапу жорсткого метрологічного калібрування сенсорної бази. Чутливість PIR-датчиків була налаштована таким чином, щоб гарантовано фіксувати переміщення на відстані до 6 метрів, виключаючи при цьому хибні спрацювання на конвекційні теплові потоки від радіаторів опалення. Цифрові сенсори TSL 2561 пройшли програмну верифікацію точності вимірювань у всьому заявленому динамічному діапазоні. Програма тестування передбачала почерговий запуск системи в чотирьох ключових режимах: повністю автоматичному (де рішення приймалися виключно на основі логіки сенсорів), ручному (із використанням класичних фізичних вимикачів), екстреному (з примусовою одночасною активацією всіх джерел світла) та нічному (з використанням лише однієї чергової лампи). Збір статистичних даних здійснювався мікрокомп'ютером у фоновому режимі з інтервалом запису в 15 хвилин. Логи зберігали інформацію про поточний статус електромагнітних реле, точні значення освітленості в люксах та стан тригерів руху.

Математична обробка отриманих результатів та визначення загального

обсягу спожитої електроенергії здійснювалися за допомогою класичної фізичної формули обчислення електричної роботи:

$$E = P \cdot T$$

де E — сумарне споживання енергії у ват-годинах (Вт·год),

P — номінальна споживана потужність активованих світлодіодних ламп у ватах, а T — фактичний час їхньої безперервної роботи у годинах.

Розгорнутий поетапний розрахунок споживання електричної енергії адаптивною автоматизованою системою (АСО) для кожної з чотирьох добових фаз виглядає наступним чином. У ранковий період (6:00–9:00), зважаючи на наявність руху та недостатність сонячного світла (50–100 люкс), контролер активував 2 лампи на сумарний час 1.5 години. Відповідно, споживання склало:

$$E_{ранок} = 2 \cdot 12\ Вт \cdot 1.5\ год = 36\ Вт \cdot год$$

Упродовж світлового дня (9:00–17:00), оскільки рівень інсоляції стабільно перевищував поріг у 200 люкс, а фізичний рух був відсутній, автоматика повністю заблокувала роботу реле, звівши споживання до нуля:

$$E_{день} = 0\ Вт \cdot год$$

Під час вечірньої активності (17:00–22:00) деградація природного світла та висока інтенсивність переміщень змусили систему задіяти 3 лампи протягом 2 годин ефективного часу:

$$E_{вечір} = 3 \cdot 12\ Вт \cdot 2\ год = 72\ Вт \cdot год$$

У нічний час (22:00–6:00) повна відсутність фонового світла компенсувалася епізодичною роботою лише 1 чергової лампи загальною тривалістю 2 години:

$$E_{ніч} = 1 \cdot 12\ Вт \cdot 2\ \% = 24\ Вт \cdot год$$

Підсумовуючи ці значення, отримуємо загальне добове енергоспоживання оптимізованого комплексу:

$$E_{загальне} = E_{ранок} + E_{день} + E_{вечір} + E_{ніч}$$

$$E_{загальне} = 36 + 0 + 72 + 24 = 132\ Вт \cdot год$$

Для отримання бази порівняння було змодельовано та розраховано енерговитрати того ж приміщення за умови використання традиційної некерованої системи освітлення. У цьому сценарії вранці мешканці вручну вмикали всі 4 лампи на 3 години:

$$E_{ранок} = 4 \cdot 12\ Вт \cdot 3\ год = 144\ Вт \cdot год$$

Удень, за умови вимкненого світла перед виходом з дому, споживання дорівнювало нулю:

$$E_{день} = 0\ Вт \cdot год$$

Вечірній цикл характеризувався тривалою безперервною роботою освітлення: 3 лампи працювали по 4 години, а 1 додаткова лампа — 5 годин, що сумарно призвело до значних витрат:

$$E_{вечір} = 3 \cdot 12\ Вт \cdot 4\ год + 1 \cdot 12\ Вт \cdot 5\ год = 204\ Вт \cdot год$$

Нічний період передбачав залишення 1 лампи увімкненою на всі 8 годин сну для забезпечення орієнтації:

$$E_{ніч} = 1 \cdot 12\ Вт \cdot 8\ год = 96\ Вт \cdot год$$

Загальне добове споживання при використанні застарілого неавтоматизованого підходу склало:

$$E_{загальне} = E_{ранок} + E_{день} + E_{вечір} + E_{ніч}$$
$$E_{загальне} = 144 + 0 + 204 + 96 = 444\ Вт \cdot год$$

Для максимально зручного сприйняття та системного аналізу всі отримані розрахункові дані зведено у порівняльну таблицю 3.3.

Таблиця 3.3

Порівняльний аналіз добових витрат електроенергії для досліджуваних систем освітлення

Фаза доби	Автоматизована адаптивна система (АСО), Вт·год	Традиційна некерована система, Вт·год
Ранок (6:00–9:00)	36	144
День (9:00–17:00)	0	0
Вечір (17:00–22:00)	72	204
Ніч (22:00–6:00)	24	96
Загальне споживання за добу	132	444

Результати проведеного експериментального дослідження переконливо засвідчили надзвичайно високу експлуатаційну ефективність розробленої автоматизованої системи керування. Порівняння підсумкових значень доводить, що апаратна інтеграція мікрокомп'ютера Raspberry Pi з інфрачервоними детекторами руху та високоточними люксметрами дозволила знизити загальне енергоспоживання об'єкта більш ніж на 70 відсотків (з 444 Вт·год до 132 Вт·год на добу). Такий вражаючий результат досягається виключно завдяки гнучкій адаптації алгоритмів до поведінкових патернів людей та максимальній експлуатації безкоштовного природного світла. Окрім прямого економічного ефекту, жорстка оптимізація робочих циклів суттєво мінімізує теплове навантаження на напівпровідникові кристали LED-ламп, що в довгостроковій перспективі радикально подовжує їхній експлуатаційний ресурс. Проведене емпіричне моделювання остаточно підтверджує наукову та практичну цінність впровадження інтелектуальних систем освітлення як невід'ємного компонента сучасних енергоефективних будівель.

Висновки до розділу 3

У третьому розділі кваліфікаційної роботи було проведено комплексне дослідження розробленої автоматизованої системи керування освітленням (АСО), яке охоплювало етапи комп'ютерного моделювання та практичної емпіричної апробації на базі створеної експериментальної установки.

За результатами математичного моделювання робочих процесів доведено високу ефективність закладених алгоритмів адаптивного керування. Комплексний аналіз синергетичної взаємодії інфрачервоних детекторів руху (PIR) та цифрових люксметрів (TSL 2561) підтвердив здатність системи гнучко реагувати на динаміку сонячної інсоляції та поведінкові патерни користувачів. Віртуальна симуляція різних експлуатаційних сценаріїв показала, що впровадження розроблених режимів роботи (зокрема повністю автоматичного та нічного) дозволяє знизити добове енергоспоживання на 59 відсотків порівняно з традиційними некерованими мережами освітлення (зменшення з 216 Вт·год до 114 Вт·год для змодельованого приміщення).

Практичний етап дослідження, реалізований за допомогою фізичного експериментального стенда під управлінням мікрокомп'ютера Raspberry Pi 4, повністю підтвердив теоретичні розрахунки. Емпірично зафіксовано, що точкова активація світлодіодних (LED) ламп виключно в зонах фактичної присутності людини та за умови об'єктивної нестачі природного денного світла забезпечує радикальне скорочення витрат електроенергії. В умовах реального 24-годинного експерименту загальне добове споживання системи впало з 444 Вт·год (за класичного неавтоматизованого сценарію) до 132 Вт·год, що становить понад 70 відсотків чистої економії енергоресурсів.

Підсумовуючи, можна констатувати, що спроєктований кіберфізичний комплекс не лише гарантує високий рівень візуального та побутового комфорту, але й забезпечує безпрецедентну енергетичну ефективність. Жорстка оптимізація часу роботи світильників, досягнута завдяки інтелектуальній обробці сенсорних даних, нівелює явище «холостої» роботи ламп і мінімізує їхню теплову деградацію. Це радикально подовжує експлуатаційний ресурс обладнання, роблячи розроблену систему економічно рентабельним, надійним та екологічно відповідальним рішенням для інтеграції в сучасну інфраструктуру розумних будівель.

РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Охорона праці

4.1.1 Значення охорони праці для забезпечення безпеки праці при роботі з автоматизованими системами

Впровадження та експлуатація сучасних автоматизованих систем нерозривно пов'язані з необхідністю суворого дотримання норм охорони праці, що відіграє фундаментальну роль у збереженні життя, фізичного та ментального здоров'я працівників. Значущість цього аспекту розкривається через багатогранний підхід до безпеки робочого середовища. Передусім, ключовим вектором є превентивна діяльність, спрямована на запобігання виробничому травматизму та виникненню аварійних ситуацій. Оскільки новітні кіберфізичні комплекси часто характеризуються наявністю рухомих механізмів, що працюють на високих швидкостях, а також генерують значні електричні потужності у високотехнологічних умовах, інженерно-технічний персонал стикається з підвищеним рівнем небезпеки. Саме тому превентивна ідентифікація потенційних ризиків та розробка дієвих механізмів їх нейтралізації є критично важливою умовою безпечної експлуатації обладнання. Не менш вагомим аспектом виступає суворий контроль за дотриманням ергономічних вимог при організації робочих місць. Комплексна оцінка та правильне просторове налаштування елементів автоматизованих систем дозволяє мінімізувати шкідливі фізичні навантаження на організм оператора, тим самим запобігаючи розвитку специфічних професійних захворювань опорно-рухового апарату та органів зору.

Разом з тим, ефективна охорона праці неможлива без безперервного процесу навчання та фахової підготовки спеціалістів. Працівники, які безпосередньо взаємодіють зі складним устаткуванням, зобов'язані володіти глибокими знаннями щодо протоколів безпеки, чітко усвідомлювати спектр можливих загроз та застосовувати виключно безпечні методи виконання операцій. Особлива увага приділяється організації безпечної колаборації між людиною та машиною. У випадках, коли технологічний процес передбачає

спільну діяльність персоналу та автоматизованих модулів, охорона праці жорстко регламентує створення захищених зон та впровадження надійних бар'єрів безпеки, які унеможливлюють випадкове травмування.

Сучасні стандарти безпеки також вимагають впровадження систем постійного моніторингу стану здоров'я персоналу. Це дає змогу своєчасно виявляти негативний вплив електромагнітних випромінювань, шуму чи вібрації на фізіологічний стан людей. Важливою складовою є розробка чітких алгоритмів дій на випадок виникнення нештатних чи екстрених ситуацій. Наявність заздалегідь відпрацьованих планів евакуації, протоколів аварійної зупинки механізмів та механізмів локалізації витоків небезпечних речовин чи інформації гарантує мінімізацію наслідків будь-якої аварії. Крім того, сучасна парадигма охорони праці охоплює питання психосоціальної безпеки, яка спрямована на захист працівників від хронічного стресу, емоційного вигорання та інформаційного перевантаження, що часто супроводжують роботу з інтенсивними потоками даних в автоматизованих середовищах. Підсумовуючи, можна стверджувати, що глобальна місія охорони праці в цій сфері полягає у формуванні максимально безпечного, ергономічного та продуктивного робочого простору, який повною мірою захищає інтереси робітника.

4.1.2 Основні вимоги до електробезпеки під час роботи з автоматизованими системами розумного будинку

Проєктування, монтаж та подальша експлуатація сучасних систем «розумного будинку» вимагають беззаперечного та суворого дотримання нормативних правил електробезпеки. Ці стандарти та регламенти формують основу для надійного функціонування всієї інфраструктури домашньої автоматизації та підключених електроприладів. Головним пріоритетом у цьому контексті виступає гарантований захист життя та здоров'я користувачів, а також обслуговуючого персоналу від ураження електричним струмом, термічних опіків та інших супутніх небезпек. Окрім захисту людей, неухильне дотримання правил електромонтажу є запорукою стабільності та довговічності роботи самої енергетичної мережі. Професійно виконана розводка кабельних трас та правильний підбір комутаційної апаратури запобігають виникненню перебоїв у

живленні мікропроцесорної техніки. Не менш критичним фактором є кардинальне зниження ризиків пожежної небезпеки, оскільки будь-який електронний пристрій або слабострумова система при порушенні умов експлуатації може стати осередком займання, тому превентивні заходи електробезпеки виступають надійним щитом для захисту майна.

Практична реалізація вимог електробезпеки починається з обов'язкового облаштування надійних контурів заземлення та забезпечення якісної ізоляції струмопровідних частин. Заземлення всіх металевих корпусів та елементів інфраструктури розумного будинку є критично важливим запобіжним заходом, який у разі пробою ізоляції гарантовано відводить небезпечний потенціал у землю, захищаючи людину від фатального удару струмом. Разом з тим, дотримання жорстких державних і міжнародних стандартів електромонтажу вимагає використання виключно сертифікованих кабельно-провідникових виробів, розеток і вимикачів, що відповідають розрахунковим навантаженням. Для захисту мережі від аварійних перевантажень та струмів короткого замикання інженерні щити в обов'язковому порядку комплектуються швидкодіючими автоматичними вимикачами та пристроями захисного відключення (ПЗВ). Ця захисна автоматика здатна за мілісекунди ідентифікувати аномальне зростання струму або витік струму на землю та миттєво знеструмити проблемну ділянку ланцюга, локалізуючи аварію ще до виникнення пожежі чи пошкодження дороговартісних контролерів.

Специфіка систем розумного будинку також полягає у масовому використанні автономних джерел живлення. Тому окрема увага приділяється безпечній експлуатації акумуляторних батарей, якими оснащуються різноманітні бездротові сенсори, резервні джерела живлення та панелі керування. Правильне технічне обслуговування цих елементів, дотримання температурних режимів заряджання та уникнення їхнього механічного пошкодження дозволяє повністю виключити ризик теплового розгону, здуття або вибуху акумуляторів. Підвищені вимоги безпеки висуваються до електричних вузлів, розташованих у приміщеннях із високим рівнем вологості (ванних кімнатах, кухнях, підвальних приміщеннях). У таких зонах дозволяється монтаж виключно того обладнання,

розеток та світильників, які мають високий індекс захисту від пилу та вологи (IP), що унеможливлює потрапляння конденсату чи бризок води на струмопровідні контакти і запобігає виникненню коротких замикань. Крім того, під час проведення ремонтних або пусконалагоджувальних робіт, пов'язаних із високовольтними лініями (220 В і вище), до роботи допускається виключно кваліфікований персонал, забезпечений спеціалізованим діелектричним інструментом та засобами індивідуального захисту. Нарешті, надійна електрична та гальванічна ізоляція низьковольтних датчиків і мікроконтролерів захищає чутливі цифрові компоненти від впливу електромагнітних перешкод і наведень, що гарантує стабільну, безперебійну та безпечну роботу всього інтелектуального комплексу домашньої автоматизації.

4.2 Безпека в надзвичайних ситуаціях

4.2.1 Алгоритм дій та превентивні заходи при виникненні небезпечних ситуацій під час експлуатації автоматизованих систем

Сучасні умови експлуатації складних кіберфізичних та автоматизованих комплексів вимагають особливої уваги до питань безпеки, оскільки виникнення будь-яких нештатних чи аварійних ситуацій несе пряму загрозу як для здоров'я обслуговуючого персоналу, так і для цілісності дороговартісного обладнання. Незважаючи на стрімкий технологічний прогрес, впровадження багаторівневих апаратних захистів та загальну тенденцію до підвищення надійності інтелектуальних систем, повністю виключити ймовірність виникнення критичних збоїв неможливо. Саме тому розробка, глибоке засвоєння та неухильне дотримання чітко регламентованого алгоритму дій у разі виникнення небезпеки є фундаментальною вимогою безпеки життєдіяльності на будь-якому підприємстві чи об'єкті інфраструктури. Кожен етап реагування має бути виконаний максимально оперативно, виважено та скоординовано, щоб гарантовано локалізувати загрозу на ранніх стадіях її розвитку.

Першочерговим і найбільш критичним кроком у разі фіксації будь-яких ознак аварійної ситуації є негайна ініціалізація процедури екстреної зупинки всіх робочих процесів автоматизованої системи. Ця дія безпосередньо спрямована на

миттєве блокування рухомих виконавчих механізмів, примусову зупинку виконання програмних алгоритмів та мінімізацію потенційних руйнівних наслідків від подальшого неконтрольованого функціонування обладнання. Надзвичайно важливо, щоб активація аварійної зупинки відбувалася без жодних зволікань, адже кожна секунда затримки може призвести до експоненціального розгортання масштабів аварії. Разом із зупинкою процесів ключове значення має повне апаратне знеструмлення ураженого комплексу. Фізичне відключення живлення від електромережі є одним із найдієвіших методів нейтралізації небезпеки, особливо у випадках, коли першопричиною збою виступає коротке замикання, теплове пробиття ізоляції або інші критичні неполадки на лініях електропередач. Увесь робочий персонал повинен проходити регулярні практичні тренінги для відпрацювання навичок швидкого та безпомилкового знеструмлення апаратури із суворим дотриманням правил електробезпеки. Разом з тим, інженерам-проєктувальникам необхідно заздалегідь передбачати архітектурні рішення (наприклад, системи безперебійного живлення для блоків пам'яті), які дозволять уникнути безповоротної втрати критично важливих масивів даних чи фатального пошкодження програмного забезпечення під час раптового зникнення напруги.

Наступним обов'язковим етапом локалізації аварії є негайне фізичне або програмне відокремлення ураженої автоматизованої системи від глобальних та локальних інформаційних мереж зв'язку. Цей превентивний захід є життєво необхідним для того, щоб унеможливити поширення хибних керівних команд, шкідливого програмного коду або спотворених телеметричних даних на інші, ще функціонуючі вузли технологічної інфраструктури. Надійна ізоляція аварійної ділянки за допомогою брандмауерів або фізичного відключення кабелів гарантує, що нештатна ситуація не набуде неконтрольованого каскадного характеру. Одночасно з ізоляцією обладнання розпочинається процес оперативного внутрішнього та зовнішнього інформування. Уповноважені працівники зобов'язані в найкоротші терміни передати чітку, структуровану та достовірну інформацію про характер і масштаби події відповідальним інженерним службам, керівництву об'єкта та, за необхідності, зовнішнім

регуляторним органам. Високий рівень комунікації та відсутність паніки серед співробітників дозволяють швидко мобілізувати необхідні технічні й людські ресурси для ефективного управління кризовою ситуацією.

У випадках, коли аварійна ситуація становить безпосередню фізичну загрозу для життя та здоров'я людей — наприклад, при виникненні пожежі, сильному задимленні, загрозі вибуху чи обваленні конструкцій — абсолютним пріоритетом стає негайна евакуація всього присутнього персоналу. Процес виведення працівників із небезпечної зони має відбуватися максимально організовано, згідно із заздалегідь затвердженими та відпрацьованими планами евакуації. Регулярні інструктажі та навчальні тривоги гарантують, що кожен співробітник чітко орієнтується в розташуванні евакуаційних виходів, знає безпечні маршрути до місць загального збору та вміє правильно користуватися первинними засобами індивідуального захисту. Одночасно з початком евакуаційних заходів здійснюється терміновий виклик профільних служб екстреної допомоги: пожежно-рятувальних підрозділів, бригад швидкої медичної допомоги або спеціалізованих аварійних бригад. Швидкість реагування цих підрозділів та якість попередньої інформації, наданої їм диспетчером об'єкта, часто стають вирішальними факторами у справі порятунку людських життів, мінімізації матеріальних збитків та запобігання екологічним катастрофам.

Після того як безпосередню загрозу повністю ліквідовано, а наслідки небезпечної ситуації успішно локалізовано, настає не менш важливий етап ретельного поставарійного аналізу. Спеціально утворена експертна комісія повинна провести глибоке та всебічне розслідування інциденту для встановлення його істинних технічних чи організаційних першопричин. Цей процес включає детальне вивчення системних логів, розшифровку телеметрії, опитування свідків та покроковий аналіз дій персоналу під час аварії. На основі отриманих об'єктивних висновків розробляється комплекс коригувальних заходів, здійснюється необхідна модернізація апаратної або програмної частини автоматизованої системи, а також вносяться відповідні жорсткі зміни до внутрішніх інструкцій з охорони праці. Такий ґрунтовний аналітичний підхід

гарантує, що виявлені інженерні вразливості будуть повністю усунені, що зведе до абсолютного мінімуму ймовірність повторення подібних аварійних сценаріїв у майбутньому періоді експлуатації.

Висновки до розділу 4

У четвертому розділі кваліфікаційної роботи було комплексно досліджено питання охорони праці та безпеки життєдіяльності під час монтажу й експлуатації автоматизованих систем «розумного будинку».

Аналіз показав, що безпека персоналу та кінцевих користувачів вимагає багаторівневого підходу: від ергономічної організації простору і постійного навчання працівників до забезпечення їхньої психосоціальної безпеки. Фундаментальною умовою надійної роботи спроєктованої системи освітлення є суворе дотримання норм електробезпеки, що включає обов'язкове облаштування контурів заземлення, якісну ізоляцію струмопровідних частин, встановлення швидкодіючих автоматичних вимикачів та пристроїв захисного відключення (ПЗВ). Окрема увага повинна приділятися безпечному використанню акумуляторних батарей та застосуванню обладнання з відповідним індексом вологозахисту (IP) у вологих приміщеннях.

Також було детально опрацьовано алгоритм дій та превентивні заходи на випадок виникнення нештатних чи аварійних ситуацій. Визначено, що для швидкої локалізації загрози першочерговими кроками є негайна аварійна зупинка всіх робочих процесів, фізичне знеструмлення ураженого комплексу та його ізоляція від інформаційних мереж. У разі прямої фізичної загрози абсолютним пріоритетом стає організована евакуація людей та виклик профільних екстрених служб. Завершальним етапом будь-якої небезпечної події має бути ретельне поставарійне розслідування експертною комісією для виявлення першопричин збою та модернізації системи з метою унеможливлення подібних інцидентів у майбутньому.

Отже, неухильне виконання регламентованих норм охорони праці та чітких протоколів реагування є життєво необхідною базою для безпечного, надійного та довговічного функціонування розробленої кіберфізичної системи освітлення.

ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК

У кваліфікаційній роботі вирішено актуальне науково-практичне завдання розробки та впровадження інтелектуальної адаптивної системи автоматичного керування освітленням (АСО) на базі сенсорної мережі. На основі аналізу сучасних тенденцій розвитку концепції «розумного будинку» доведено, що традиційні некеровані мережі освітлення є енергозатратними та неефективними. Перехід до адаптивного керування за допомогою комбінації датчиків руху та освітленості дозволяє не лише забезпечити високий рівень побутового комфорту, але й перетворює систему автоматизації на потужний інструмент енергоощадження, здатний мінімізувати негативний вплив на довкілля.

Під час розробки апаратно-програмного комплексу було обґрунтовано вибір елементної бази та створено апаратну архітектуру системи. Центральним координаційним вузлом було обрано високопродуктивний мікрокомп'ютер Raspberry Pi 4, який забезпечує виконання багатофакторних алгоритмів та мережеву інтеграцію. Інформаційне забезпечення реалізовано на основі прецизійного цифрового люксметра TSL 2561 та інфрачервоних піроелектричних датчиків виявлення руху PIR. Керування силовими лініями енергоефективних світлодіодних ламп здійснюється через модулі електромагнітних реле, що гарантують надійну гальванічну розв'язку. Також розроблено структурно-алгоритмічне забезпечення, яке включає п'ять незалежних функціональних режимів: автоматичний, ручний, дистанційний, нічний та екстрений, що адаптують роботу комплексу до будь-яких потреб користувача.

Результати комп'ютерного моделювання та емпіричного дослідження на базі створеної експериментальної установки повністю підтвердили ефективність розроблених інженерних рішень. Доведено, що синергетичне поєднання даних від сенсорів руху та освітленості дозволяє унеможливити марнотратну роботу ламп у світлу пору доби та в порожніх приміщеннях. Практичні вимірювання зафіксували радикальне зниження загального добового енергоспоживання тестового об'єкта більш ніж на 70 відсотків — з 444 Вт·год при використанні

традиційної системи до 132 Вт·год при застосуванні розробленої АСО. Окрім прямого економічного ефекту, жорстка оптимізація робочих циклів суттєво мінімізує теплове навантаження на світлодіодні кристали, що в довгостроковій перспективі значно подовжує їхній експлуатаційний ресурс.

Окрему увагу в дослідженні приділено питанням охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях. Визначено фундаментальні вимоги до електробезпеки під час монтажу та експлуатації систем домашньої автоматизації, серед яких обов'язкове облаштування контурів заземлення, надійна ізоляція струмопровідних частин та встановлення швидкодіючих пристроїв захисного відключення. Розроблено чіткий регламентований алгоритм дій на випадок виникнення нештатних або аварійних ситуацій, що включає процедури негайної екстреної зупинки процесів, апаратного знеструмлення комплексу, інформаційної ізоляції уражених ділянок та організованої евакуації персоналу.

Підсумовуючи, можна стверджувати, що мета кваліфікаційної роботи повністю досягнута, а всі поставлені завдання виконано. Спроєктований апаратно-програмний комплекс являє собою надійне, економічно рентабельне та безпечне інженерне рішення. Розроблена адаптивна система повністю готова до подальшого масштабування та практичного впровадження в сучасну інфраструктуру як приватних житлових будинків, так і великих комерційних об'єктів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Теорія автоматичного керування / [Попович М.Г., Ковальчук О.В.]: Підручник. — Київ: Либідь, 2007. — 544 с.
2. Інтернет речей: технології, протоколи, застосування / [Глоба Л.С., Скулівський Б.А., Терновий О.С.]: Навчальний посібник. — Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. — 250 с.
3. Автоматизовані системи управління будівлями: «Розумний будинок» / [Бойко В.І., Коваленко О.С.]: Монографія. — Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2019. — 198 с.
4. Технології розумного будинку: стан та перспективи розвитку / [Петренко О.М., Іванов В.В.] // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». — 2020. — № 4. — С. 45–52.
5. Розробка архітектури системи «Розумний дім» на базі мікрокомп'ютерів / [Мельник С.В.] // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. — 2018. — № 2. — С. 112–118.
6. Інтелектуальні системи керування / [Кондратенко Ю.П., Козлов О.В., Коробко В.В.]: Підручник. — Миколаїв: НУК, 2018. — 350 с.
7. Системи домашньої автоматизації: від датчиків до хмарних сервісів / [Морозов О.І.]: Навчальний посібник. — Харків: ХНУРЕ, 2022. — 210 с.
8. Проектування систем IoT для побутової автоматизації / [Шевченко Т.О.] // Системи управління, навігації та зв'язку. — 2021. — Вип. 3. — С. 55–60.
9. Енергоощадні технології в системах освітлення / [Жук М.В., Романюк Р.Я.]: Монографія. — Вінниця: ВНТУ, 2018. — 175 с.
10. Оптимізація енергоспоживання в системах розумного освітлення / [Карпенко О.М.] // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2020— № 5— с. 44–49.
11. Енергоефективність світлодіодних джерел світла в системах автоматизації / [Коваль І.В.] // Технічна електродинаміка. — 2019. — № 4. — С. 67–72.
12. Дослідження впливу природного освітлення на енергоспоживання систем штучного світла / [Грицай П.С.] // Відновлювана енергетика. — 2021. — № 1. — С. 34–40.

13. Оцінка енергоефективності впровадження датчиків руху в системах освітлення житлових будівель / [Марченко О.В.] // Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит. — 2020. — № 3. — С. 15–22.
14. Бездротові сенсорні мережі: архітектура та протоколи / [Стрілець В.І., Узлов Д.Ю.]: Навчальний посібник. — Київ: Наукова думка, 2019. — 280 с.
15. Методи та засоби інтелектуалізації інформаційно-вимірювальних систем на базі сенсорних мереж / [Дячок Р.В.]: Дисертація. — Львів: Львівська політехніка, 2023. — 220 с.
16. Протоколи передачі даних I2C та SPI у вбудованих системах / [Романенко І.О.] // Радіоелектроніка, інформатика, управління.— 2018. — № 1— С. 112–119.
17. Аналіз достовірності переданої інформації в сенсорних мережах розумного будинку / [Горяєва С.М.] // Сучасні проблеми радіотехніки і телекомунікацій. — Харків: ХНУРЕ, 2019. — С. 233–236.
18. Телекомунікаційні системи широкосмугового радіодоступу та сенсорні мережі / [Ільченко М.Ю., Кравчук С.О.]: Монографія. — Київ: Наукова думка, 2020. — 312 с.
19. Основи побудови бездротових сенсорних мереж стандарту ZigBee / [Тарасенко О.С.] // Інфокомунікаційні технології. — 2021. — № 2. — С. 45–53.
20. Інтеграція протоколу MQTT у системи Інтернету речей на базі ESP8266 та Raspberry Pi / [Рожкова М.В.]: Кваліфікаційна робота. — Кривий Ріг: КНУ, 2024. — 85 с.
21. Мікрокомп'ютери Raspberry Pi в системах автоматики / [Медведєв М.Г., Ковальчук О.В.]: Навчальний посібник. — Київ: КПІ, 2022. — 215 с.
22. Проектування мікропроцесорних систем на базі платформи Arduino та Raspberry Pi / [Клименко В.І., Савченко О.А.]: Посібник. — Харків: НТУ «ХПІ», 2020. — 288 с.
23. Використання датчиків TSL2561 та PIR для створення адаптивних систем освітлення / [Бондаренко І.М.] // Електроніка та зв'язок. — 2021. — № 3. — С. 78–84.
24. Цифрова обробка сигналів у вбудованих системах керування / [Захарченко В.М.]: Підручник. — Одеса: ОНПУ, 2018. — 340 с.

25. Аналіз чутливості інфрачервоних датчиків руху в системах охоронної сигналізації та освітлення / [Бойко П.Р.] // Системи обробки інформації. — 2019. — № 2. — С. 56–61.
26. Основи схемотехніки: підключення периферійних модулів до Raspberry Pi / [Григорович О.М.]: Навчальний посібник. — Львів: ЛНУ ім.І.Франка, 2021— 175 с.
27. Надійність комутації силових кіл електромагнітними реле в системах автоматики / [Сидоренко В.О.] // Електротехніка і електромеханіка. — 2020. — № 5. — С. 22–27.
28. Охорона праці в галузі телекомунікацій та інформаційних технологій / [Гавриш С.А., Гавриш А.С.]: Підручник. — Київ: НТУУ «КПІ», 2018. — 440 с.
29. Електробезпека в інтелектуальних будівлях: вимоги до монтажу та експлуатації / [Павленко О.І.] // Безпека життєдіяльності— 2022— № 1— с. 33–38.
30. Оцінка ризиків та безпека в надзвичайних ситуаціях при експлуатації систем розумного будинку / [Коваленко І.В.] // Вісник цивільного захисту. — 2021. — № 3. — С. 45–50.
31. Ергономіка та безпека праці користувачів комп'ютерних систем керування / [Навакатікян А.О., Кальніш В.В.]: Посібник. — Київ: Основа, 2017. — 298 с.
32. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів (НПАОП 40.1-1.21-98) / [Державний комітет України по нагляду за охороною праці]: Офіційне видання. — Київ, 1998. — 356 с.
33. Світильники. Частина 1. Загальні вимоги та випробування (ДСТУ EN 60598-1:2015) / [Національний стандарт України]— Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2015—156 с.
34. Енергоефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання на освітлення (ДСТУ Б EN 15193:2011) / [Національний стандарт України]. — Київ: Мінрегіонбуд України, 2012. — 45 с.
35. Обґрунтування параметрів системи адаптивного освітлення / [Островський Ф.В., Кужель В.П.] // Комп'ютерно-інтегровані технології. — 2023. — № 53. — С. 98–103.
36. Автоматизована система штучного освітлення: спектральний аналіз / [Коваль Д.С., Притула О.В.] // Вісник ВНТУ. — 2022. — № 3. — С. 14–20.

37. Internet of Things: Architectures, Protocols and Standards / [Buyya O., Dastjerdi A.V.]: Textbook. — London: CRC Press, 2016. — 714 p.
38. IoT Fundamentals: Networking Technologies, Protocols, and Use Cases / [Hanes D., Salgueiro G.]: Cisco Press. — Indianapolis, 2017. — 528 p.
39. Smart Lighting Systems: State-of-the-Art and Future Trends / [Pandharipande A., Caicedo D.]: Philips Research. — Eindhoven: Springer, 2015. — 120 p.
40. LED Lighting and Smart Controls / [Shackelford C.]: European Energy Press. — Berlin, 2018. — 240 p.
41. Wireless Sensor Networks: Technology, Protocols, and Applications / [Sohraby K., Minoli D.]: John Wiley & Sons. — New Jersey, 2015. — 327 p.
42. Sensor Networks for Sustainable Development / [Mishra A.]: Springer. — Berlin, 2014. — 378 p.
43. Raspberry Pi User Guide / [Upton E., Halfacree G.]: 4th Edition. — London: Wiley, 2016. — 312 p.
44. Programming the Raspberry Pi: Getting Started with Python / [Monk S.]: McGraw-Hill Education. — New York, 2015. — 192 p.
45. Exploring Raspberry Pi: Interfacing to the Real World with Embedded Linux / [Molloy D.]: Wiley. — Indianapolis, 2016. — 720 p.
46. Safety in Smart Home Networks and Devices / [Kotenko V., Smith J.]: European Security Press. — London, 2020. — 190 p.
47. Digital Addressable Lighting Interface (DALI) – Part 101: General requirements / [IEC 62386]. — Geneva: International Electrotechnical Commission, 2014. — 55 p.
48. Applications of Human Motion Tracking: Smart Lighting Control / [Chun S., Park J.] // IEEE CVPR Workshops. — Portland, 2013. — P. 120–126.
49. Home Automation System Using Wireless Sensor Networks / [Kumar A., Singh R.] // International Journal of Engineering Trends. — London, 2015. — Vol. 2. — P. 45–51.
50. Design of a Connected Security Lighting System for Pedestrian Safety / [Kim Y., Lee S.] // Sensors Journal. — Basel: MDPI, 2019. — Vol. 19. — P. 210–225.